



Anhanguera

ALDRIGIS MOURA DA SILVA

**SISTEMA DE CONTROLE DIDÁTICO PARA TESTES EM
LABORATÓRIO**

Guarulhos
2016

ALDRIGIS MOURA
CECÍLIO DUARTE
EMERSON RENNAN F. SOUSA
FABRÍCIO NUNES COSTA

**SISTEMA DE CONTROLE DIDÁTICO PARA TESTES EM
LABORATÓRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Anhanguera, como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Profº Mr. Wagner Marques Rossini

Guarulhos

2016

SISTEMA DE CONTROLE DIDÁTICO PARA TESTES EM LABORATÓRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Anhanguera, como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof.Ms. Ricardo Zuppo

Prof. Ms. Helton Almeida

Prof. Esp. José Jorge Alcoforado

Prof. Dr. Ivan Costa

Dedico este trabalho aos familiares e amigos envolvidos.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaríamos de agradecer a todos os familiares dos integrantes por estar sempre ao lado de cada um, com palavras de incentivo e chamando a atenção sempre que possível, graças a essas pequenas atitudes, que nos tornam grandes, para chegarmos até esta fase e sempre dando força para continuar tendendo a ir cada vez mais longe.

Ao Coordenador Ms. Wagner Rossini, que abraçou e incentivou a ideia do projeto para ser executado.

A todas as empresas onde cada integrante se emprega na oportunidade de – além do sustento – proporcionar experiências e aprendizado assim podendo executar o projeto e também agregar mais ao conteúdo curricular para novas experiências futuras ao cargo de engenheiro.

Ao Mestre Engenheiro Eduardo L. Lozano de Campos por incentivo e dicas para aplicações no projeto.

A instituição que proporciona conhecimentos e direciona o caminho para cada aluno inscrito.

Aos professores Mestres e Especialistas, que além de professores, tendo o papel importante também de amigo legal e amigo chato, mas sempre visando pelo bem do aluno, com aprendizados, conselhos na área profissional e brincadeiras a parte com as turmas.

Aos alunos de classe que sobreviveu até o final do curso nesses 5 anos de luta, noites perdidas, chorando pontos aos professores e com a amizade saudável do começo ao fim.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade desenvolver um kit metodológico utilizando as metodologias de pesquisa documental e estudo de campo, onde suas premissas são aprimorar as ferramentas de laboratório para o aumento da qualidade das aulas de controle, facilitando a assimilação de conteúdo através da correlação teórica com a prática. O projeto será desenvolvido com foco ao fácil manuseio para os alunos com o seu primeiro contato com CLP, IHM, Componentes Elétricos e Eletrônicos, entre outros, que além de exemplificar aos alunos a parte de controle de sistemas, mas também na prática a utilização de cada componente ensinado em matérias acadêmicas absorvidas anteriormente.

Palavras-chave: Praticidade;Automação;Didática;Controle.

ABSTRACT

This work aims to develop a methodological kit using the methods of documentary research and field study, where their premises are to improve laboratory tools for improving the quality of management classes, facilitating the assimilation of content through theoretical correlation with practice. The project will be developed with focus on easy handling for students with their first contact with PLC, HMI, Electrical Components and Electronics, among others, in addition to illustrate to students the system control part, but in practice the use of each component taught in academic subjects absorbed previously.

Key-words: Practicality; Automation; Didactics; Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema de Controle em Malha-Aberta.	18
Figura 2.2 – Sistema de Controle em Malha-Fechada.	18
Figura 2.3 – Representação de sistemas em diagrama de blocos.	20
Figura 2.4 – Representação da linguagem IEC 1131-3.	26
Figura 2.5 – Exemplo de IHM com visão do processo.	27
Figura 2.6 – Fotodiodo, símbolo e circuito de teste.	29
Figura 2.7 – Foto-transistor, símbolo e circuito de teste.	30
Figura 3.1 – Diagrama de Blocos de Controle do Projeto.	31
Figura 3.2 – Sensor Foto-Transistor com LED IR.	32
Figura 3.3 – Dimensões da Ventoinha.	33
Figura 3.4 – Circuito Eletrônico do Sensor.	33
Figura 3.5 – Circuito Sinal do Sensor.	34
Figura 3.6 – Circuito amplificador PWM.	35
Figura 3.7 – Relé Contato Reversível Metaltex QE1R.	35
Figura 3.8 – Fonte Alimentação 110/220Vca para 24Vcc.	36
Figura 3.9 – CLP/IHM Unitronics SM35-J-T20.	36
Figura 3.10 – Ligações Elétricas do CLP.	37
Figura 3.11 – Dimensões CLP/IHM.	38
Figura 3.12 – Dimensões da Estrutura do Projeto.	39
Figura 4.1 – Estrutura em acrílico.	40
Figura 4.2 – Placa Circuitos eletrônicos do projeto.	41
Figura 4.3 – Fixação dos componentes.	41
Figura 4.4 – Teste de Funcionamento.	43
Figura 5.1 – Escala Gráfico CLP.	45
Figura 5.2 – Tela Liga Sistemas, Set-Point e PID.	46
Figura 5.3 – Resposta do Sistema PID em 1-0-0.	46
Figura 5.4 – Resposta do Sistema PID em 1000-0-0.	47
Figura 5.5 – Resposta do Sistema PID em 5000-0-0.	47
Figura 5.6 – Resposta do Sistema PID em 1000-1-0.	48
Figura 5.7 – Resposta do Sistema PID em 1000-1000-0.	48
Figura 5.8 – Resposta do Sistema PID em 1000-5000-0.	49
Figura 5.9 – Resposta do Sistema PID em 1000-1-1.	49

Figura 5.10 – Resposta do Sistema PID em 1000-1-1000.....	50
Figura 5.11 – Resposta do Sistema PID em 1000-1-5000.....	50
Figura 5.12 – Resposta do Sistema PID em 1000-1-0.....	51
Figura 5.13 – Resposta do Sistema PID em 1000-5-0.....	51
Figura 5.14 – Resposta do Sistema PID em 1000-5-1.....	52
Figura 5.15 – Resposta do Sistema PID em 1000-5-3.....	52
Figura 5.16 – Resposta do Sistema PID em 800-5-3.....	53
Figura 5.17 – Valores Iniciais para segundo método.....	54
Figura 5.18 – Resposta Sub Amortecido para $P = 1500$	54
Figura 5.19 – Resposta M.E. para $P = 1166$	55
Figura 5.20 – Resposta Final com Valores Calculados.....	56
Figura 5.21 – Ligando Auto Tune.....	57
Figura 5.22 – Sinais de saída do Auto Tune.....	57
Figura 5.23 – Valores calculados pelo Auto Tune.....	58
Figura 5.24 – Resposta do PID calculado pelo Auto Tune.....	58
Figura 5.25 – Teste perturbação no sistema.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Sintonia sugerida por Ziegler e Nichols no 1º método.....	23
Tabela 2.2 – Sintonia sugerida por Ziegler e Nichols no 2º método.....	24
Tabela 5.1 – O efeito de cada parâmetro PID sobre o processo.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – resposta no tempo de Controle On-Off.	20
Gráfico 2.2 – Curva de resposta de uma planta sem compensador.....	23
Gráfico 2.3 – Curva de resposta de uma planta com compensador K_p	24
Gráfico 3.1 – Relação Distancia Sensora x Corrente de Coletor Relativo.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
IHM	Interface Homem-Máquina
PID	Proporcional Integral Derivativo
$f(t)$	Função Temporal (domínio do tempo)
s	Variável Complexa de Laplace
L	Transformada de Laplace
$F(s)$	Função Transformada de Laplace
$R(s)$	Sinal de Entrada no Sistema
$C(s)$	Sinal de Saída no Sistema
P	Controlador Proporcional
I	Controlador Integral
PI	Controlador Proporcional Integral
PD	Controlador Proporcional Derivativo
t	Tempo
$K(p)$	Ganho Proporcional
$e(t)$	Sinal de erro
$u(t)$	Sinal de Entrada
K_i	Constante Integral
T_i	Tempo Integral
T_d	Tempo Derivativo
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
K_{cr}	Ganho Crítico
P_{cr}	Período Crítico
LDR	Light Dependent Resistor
V_{cc}	Tensão de Corrente Contínua
V_s	Tensão de Saída
RPM	Rotações Por Minuto
EPI	Equipamento de Proteção Individual
NR-6	Norma Regulamentadora de EPI's
T_s	Tempo de Assentamento
$SP\%$	Overshot em porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
1.4	METODOLOGIA CIENTÍFICA	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	17
2.1	TEORIA DE CONTROLE MODERNO.....	17
2.2	AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	25
2.3	SENSORES INDUSTRIAIS.....	28
2.3.1	Fotoelétrico - LDR.....	28
2.3.2	Fotoelétrico - Foto-Diodo	29
2.3.3	Fotoelétrico - Foto-transistor.....	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	SENSORES E ATUADORES DO PROJETO	32
3.2	ELETRÔNICA COMPLEMENTAR, ACIONAMENTO E ALIMENTAÇÃO.	33
3.3	CLP E IHM.....	36
3.4	CONSTRUÇÃO MECÂNICA.....	38
4	EXECUÇÃO FÍSICA DO PROJETO	40
5	RESULTADO	44
5.1	ESTUDO DE CONTROLE.....	44
5.2	MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS	53
5.3	AUTO TUNE	56
5.4	PERTURBAÇÃO NO SISTEMA	59
6	CONCLUSÃO E PROPOSTA DE CONTINUIDADE	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Sistemas com controle de variáveis e automatização se tornou uma das aplicações mais importantes e sendo indispensáveis na indústria moderna, tendo essa aplicação em processos produtivos que atribui para uma redução significativa em erros, custo e tempo de produção, mantendo ou até mesmo melhorando a qualidade dos produtos finais do processo, e por ser mais confiáveis e versáteis.

A aplicação do conceito “Controle e Automação” está cada vez mais presente no dia a dia da indústria sendo necessário cada vez mais profissionais qualificados para implementar e manter esses sistemas.

É importante existir tipos de plataformas de desenvolvimentos em laboratórios para auxiliar no entendimento da Teoria de Controle e Automação para profissionais que tem seu início em áreas acadêmicas, locais onde as instituições procuram sempre manter seus alunos cada vez mais atualizados e oferecendo a maior bagagem de conhecimento possível para sua formação.

Visando em levar uma tecnologia prática direto da indústria para a área acadêmica, foi o tema proposto pelo grupo em realizar um projeto que visa produzir um kit didático para ser aplicado em laboratórios acadêmicos com componentes industriais auxiliando os estudantes a assimilar e tendo mais contato com equipamentos, instrumentos industriais, compensadores PID e Sintonizadores Automáticos (Auto Tune) em controle e automação.

1.1 Problema de Pesquisa

É possível desenvolver um protótipo de um sistema de controle didático para estudos em bancadas para avaliação dos conceitos aplicados da metodologia de controle PID?

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo é fazer um sistema de controle didático para testes em laboratório, configurações e apresentações de todo funcionamento de controle com uma plataforma de fácil apresentação e de boa compreensão focado para áreas acadêmicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Para atingir o objetivo geral foi necessário aplicar as metodologias de pesquisa documental, estudo de campo e identificar as necessidades do corpo docente para incluir no projeto;
- Levantamento dos materiais necessários para utilizar no projeto, programar a linguagem Ladder, programação das telas da IHM, montagens mecânicas dos componentes e ligações elétricas dos componentes;
- Transferir as programações para o CLP e IHM, aplicar a montagem dos componentes, ligações elétricas e realizar testes do sistema.

1.3 Justificativa

A justificativa para introdução deste projeto é pelo fato do conteúdo referente à matéria de Teorias de Controle Clássico e Moderno ser um assunto muito complexo, foi observado que muitos alunos têm grande dificuldade para absorver o conceito do funcionamento de um Controle PID em Malha Fechada ou Aberta, muitas vezes por falta de oportunidades de visitas em plantas industriais e exemplos práticos de aplicação do tema desenvolvido em aula teórica.

1.4 Metodologia Científica

A metodologia direciona o caminho que o pesquisador irá percorrer para atingir os objetivos traçados. Conforme os autores,

[...] para que seja possível compreender a realidade e a contribuição do pesquisador, o procedimento metodológico deve abranger os conceitos teóricos de abordagem e o conjunto de técnicas. Além do referencial teórico, a metodologia deve ser redigida de forma clara, coerente e eficiente, possibilitando encaminhar os dilemas teóricos para o desafio da prática. [...] **a natureza do problema é que determina o método**, ou seja, a escolha do método e feita em função do problema estudado. (FREGONEZE, et al., 2014, p. 106).

Existem inúmeras qualificações e tipos de pesquisa conforme o método de abordagem. Destacam-se os tipos de pesquisa que será utilizado nesse trabalho:

- Pesquisa documental: refere-se a uma pesquisa eminentemente teórica, de revisão de literatura, em que existem apenas consulta a livros, estudos, documentos diversos. (Por exemplo: o estudo de um determinado artigo de lei; um modelo pedagógico; um traçado histórico de determinada cultura – desde que seja necessariamente um estudo meramente documental). Neste caso não existe a coleta de dados em campo, apenas a “documentação indireta”.
- Estudo de campo: é a interrogação direta das pessoas cujo comportamento que se deseja conhecer (como a elaboração e aplicação de questionários, por exemplo). Procede-se à solicitação de informações a um grupo significativo de pessoas acerca do problema estudado para, em seguida, mediante análise quantitativa, se obter as conclusões correspondentes aos dados coletados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 Teoria de Controle Moderno

Os estudos em sistemas de controle automáticos foram essenciais para a indústria moderna em sistemas de processos de produção, automatizando o controle de variáveis de grandezas como pressão, temperatura, níveis, vazão, entre outros, segundo Katsuhiko Ogata.

Um sistema regulador automático no qual a saída é uma variável tal como uma temperatura, pressão, fluxo, nível de líquido ou pH é denominado um sistema de controle de processo. Controle de processo é exaustivamente aplicado na indústria. Controles programados, tal como controle de temperatura de fornos para aquecimento nos quais a temperatura do forno é controlada de acordo com um programa pré-selecionado, são muitas vezes usados nestes sistemas. (OGATA, 1982, p.4).

O contínuo avanço e aperfeiçoamento na área de controle vêm a cada dia beneficiando e garantindo boa produtividade nas indústrias de processos dando certa importância a Automação e Controle nas áreas de produção, segundo Katsuhiko Ogata,

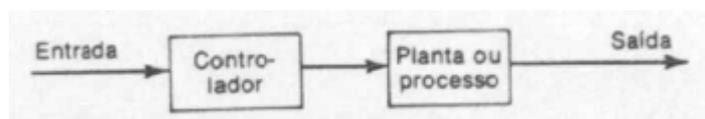
Desde que os avanços na teoria e na prática de controle automático propiciam meios para atingir-se desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, bem como melhoria na qualidade e diminuição do custo de produção, aumento da taxa de produção, operações manuais repetitivas etc., a maioria dos engenheiros e cientistas deve entender e conhecer bem este campo. (OGATA, 1982, p.1).

Existem dois dos principais tipos de controle, o de malha aberta e malha fechada, sendo este último será focado aos estudos para se atingir o objetivo do projeto.

Sistemas de malha aberta são sistemas de controle onde se tem somente a atuação do controlador para atingir a saída desejada, segundo Ogata “Sistemas de controle em malha-aberta são sistemas de controle nos quais a saída não tem efeito na ação do controle, isto é, em um sistema de controle em malha-aberta, a saída nem é medida e nem é realimentada para comparação com a entrada”. (OGATA, 1982, p.5)

A vantagem desse sistema é de necessitar de poucos componentes para sua operação e é de fácil manutenção. Já a desvantagem é que esse sistema necessita que os componentes da malha ou a instrumentação estejam bem calibrados, pois não há monitoramento ou realimentação do sistema para correção de erros na saída, representado em bloco conforme Figura 2.1.

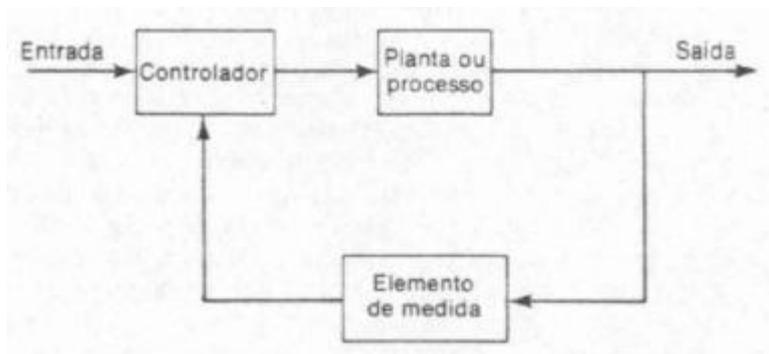
Figura 2.1–Sistema de Controle em Malha-Aberta.



Fonte: Ogata (1982, p.7)

Sistemas de malha fechada são sistemas de controle onde se tem além da atuação do controlador, uma realimentação da saída (chamada de sensor), onde envia uma resposta para o controlador informando um erro na saída e a corrigindo, segundo Ogata “Um sistema de controle de malha-fechada é aquele no qual o sinal de saída possui um efeito direto na ação de controle. Isto é, sistemas de controle em malha-fechada são sistemas de controle realimentados”. (OGATA, 1982, p.4) A vantagem desse sistema é em possuir realimentação para o controlador a fim de reduzir o erro, tendo assim um sistema mais preciso para o controle. Já a desvantagem é podendo possuir muitos componentes na malha tornando um sistema muito complexo e exigindo máximo de cuidado na hora de modelar e parametrizar o sistema, representado em bloco conforme Figura 2.2.

Figura 2.2–Sistema de Controle em Malha-Fechada.



Fonte: Ogata (1982, p.4)

O estudo de controle de sistema é necessário o envolvimento de cálculos matemáticos sendo que a maior parte por métodos de Transformadas de Laplace que é uma simplificação para facilitar na realização de cálculos de Equações Diferenciais, apresentada por Puglia (2013) na equação (1).

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (1)$$

Onde:

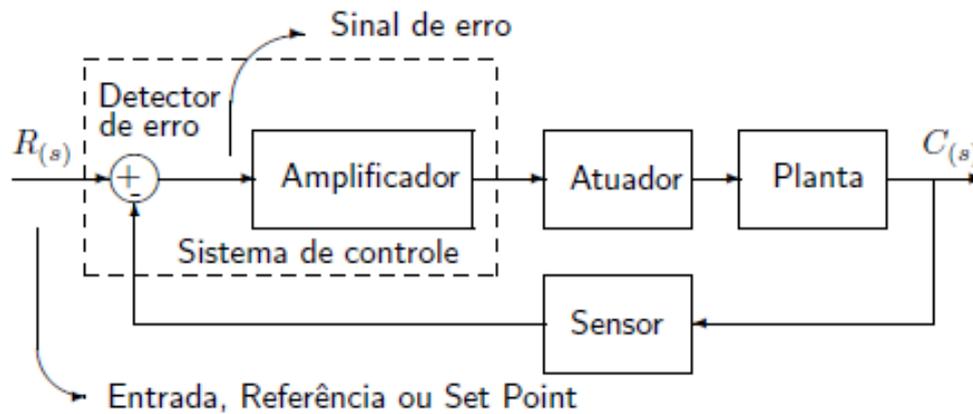
- $f(t)$ = função temporal em que $f(t)=0$ para $t<0$
- s = variável complexa de Laplace
- \mathcal{L} = símbolo que indica transformação por Laplace de $f(t)$
- $F(s)$ = transformada de Laplace de $f(t)$

Pode-se utilizar a Tabela de Transformada de Laplace (Anexo A) onde se encontra as regras para se transformar funções sem precisar de cálculo por integral.

Na matemática há uma ferramenta importante que é a modelagem de sistemas onde se representa matematicamente seu comportamento no tempo ou na frequência (em Laplace) para ser utilizado em forma de expressão algébrica determinando sua resposta no tempo. São modelados sistemas físicos, mecânicos (rotação, translação, etc.), pneumáticos, hidráulicos, elétricos, entre outros.

Após uma modelagem matemática, a expressão algébrica será inserida em um diagrama de blocos. Esse diagrama de blocos é a representação de todo o sistema de controle que pode ser Malha Fechada ou Malha Aberta, como no exemplo da Figura 2.3 onde temos um sistema de Malha Fechada que possui uma realimentação (sensor) do sinal de saída ($C(s)$) para o controlador (Detector de erro e Amplificador) que compara com o valor de entrada (mais conhecido como valor desejado ou Set-Point, representado na Figura 2.3 como $R(s)$) atuando (atuador) na Planta a fim de diminuir o erro da saída do sistema ou até mesmo de zerar seu erro estacionário, ou não, e também pode representar sistemas ligados em cascatas, entre outros tipos.

Figura 2.3– Representação de sistemas em diagrama de blocos.



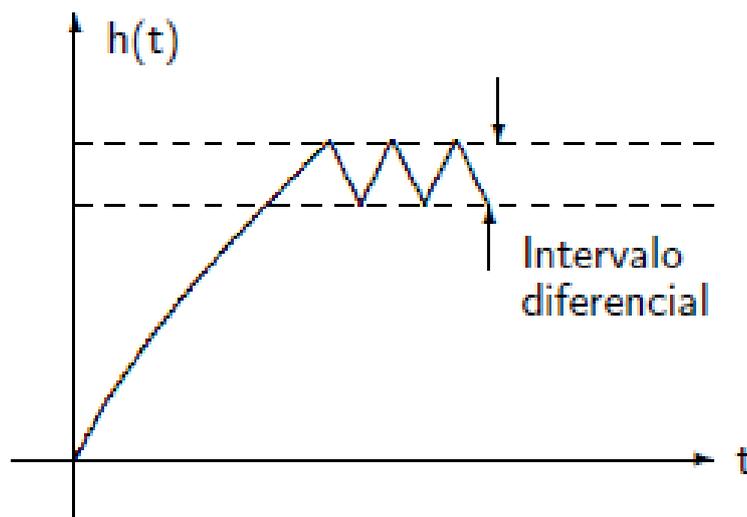
Fonte: Puglia (2013, p.55)

Sendo assim, o sistema por representação em diagrama de blocos conclui-se por ser o método mais prático e de fácil entendimento de um simples sistema até um sistema mais complexo.

Para que o sistema consiga atingir o objetivo de diminuir o erro ou eliminá-lo, devem-se utilizar os seguintes tipos de controladores:

- **Controlador On-Off:** é um tipo de controlador onde se tem somente duas ações que é de Ligado e Desligado, porém não é possível obter um controle estável mantendo sempre um diferencial no gráfico 2.1 da resposta no tempo.

Gráfico 2.1– resposta no tempo de Controle On-Off.



Fonte: Puglia (2013, p.57)

- **Controlador Proporcional (P):** é um tipo de controlador que adiciona um ganho proporcional K_p multiplicado pelo sinal de erro $e(t)$, onde o objetivo é

manter um sistema de controle estável, porém podendo ter erros na saída do sistema, apresentado por Puglia (2013) na equação (2).

$$u(t) = K_p e(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \text{ onde } \begin{cases} u(t) \rightarrow \text{sinal de entrada} \\ K_p \rightarrow \text{ganho proporcional} \\ e(t) \rightarrow \text{sinal de erro} \end{cases} \quad (2)$$

- **Controlador Integral (I):** é um tipo de controlador que possui uma constante K_i multiplicada pela integral do sinal de erro $e(t)$ no domínio do tempo de sua taxa de variação, tendo o objetivo de diminuir ou igualar o erro na saída do sistema a zero, apresentado por Puglia (2013) na equação (3).

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \Rightarrow u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \xrightarrow{\mathcal{L}} G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

- **Controlador Proporcional Integral (PI):** é um tipo de controlador que em um único componente temos a soma do controle Proporcional e Integral, com o Ganho Proporcional K_p , dividido pelo Tempo Integral T_i e multiplicado pela integral do sinal de erro $e(t)$, apresentado por Puglia (2013) na equação (4).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \xrightarrow{\mathcal{L}} \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

- **Controlador Proporcional Derivativo (PD):** é um tipo de controlador que possui Tempo Derivativo T_d que é multiplicado pela constante Proporcional e também pelo sinal de erro $e(t)$ derivado no tempo t resultando no Controle Derivativo que após é somado pelo Controle Proporcional, tendo o objetivo de antecipar uma ação no sinal de saída do sistema, apresentado por Puglia (2013) na equação (5). Vale lembrar que, segundo Ogata: “Note que a ação de controle derivativa nunca pode ser usada sozinha porque esta ação somente é efetiva durante os intervalos de tempo correspondentes a transitórios.” (OGATA, 1982, p.178)

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \xrightarrow{\mathcal{L}} \frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (5)$$

- **Controlador Proporcional Integral-Derivativo (PID):** é o controlador compensador mais completo, pois este soma as componentes Proporcional, Integral e Derivativo (estudadas nos itens anteriores) no sistema, apresentado por Puglia (2013) na equação (6).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

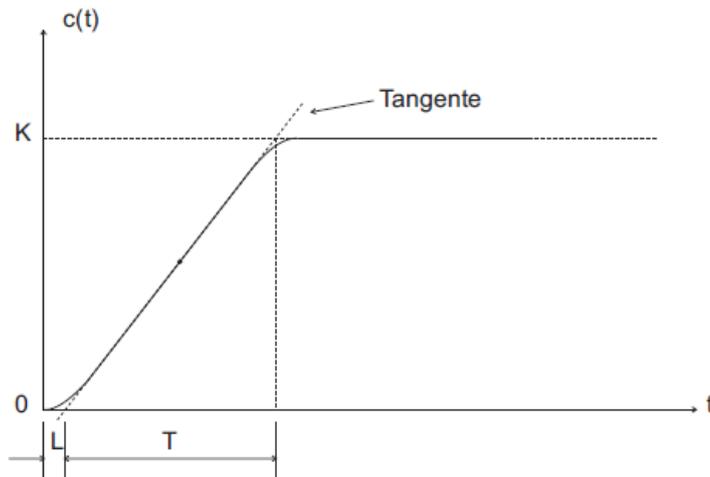
$$\frac{\mathcal{L}^{-1}}{\mathcal{L}} \rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Para encontrar os valores ideais a serem aplicados em K_p , T_i e T_d em um sistema com controlador PID, quando se tem a função de transferência da planta, pode-se aplicar técnicas de cálculos em cima da resposta temporal, erro estacionário, sobre o LGR no domínio da frequência em transformada de Laplace, compensadores, arranjo de Routh, entre outros a fim de se obter valores exatos para cada tipo de planta.

Quando não é possível obter a função de transferência da planta a ser calculada, pode-se utilizar método por tentativa e erro, porém acaba sendo muito trabalhoso, demanda muitas horas de tentativas para alcançar os valores ideais ou próximos, e muitas vezes não sendo possível de conseguir atingir os valores desejáveis ao sistema.

Para eliminar os problemas em uma planta sem função de transferência e que é necessário um rápido ajuste nos compensadores, Ziegler e Nichols baseando-se em experimentos de resposta ao degrau unitário, desenvolveram dois métodos para encontrar os valores de PID:

- **1º Método:** para utilização desse método a planta não deverá possuir sobre sinal (Overshot) na resposta temporal sem compensador, o sistema irá gerar um gráfico de resposta quando se aplicar um degrau unitário ou um set-point, nesse gráfico será avaliado o tempo morto ou tempo para início de subida L e o tempo de subida T , conforme Gráfico 2.2 e Tabela 2.1.

Gráfico 2.2– Curva de resposta de uma planta sem compensador.

Fonte: Puglia (2013, p.209)

Tabela 2.1– Sintonia sugerida por Ziegler e Nichols no 1º método.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Puglia (2013, p.209)

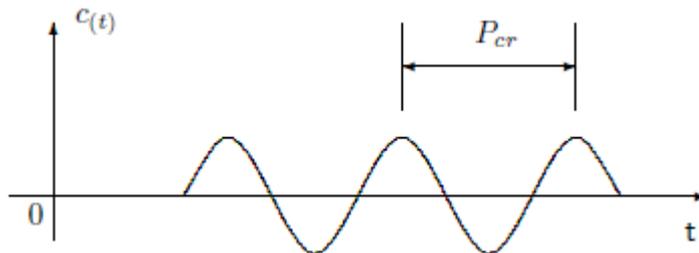
Ziegler e Nichols desenvolveram – conforme a Tabela 2.1 – fórmulas matemáticas simples para se encontrar valores para o compensador PID seguindo valores de tempo (L e T) encontrados em uma curva de resposta conforme o Gráfico 2.2, como exemplo para um controle PID, segundo Puglia (2013) a função de controle ficaria na forma da equação (7).

$$G_{1(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 1,2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,05Ls \right) = 0,6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (7)$$

- **2º Método:** deve-se inicialmente forçar as constantes $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, utilizando somente o ganho proporcional K_p de zero até o seu valor crítico K_{cr} que é quando seu sinal de saída começa a ficar instável ou com

oscilações constantes – se caso o K_{cr} for infinito ou não ser possível encontrar, não poderá ser utilizado este método – onde será apresentado na curva de resposta que será definido o período crítico P_{cr} do sinal, conforme Gráfico 2.3 e Tabela 2.2.

Gráfico 2.3– Curva de resposta de uma planta com compensador K_p .



Fonte: Puglia (2013, p.211)

Tabela 2.2– Sintonia sugerida por Ziegler e Nichols no 2º método.

	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Fonte: Puglia (2013, p.211)

Ziegler e Nichols desenvolveram – conforme a Tabela 2.2 – fórmulas matemáticas simples para se encontrar valores para o compensador PID seguindo valor de período crítico (P_{cr}) encontrado em uma curva de resposta conforme o Gráfico 2.3, como exemplo para um controle PID, segundo Puglia (2013) a função de controle ficaria da forma da equação (8).

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 0,6 K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0,5 P_{cr} s} + 0,125 P_{cr} s \right) = 0,075 K_{cr} P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad (8)$$

2.2 Automação Industrial

Relembrando sobre o conceito de automação necessário na aplicação do projeto, segue uma citação:

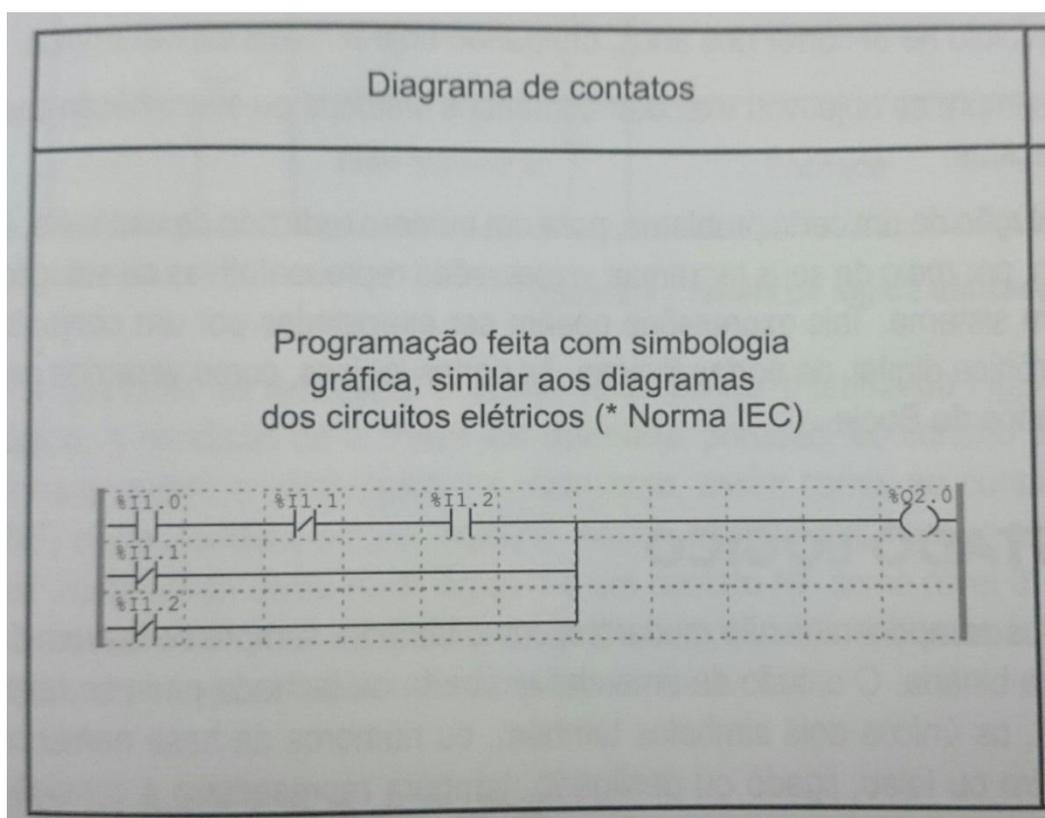
Automação (do latim *Automatus*, que significa mover-se por si), é um sistema automático de controle pelo qual os mecanismos verificam seu próprio funcionamento, efetuando medições e introduzindo correções, sem a necessidade da interferência do homem (HOLANDA, 1975, p.163).

Uma peça chave utilizada para o processamento de todo o controle, como um cérebro do sistema, é o Controlador Lógico Programável, que nada mais é do que um computador com entradas e saídas eletroeletrônicas, ou seja, um componente robusto com uma eletrônica microprocessada onde irá ler as entradas digitais ou analógicas, processa as informações conforme programado por um técnico especializado e respondendo a uma saída digital ou analógica.

Para um controlador funcionar adequadamente é necessário programar todo o processo em forma de linguagem de programação que será a base do processamento de dados, com opções de alguns tipos de linguagens opcionais, segundo Ferdinando Natale:

A linguagem IEC 1131-3 é uma entre as muitas de alto nível existentes, entendendo-se por alto nível aquela que se aproxima muito da humana. Ela foi desenvolvida levando em conta os conhecimentos da área de automação, tendo a partir daí, surgido representações para a mesma linguagem: Diagrama de Contatos do inglês Ladder Diagram (LAD); Lista Diagrama em Bloco de Funções do inglês FunctionsBlockDiagram (FDB); texto estruturado do inglês StructuredText (ST); linguagem sequencial (também muito conhecida como grafcet), do inglês Sequential Function Chart (SFC) e IL do inglês InstructionList (NATALE, 2009, p.17).

A linguagem de programação que foi estudada e utilizada é Diagrama de Contatos ou conhecida como linguagem Ladder, uma linguagem mais usual na maioria das empresas automatizadas por CLP's, mais utilizadas pelos técnicos de programação e por ser uma linguagem de fácil entendimento, como mostra em uma simples lógica projetada na Figura 2.4.

Figura 2.4– Representação da linguagem IEC 1131-3.

Fonte:Natale (2009, p.37)

Para interligar a malha do sistema de controle no CLP foi preciso estudar sobre leitura na entrada analógica e atuação na saída analógica. Referente à leitura de um sinal analógico que pode ser por tensão de entrada de 0 a 10V ou de corrente em 4 a 20mA pois muito fabricantes de sensores já vem com essa configuração de sinal padronizadas, e esses sinais são compreendidos pela programação em uma escala de 0 a 4095 em binário pela programação interna do CLP proporcional ao sinal de entrada.

Referente ao fornecimento de um valor analógico na saída também válida aos mesmos valores (0 a 10V ou de 4 a 20mA, como citado anteriormente para sinais de entrada) e também é considerado para saída de sinal a mesma escala de programação de 0 a 4095 em números binários.

Na área da automação surgiu uma nova referencia de monitoramento que é a IHM (Interface Homem-Máquina) onde temos uma tela normalmente em LCD, atualmente coloridas, com animações de todo o processo da planta de fabricação de uma indústria podendo ser em Touchscreen (sensível ao toque) para interação do operador ao atuar uma válvula, motor, pistão, alterar valor de controle conforme sua

necessidade de produção ou pela manutenção onde se pode estar entrando em Configurações de acesso rápido ou alteração dos valores de controle de PID entre outros tipos de configurações, essas telas de IHM se apresenta nas fábricas industriais como no exemplo da Figura 2.5.

Figura 2.5– Exemplo de IHM com visão do processo.



Fonte: Moraes (2007, p. 118)

Segundo Moraes (2007), as telas IHM foram inspiradas nos antigos painéis sinóticos industriais que eram painéis enormes onde continham todo o desenho do processo industrial com lâmpadas sinaleiras, alarmes sonoros e botões para acionamentos de atuadores à distância, porém o problema era quando se precisava alterar algo no processo tendo que reformar todo o painel ou para transportar a outra sala de controle, com a chegada da IHM todos esses problemas foram resolvidos com uma tela compacta podendo sempre ser editada e modificada com facilidade e sendo instalada em outro painel com mais facilidade que os métodos antigos.

2.3 Sensores Industriais

Um dos principais componentes que é utilizado em um sistema de malha-fechada são os sensores, utilizado muito na indústria moderna onde se encontra de diversos tipos e para diversas aplicações, esses componentes surgiram antes dos CLP's, porem após a utilização dos CLP's dentro da indústria os sensores começaram a serem aplicados nos processos frequentemente.

Sabemos que hoje em dia os sensores são indispensáveis em qualquer indústria, que acompanha na evolução e que é muito utilizado em novas tecnologias implementadas em diversas plantas, explicando melhor o que são sensores, segundo Wilerson Sturm,

São dispositivos que transformam mudanças em alguma grandeza física, sob seu campo de atuação, em variações de alguma grandeza elétrica mensurável, fornecendo como resultado em sua saída um sinal proporcional à variação desta grandeza. Podem transformar diretamente uma forma de energia noutra, neste caso são chamados de transdutores (STURM, 2004, p.11).

Ou seja, são componentes eletrônicos que tem a função de sentir as ações físico-mecânicas e transformando-as em sinais eletrônicos capazes de serem lidos e processados por CLP's.

No mercado temos os tipos de Sensores Indutivos, Capacitivos, Fotoelétricos, Sensores de Contraste e Cor, Magnéticos, Ultra-sônicos, Termopares, Termoresistências, Encoders, Resolvers, Piezoelétrico, Piezoresistivo e Umidade Relativa, que foram estudados para serem aplicados a cada tipo de sistemas de controle.

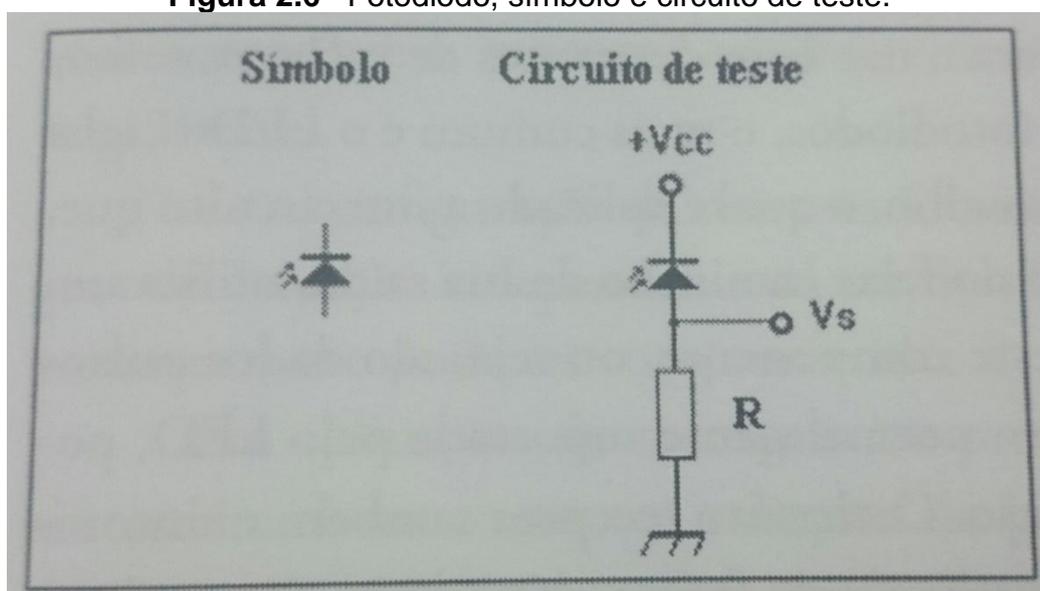
2.3.1 Fotoelétrico - LDR

O LDR (Light Dependent Resistor) nada mais é do que um resistor que tem sua resistência elétrica variada conforme a quantidade de luz recebida em sua capsula transparentemente exposta à luz externa, pelo fato desse componente ser muito fácil de encontra-lo, porem é pouco preciso e não linear, mas podendo ser aplicado em varias aplicações simples que não necessite de precisão em seu sensoriamento.

2.3.2 Fotoelétrico - Foto-Diodo

O foto diodo é simplesmente um diodo sensível a luz, este componente tem o seu funcionamento em polarização reversa que quando à incidência de luz em sua capsula exposta o mesmo libera a passagem da corrente elétrica como um Diodo convencional e na ausência de luz a corrente elétrica é bloqueando operando sempre neste ciclo sem variação da corrente, como mostra sua ligação elétrica na Figura 2.6.

Figura 2.6– Fotodiodo, símbolo e circuito de teste.



.Fonte: Sturm (2004, p. 47)

2.3.3 Fotoelétrico - Foto-transistor

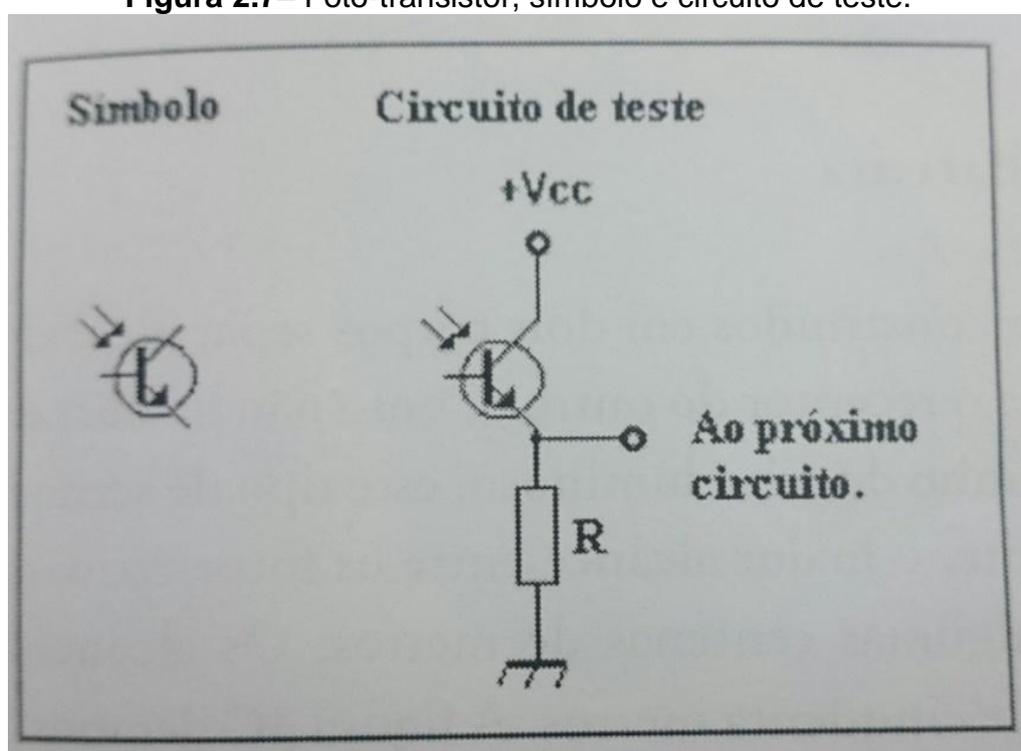
No mercado eletrônico o sensor de melhor custo-benefício que pode ser aplicado em diversos processos, com ótimas características eletrônicas e pouca limitação de aplicação é o Sensor Fotoelétrico que segundo Wilerson Sturm “Devido a suas características de velocidade de resposta e também em termos de versatilidade são sensores largamente utilizados na indústria, principalmente devido à redução de preços, resultado das tecnologias cada vez mais avançadas e direcionadas para esta área de produção em sensores.” (STURM, 2004, p.45)

O principal componente eletrônico utilizado para funcionalidade desse sensor é um transistor com características de sua base ser constituída de uma junção sensível à luz, explicando melhor Sturm cita:

É um transistor especialmente construído para esta finalidade, cuja junção base-coletor fica exposta à luz, através de uma pequena janela, a qual atua de forma semelhante ao foto-diodo. O transistor, por se um componente de amplificação, fornece alguns mA com alta luminosidade incidente (STURM, 2004, p.47).

Como na Figura 2.7 utilizada pelo Sturm, este sensor pode ser utilizado como “pull-up”, ou seja, resistor no emissor do foto-transistor para limitar a corrente e ao detectar um meio em forma de luz, enviando sinal de nível alto ou uma tensão próxima a tensão máxima que o sensor está sendo alimentado.

Figura 2.7– Foto-transistor, símbolo e circuito de teste.



Fonte: Sturm (2004, p.47)

Podendo assim tendo uma configuração eletrônica simples e barata para utilizar em inúmeros sistemas de controle ou somente indicação tanto na indústria como para áreas acadêmicas.

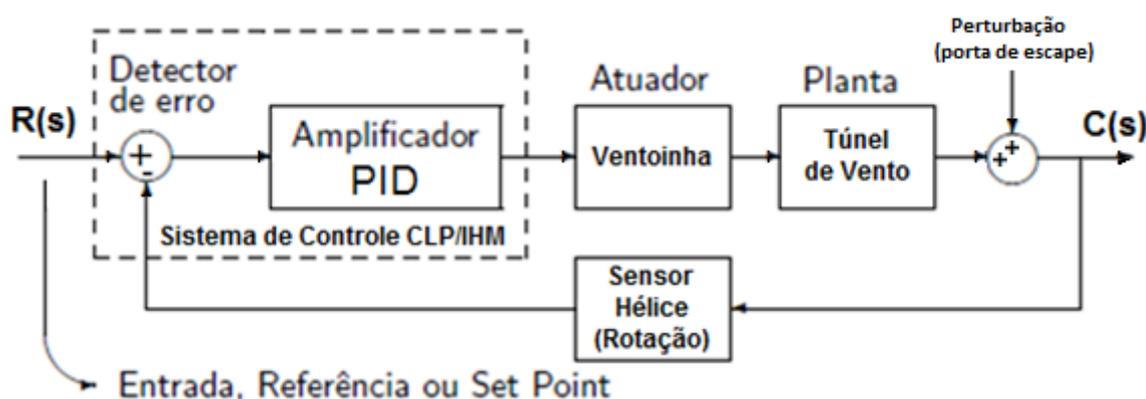
3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os componentes e os métodos que foram aplicados ao projeto para o controle de sistemas simples onde foram necessárias pesquisas teóricas, orientações de tutores e professores, análises para identificar as necessidades de aplicações práticas e a execução de todo o conjunto para se atingir ao objetivo do projeto.

O conteúdo que é apresentado no projeto foi definido em discussão com professores usuários do kit e o grupo do projeto que, para um projeto a fim de ser didático necessita conter uma estrutura física simples com componentes de controle e automação de fácil contato e com um sistema de controle em uma Interface Homem-Máquina de fácil operação e entendimento.

Este sistema de controle é um Kit Didático compacto e de fácil acesso que irá conter um controlador central para este sistema sendo um CLP integrado com uma IHM que irá controlar uma planta do tipo Túnel de Vento com uma porta de escape na parte intermediária para simular uma perturbação no sistema de controle, nas extremidades desse túnel contém uma Ventoinha geradora de vento e na outra extremidade do túnel hélices com um sensor de rotação a fim de obter uma malha fechada de controle, que está representada conforme o diagrama de blocos de controle da Figura 3.1.

Figura 3.1– Diagrama de Blocos de Controle do Projeto.



Fonte: Dos Autores (2016)

Usando como base o sistema em diagrama de blocos, será a referencia para o dimensionamento dos componentes integrados no controle do projeto.

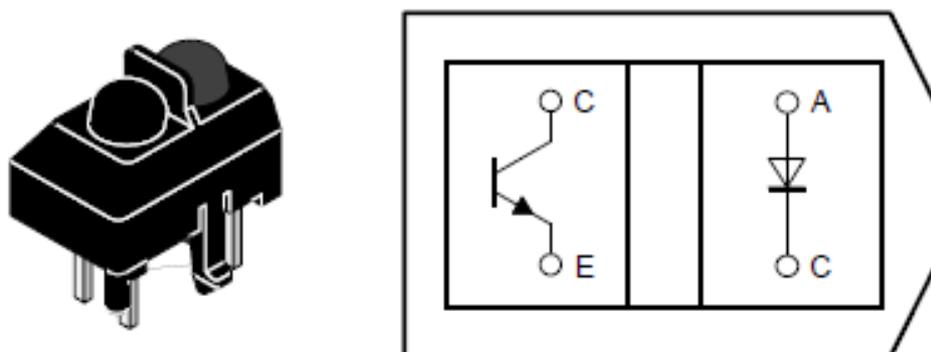
3.1 Sensores e Atuadores do Projeto

Aproveitando o sistema com uma hélice (80 x 80 x 25 mm) que transforma mecanicamente o vento recebido para rotação em seu eixo, com isso mantendo a simplicidade do projeto e por ser mais vantajoso é realizar o controle do sistema pela grandeza de rotação (RPM) na hélice.

Para uma boa medição da rotação da hélice utilizada é necessário escolher um sensor com capacidade de realizar essas medições em altas frequências (pulsos por tempo) para respostas rápidas na realimentação do controle, que seja compacto e de preço acessível, para isso o mais adequado é utilizar um sensor fotoelétrico do tipo foto-transistor mencionado na fundamentação teórica.

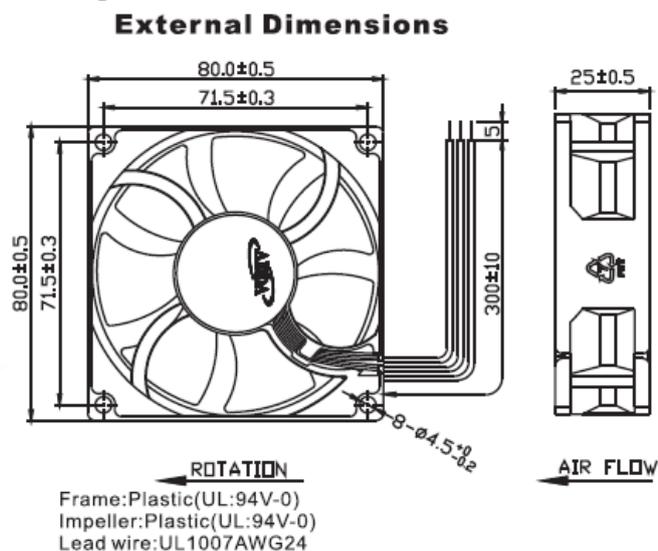
O sensor utilizado é um Sensor Ótico Refletivo fabricado pela “Vishay” de modelo “TCRT5000”, o mesmo é constituído por um foto-transistor e um LED IR (Infra-Red ou Infra Vermelho) conforme apresentado na Figura 3.2, sendo o próprio LED do sensor uma fonte de luz que deverá ser refletida por um determinado ponto na hélice após completar um ciclo de rotação fazendo com que o foto-transistor transmita um sinal para o sistema.

Figura 3.2– Sensor Foto-Transistor com LED IR.



Fonte: VISHAY (2000)

Na parte de atuação do controle será utilizado uma Ventoinha fabricada pela ADDA de modelo “AD0812VB-A7BGP” de 12Vdc / 0,53A / 6,4W / 5000rpm (80 x 80 x 25 mm, especificadas conforme Figura 3.3), este componente é responsável por atuar no sistema com o objetivo de igualar a saída com a entrada, mais conhecido tecnicamente como “Set-point” (valor desejado do usuário do sistema).

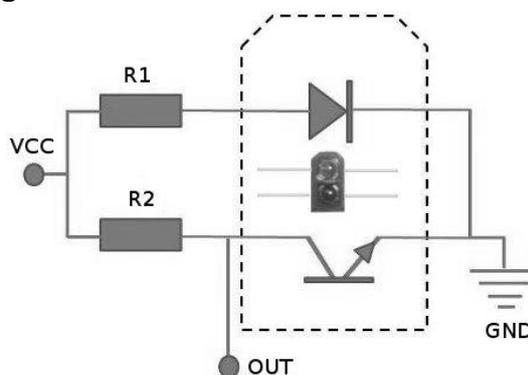
Figura 3.3– Dimensões daVentoinha.

Fonte: ADDA (2008)

Com a escolha do sensor e atuador, deverão ser analisadas posteriormente as necessidades de uma eletrônica complementar para os componentes estarem atuando no sistema com poucas perdas possíveis.

3.2 Eletrônica Complementar, Acionamento e Alimentação.

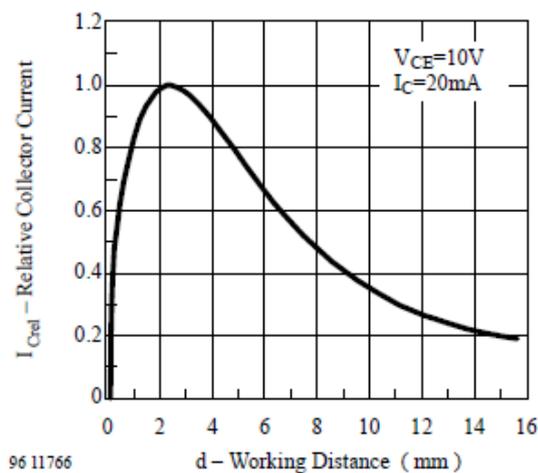
Para obter um funcionamento do sensor como modelo industrial, é necessário projetar um circuito eletrônico simples com somente dois resistores para cada componente do sensor, onde temos um resistor $R1 = 820\Omega$ (1W) para limitar a corrente no LED IR e outro resistor $R2 = 2,2k\Omega$ (1/4W) limitando a corrente no foto transistor, considerando uma alimentação $V_{cc} = 24V_{dc}$ e $GND = 0V_{dc}$, consegue-se obter na saída $OUT = 15V_{dc} \sim 23V_{dc}$, conforme Figura 3.4.

Figura 3.4– Circuito Eletrônico do Sensor.

Fonte: Dos autores (2016)

Para este circuito do sensor, a tensão de saída sofre muitas variações dependendo da distancia de instalação do sensor – considerando variações pequenas da distancia para variações da Corrente de saída que corresponde à altas variações da tensão de saída – conforme Gráfico 3.1.

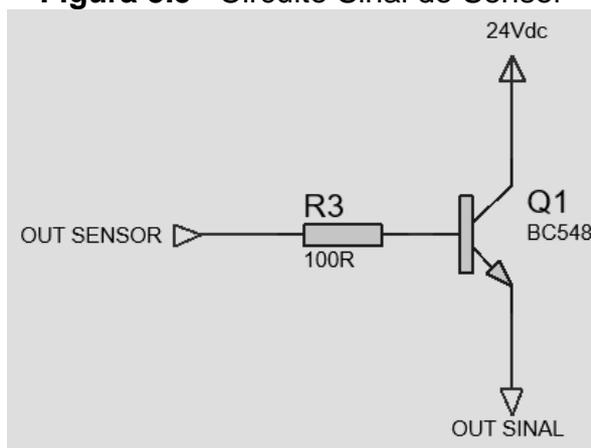
Gráfico 3.1 – Relação Distancia Sensora x Corrente de Coletor Relativo.



Fonte: VISHAY (2000)

Para resolver este problema foi criado um circuito eletrônico pós-saída (OUT) para amplificar o sinal do sensor com o Transistor “BC548” garantindo os 24Vdc direto para o sistema, sem afetar o transistor tendo a corrente limitada pela própria impedância de entrada do CLP, como segue o circuito eletrônico na Figura 3.5.

Figura 3.5– Circuito Sinal do Sensor



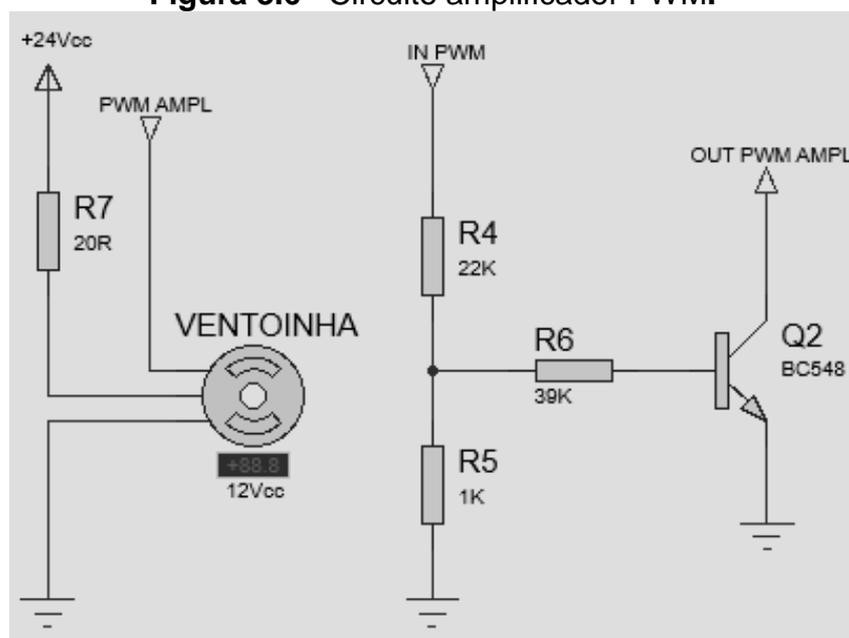
Fonte: Dos autores (2016)

Para conseguir um ótimo ganho eletrônico no atuador do sistema (Ventoinha) foi projetado um circuito a fim de amplificar o sinal PWM e também gerar uma queda

de tensão no atuador, lembrando que a fonte de alimentação é 24Vdc e aVentoinha deve ser alimentada e manipulada por 12Vdc.

Para a amplificação do sinal PWM temos resistores $R4 = 22k\Omega$ e $R5 = 1k\Omega$ ambos de 1/4W para realizar divisão de tensão para polarização da base com seu resistor $R6 = 39k\Omega$ (1/4W) e excitando o transistor “BC548” amplificando o sinal PWM para aVentoinha, o resistor $R7 = 20\Omega$ (2x10 Ω de 5W cada) foi utilizado para queda de tensão na alimentação daVentoinha, conforme Figura 3.6.

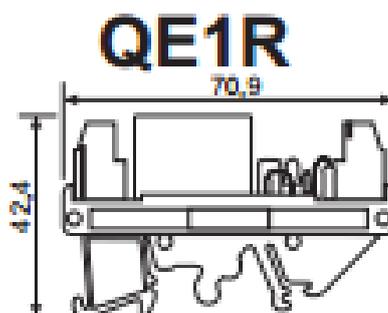
Figura 3.6– Circuito amplificador PWM.



Fonte: Dos autores (2016)

O sistema onde se encontra o atuador e o sensor contém um Relé 24 Vcc da Metaltex modelo “QE1R-24” apresentado na Figura 3.7, que será acionada pelo CLP para o funcionamento efetivo do sistema físico do projeto quando for solicitado pelo usuário no início do controle.

Figura 3.7– Relé Contato Reversível Metaltex QE1R.



Fonte: METALTEX (2016)

Para a alimentação do sistema está sendo utilizada uma fonte fabricada pela Mean Well modelo “RS-35-24” conforme a Figura 3.8, podendo utilizar em tomadas de 100 até 240Vca em série com uma simples chave seccionadora e fornecendo em sua saída tensão de 24Vcc para até 1,5A de corrente para todo o sistema do projeto (CLP, Atuador, Sensor, etc), tendo assim uma potencia de fornecimento de até 36W.

Figura 3.8– Fonte Alimentação 110/220Vca para 24Vcc.



Fonte: MEAN WELL (2011)

Dimensionado toda parte da eletrônica complementar, acionamentos e alimentação deve-se escolher o controlador ideal para o projeto onde serão interligados sensores, atuadores e acionamentos.

3.3 CLP e IHM

O componente de controle e interface escolhido para o projeto é um CLP integrado com IHM da Unitronics de modelo “SM35-J-T20”, o mesmo foi escolhido por ser simples, completo, robusto, excelente custo-benefício e compacto como mostra na Figura 3.9.

Figura 3.9– CLP/IHM Unitronics SM35-J-T20.



Fonte: UNITRONICS (2014)

A parte de software e interface vem com:

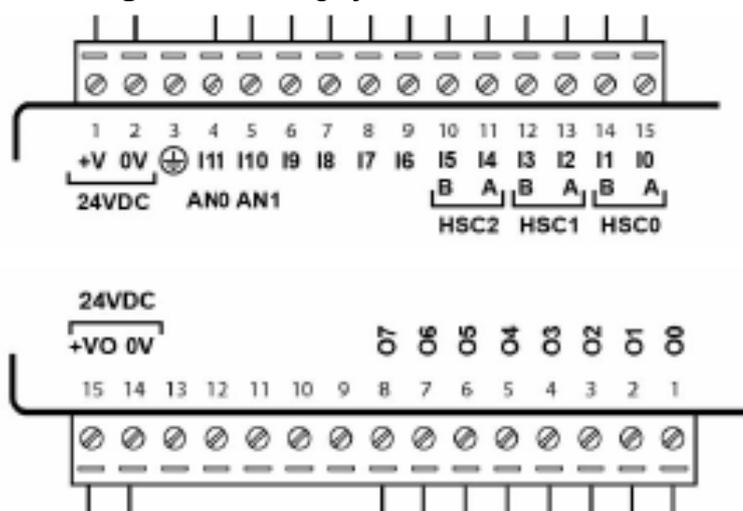
- Display gráfico LCD color de 3,5" (320x240 pixels) com Touchscreen Resistivo
- Relógio em tempo real.
- Programação através de Software com Lógica Ladder

A parte de Hardware vem com:

- 10 entradas digitais (pnp/npn) + 2 digital ou analógica
- 8 saídas digitais (Transistor)
- Memória de usuário de 512kb
- TCP/IP via Ethernet
- Modbus/OPC/DDE Server
- Comunicação com modem GSM e RS232
- Proteção frontal IP66
- Alimentação 24 Vcc

Para realização das ligações elétricas dos sensores, atuadores e botões de Liga/Desliga no CLP deve-se seguir o esquema conforme Figura 3.10, há uma importância extrema para ligações elétricas, pois havendo um problema na ligação pode causar um funcionamento incorreto do sistema e até mesmo danificando os componentes.

Figura 3.10– Ligações Elétricas do CLP.



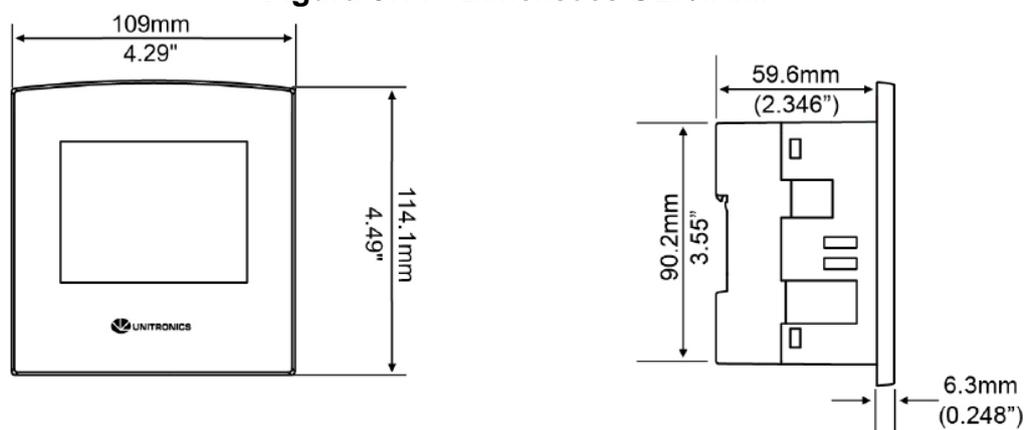
Fonte: UNITRONICS (2014)

Para programação da linguagem Ladder e da Tela IHM é utilizado o software “VisiLogic”, um software interativo de fácil programação que além da Linguagem Ladder com Bloco de Funções Especiais, PID, Gerenciamento de Alarmes, Gráficos e Tabelas, também é possível projetar a tela da IHM em um único programa, uma programação específica que é feita conforme a necessidade inicial do projeto e ao decorrer da execução.

3.4 Construção Mecânica

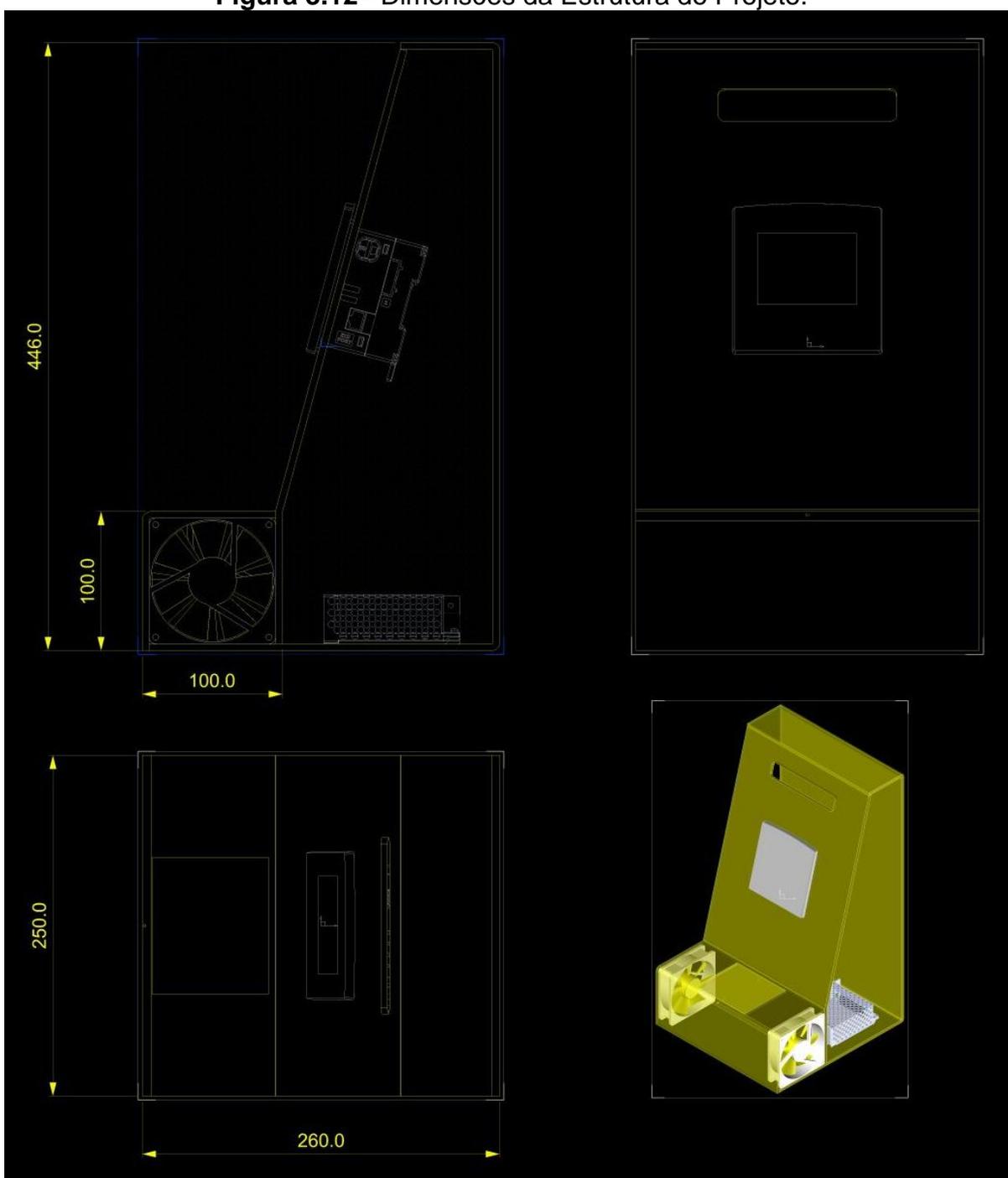
O projeto é montado todo em acrílico, a ideia é deixar todos os componentes os mais visíveis possíveis beneficiando a didática, que será construída com uma alça superior para transporte, uma abertura para encaixe da IHM/CLP conforme as medidas na Figura 3.11, na parte inferior frontal se encontra o túnel de vento para uma melhor visualização do funcionamento do sistema que seguirá as medidas da Ventoinha e Hélice que possuem as mesmas dimensões já apresentada na Figura 3.3, contando também com uma pequena portinhola que irá simular uma perturbação no sistema no momento dos testes, na parte inferior traseira contará com as placas eletrônicas e a fonte de alimentação.

Figura 3.11– Dimensões CLP/IHM.



Fonte: UNITRONICS (2014)

Com todas as medidas dos componentes irá ser utilizado no sistema, foi realizado um projeto de desenho mecânico da estrutura a ser usinado, conforme o desenho da estrutura da Figura 3.12 em escala de milímetro (mm).

Figura 3.12– Dimensões da Estrutura do Projeto.

Fonte: Dos Autores (2016)

Com todo dimensionamento do projeto, agora é necessário realizar a execução da usinagem da estrutura e montagem de todo o sistema do projeto, com programações e testes.

4 EXECUÇÃO FÍSICA DO PROJETO

Lembrando que antes de qualquer execução técnica de montagem principalmente a usinagem, deve-se utilizar EPI's (Equipamento de Proteção Individual) como Óculos de Proteção, Luvas, Sapatos com biqueira (aço para execução mecânica e PVC para execução elétrica) e Avental que são mencionados na Norma NR-6, publicada pelo Ministério do Trabalho e Emprego.

Para execuções mecânicas, foi realizada a usinagem do material acrílico (utilizando Serra com arco, serra tico-tico, furadeira, esquadro) até alcançar a forma compacta que atinge o objetivo do projeto tomando sempre o cuidado de não conter rebarbas cortantes, retirando-as com lima, e utilizando as medidas dimensionais dos componentes mencionados na metodologia, onde serão fixados em pontos estratégicosna estrutura final de acrílico, conforme Figura 4.1.

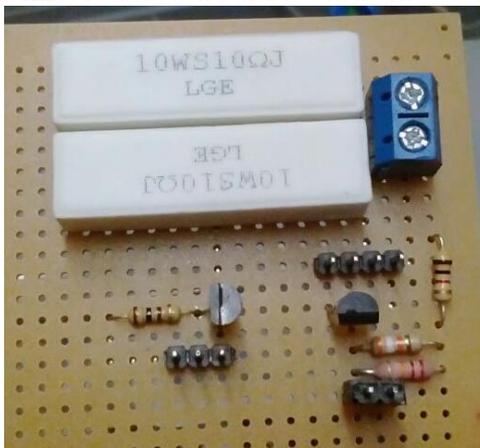
Figura 4.1– Estrutura em acrílico.



Fonte: Dos Autores (2016)

Para execuções elétricas, foram utilizados estanho e ferro de solda na confecção da placa eletrônica onde irá conter o “Circuito Sinal do Sensor” e o “Circuito Amplificador PWM” com conexões rápidas entre placa e componentes externos à placa, conforme Figura 4.2.

Figura 4.2– Placa Circuitos eletrônicos do projeto.



Fonte: Dos Autores (2016)

A montagem começa a partir da fixação dos componentes eletroeletrônicos do sistema, fixando a fonte e as placas eletrônicas na parte inferior traseira posicionada a fim de ter contato diretamente restrito, fixar a Ventoinha e a Hélice (junto com o sensor de rotação) nas extremidades do túnel, realizar fixação do botão seccionador de Liga/Desliga o KIT, fixar a Interface Relé e finalmente a colocação do CLP/IHM na abertura dimensionada para o equipamento, conforme Figura 4.3.

Figura 4.3– Fixação dos componentes.



Fonte: Dos Autores (2016)

Após montagem dos componentes na estrutura de acrílico o próximo passo é a ligação elétrica, considerando o componente com maior consumo de corrente elétrica (Ventoinha de corrente média de 0,53A) e um Fator de Segurança, será utilizado como padrão para os componentes pós Fonte (alimentados com 24Vcc) do projeto fios com Seção de 0,5mm² que suporta correntes máximas em média de 6 a 10A e para Tomada Vca que alimenta a Fonte será utilizado um cabo 3 x 1,5mm² suportando correntes máximas em média de 10 a 15A dependendo do material condutivo e fabricante.

Foram realizadas as ligações elétricas a seguir:

- Saída do “Circuito Sinal do Sensor” na entrada “I0” do CLP e a saída de sinal do sensor interligado na Entrada do “Circuito Sinal do Sensor”;
- Saída PWM “O0” do CLP para a entrada de sinal na Placa “Circuito Amplificador PWM” e plugado o conector da Ventoinha na Placa “Circuito Amplificador PWM”.
- Saída “O1” do CLP para a bobina da Interface Relé QE1R e sua saída interligada de contato “NA” interligada em série na alimentação da Ventoinha.
- Ligação elétrica da Alimentação +24Vcc de saída da Fonte para o Relé de Interface, CLP/IHM, “Circuito Sinal do Sensor” e “Circuito Amplificador PWM”.
- Ligação elétrica da referencia 0V (GND) de Alimentação da Fonte para o CLP/IHM, “Circuito Sinal do Sensor” e “Circuito Amplificador PWM”.
- Interligar o contato Terra do Plugue de Tomada para o terminal Terra da Fonte de Alimentação.
- Ligação em série da Fase do plugue de Tomada na entrada da Chave Seccionadora e saindo para entrada de Fase da Fonte e interligando o Neutro do Plugue diretamente na entrada de Neutro da Fonte.

Após toda a ligação elétrica do sistema foi executado todos os testes de sinais e alimentação para seu funcionamento efetivo (Figura 4.4) com o CLP plugado no Computador pela Porta de Comunicação RS232 – em estado Online – realizando testes de saídas e verificando o sinal de entrada junto com o Multímetro observando a presença de tensão de alimentação nos componentes do sistema.

Figura 4.4– Teste de Funcionamento.

Fonte: Dos Autores (2016)

Foi realizada a programação da linguagem Ladder pelo software “VisiLogic” que irá executar o algoritmo do projeto com Inter travamentos utilizando contatos NA, NF, entrada de sinal de frequência (pulsante), utilizando também blocos de programação para função de controle PID e para a função Auto Tune, Blocos Matemáticos de Divisão e Multiplicação, Blocos de armazenamento de dados, Blocos comparadores e Saídas lógicas. Após a programação Ladder pronta foi executado o projeto da Tela IHM também no “VisiLogic” com duas telas que é a Tela Principal (contendo “Liga PID”, “Liga Auto Tune”, “Próxima Tela” e inserção dos valores de “Set-Point”, “P”, “I” e “D”) e a Tela do Gráfico (contendo botão “Tela Principal”, “Habilita Gráfico”, Botão de avança ou recua visualização do tempo do Gráfico e o próprio Gráfico decorrente no domínio do tempo com os valores de Set-Point e o Valor de Realimentação do sistema ou Valor lido pelo sensor, conforme apresentados nos Apêndices A e B.

5 RESULTADO

5.1 Estudo de Controle

Para realização dos testes no sistema de controle primeiramente foi utilizado o método de Tentativa e Erro, conhecendo o efeito que é reproduzido na saída do sistema após alterar qualquer parâmetro do compensador PID como mencionado na Tabela 5.1, podemos obter mais precisão até mesmo em aplicações onde se necessita de uma sintonia com pouco tempo disponível para o procedimento.

Tabela 5.1– O efeito de cada parâmetro PID sobre o processo.

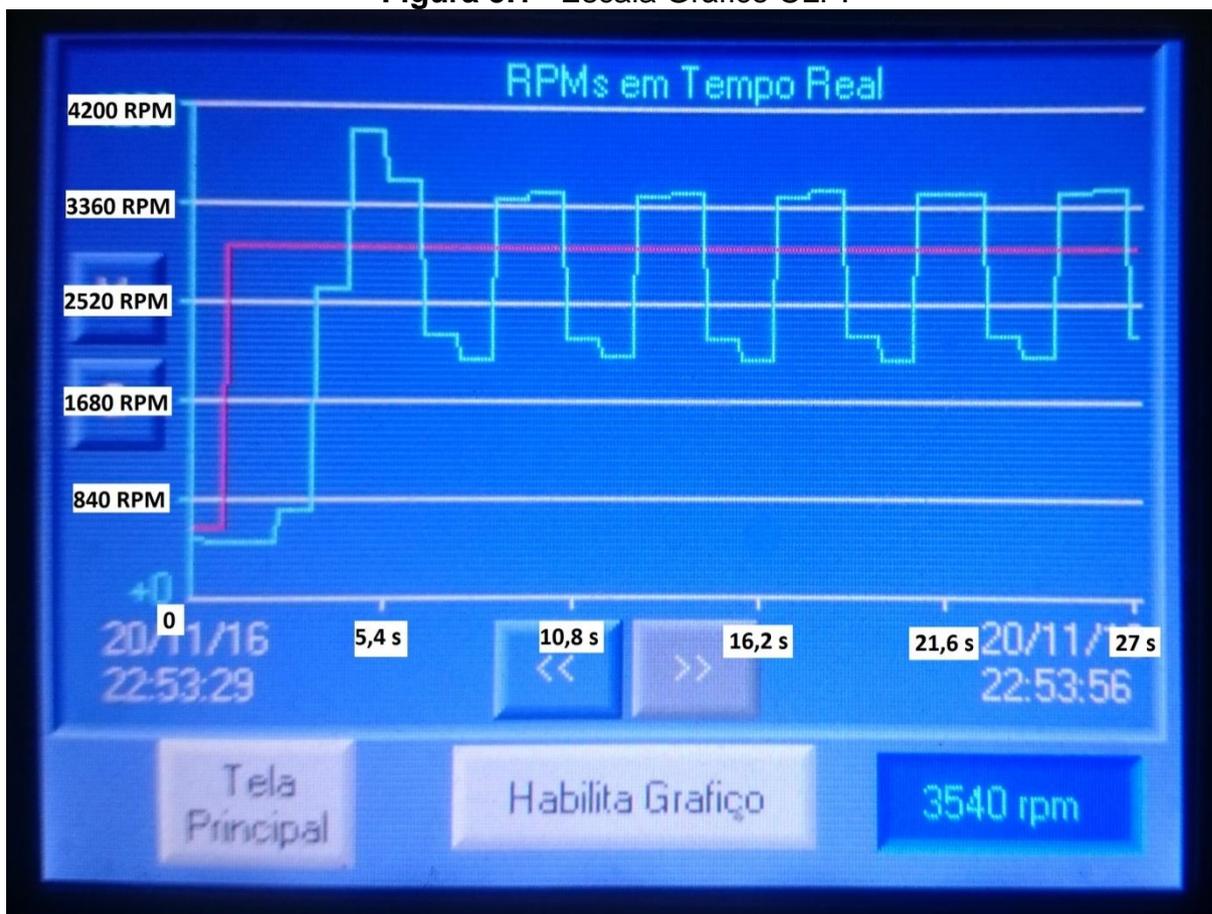
PARÂMETRO	AO AUMENTAR, O PROCESSO...	AO DIMINUIR, O PROCESSO...
P	Torna-se mais lento.	Torna-se mais rápido.
	Geralmente se torna mais estável ou menos oscilante.	Fica mais instável ou mais oscilante.
	Tem menos Overshot.	Tem mais Overshot.
I	Torna-se mais rápido, atingindo rapidamente o Set-Point.	Torna-se mais lento, demorando a atingir o Set-Point.
	Fica mais instável ou mais oscilante.	Fica mais estável ou menos oscilante.
	Tem mais Overshot.	Tem menos Overshot.
D	Torna-se mais lento.	Torna-se mais rápido.
	Tem menos Overshot.	Tem mais Overshot.

Fonte: NOVUS (2003)

A estratégia para os testes de Tentativa e Erro para sintonia do compensador, é feito aplicando três valores sequencialmente para cada parâmetro, o valor que melhor atender a resposta de saída é o valor adotado em cada parâmetro.

Para compreender o gráfico nas análises das respostas, tanto no eixo Tempo em segundos (eixo x) quanto no eixo Amplitude em RPM (eixo y) foram aplicado 5 divisões, sendo cada divisão equivalente a “5,4 segundos x 840 RPM” tendo assim um gráfico indicado com os ponto em cada divisão conforme Figura 5.1.

Figura 5.1– Escala Gráfico CLP.



Fonte: Dos Autores (2016)

Para início do levantamento da resposta de saída do sistema iremos começar aplicando valores de 1-0-0 no compensador PID e utilizando como referência ao Degrau Unitário para todo o processo de testes um Set-Point de 3000rpm conforme Figura 5.2, ou seja, vamos verificar a resposta de saída sem compensador sendo que o valor “1” no parâmetro P significa em multiplicar este valor pela Função de Transferência da Planta sendo assim mantendo somente a ação do sistema diretamente pela planta do sistema assim obtendo um gráfico Marginalmente Estável (M.E.) dando características a um Controle On-Off conforme a Figura 5.3.

Figura 5.2– Tela Liga Sistemas, Set-Point e PID.



Fonte: Dos Autores (2016)

Figura 5.3– Resposta do Sistema PID em 1-0-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

Prosseguindo com o método, foram aplicados os seguintes valores passo a passo para análise das respostas em cada parâmetro:

- PID = 1000-0-0; Sub Amortecido com Erro (Figura 5.4).

Figura 5.4– Resposta do Sistema PID em 1000-0-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 5000-0-0; Sub Amortecido com Erro Maior (Figura 5.5).

Figura 5.5– Resposta do Sistema PID em 5000-0-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-1-0; Sub Amortecido, T_s longo e sem Erro (Figura 5.6).

Figura 5.6– Resposta do Sistema PID em 1000-1-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-1000-0; Sub Amortecido, T_s curto e com Erro (Figura 5.7).

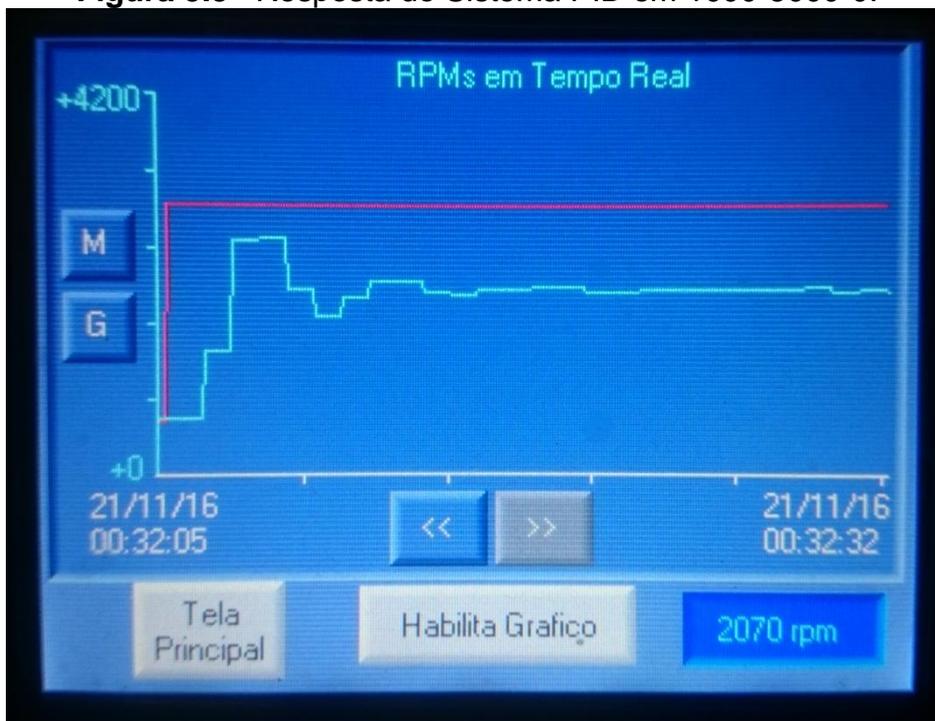
Figura 5.7– Resposta do Sistema PID em 1000-1000-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-5000-0; Sub Amort., T_s curto e com Erro Maior (Figura 5.8).

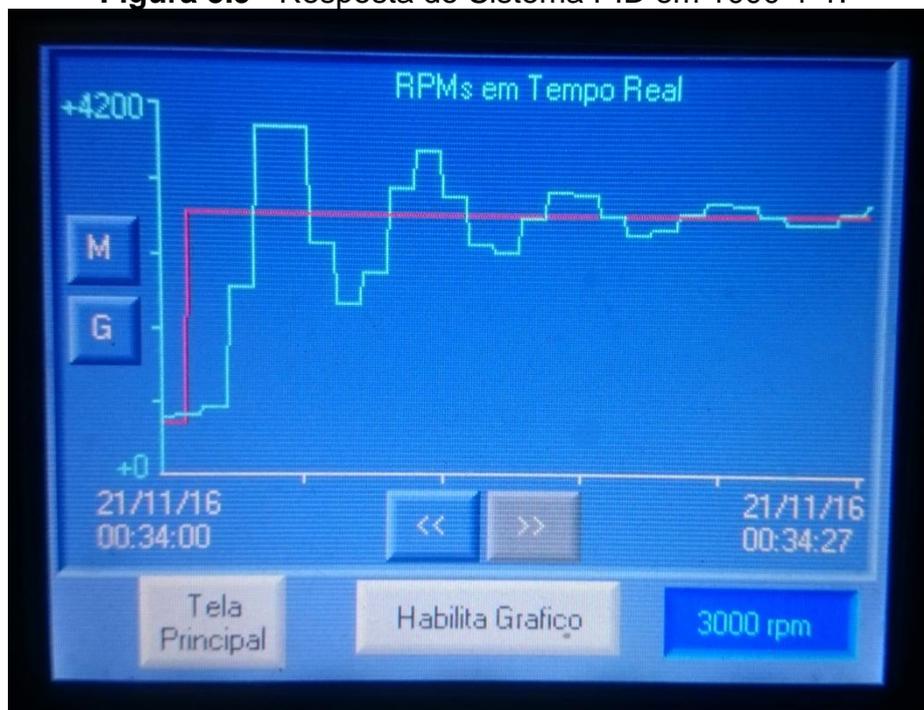
Figura 5.8– Resposta do Sistema PID em 1000-5000-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-1-1; Sub Amort., T_s longo, $SP\%$ alto e s/ Erro (Figura 5.9).

Figura 5.9– Resposta do Sistema PID em 1000-1-1.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-1-1000; Marg. Estável, $T_s = \infty$ e $SP\%$ mais alto (Figura 5.10).

Figura 5.10– Resposta do Sistema PID em 1000-1-1000.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-1-5000; Marg. Estável, $T_s = \infty$ e $SP\%$ alto (Figura 5.11).

Figura 5.11– Resposta do Sistema PID em 1000-1-5000.



Fonte: Dos Autores (2016)

Com as respostas de saídas levantadas e analisadas foi realizado o ajuste fino nos parâmetros para uma sintonização do compensador visando atingir uma melhor eficiência no sistema, realizando os com o mesmo passo a passo, porem não sendo necessário testar mais pelo menos três valores por parâmetros uma vez que possui um estudo sobre os valores de PID:

- PID = 1000-1-0; (Figura 5.12)

Figura 5.12– Resposta do Sistema PID em 1000-1-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-5-0; (Figura 5.13)

Figura 5.13– Resposta do Sistema PID em 1000-5-0.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-5-1; (Figura 5.14)

Figura 5.14– Resposta do Sistema PID em 1000-5-1.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 1000-5-3; (Figura 5.15)

Figura 5.15– Resposta do Sistema PID em 1000-5-3.



Fonte: Dos Autores (2016)

- PID = 800-5-3; (Figura 5.16)

Figura 5.16– Resposta do Sistema PID em 800-5-3.



Fonte: Dos Autores (2016)

Este é um método mais comum na área técnica industrial, onde se tem uma vantagem do sintonizador do sistema ter conhecimento do próprio sistema por prática na execução e a desvantagem é por levar mais tempo para finalização do procedimento na sintonização do compensador.

5.2 Método de Ziegler e Nichols

O primeiro método de Ziegler e Nichols não foi possível ser aplicado no sistema, pois como já estudado no sistema, sabe-se que no sistema sem compensador o mesmo apresenta Overshot, ou seja, a saída do sistema ultrapassa o valor aplicado com o Degrau Unitário e apresenta características de um sistema de Controle On-Off.

Para a aplicação do segundo método de Ziegler e Nichols, foi aplicado um parâmetro no PID sem o ganho P e com I tendendo ao infinito ($T_i = \infty$) jogando os valores “1-9999-0” no compensador (Figura 5.17).

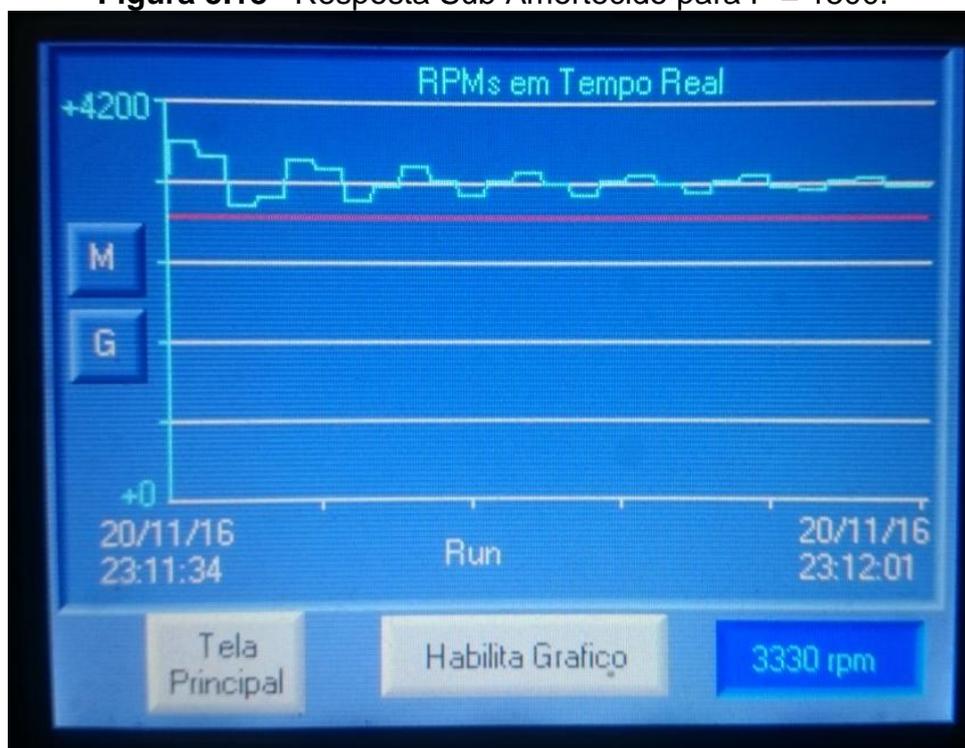
Figura 5.17– Valores Iniciais para segundo método.



Fonte: Dos Autores (2016)

Gradualmente foi acrescentados valores no ganho Paté o sistema sair da condição de Marginalmente Estável ($P \geq 1500$) conforme Figura 5.18.

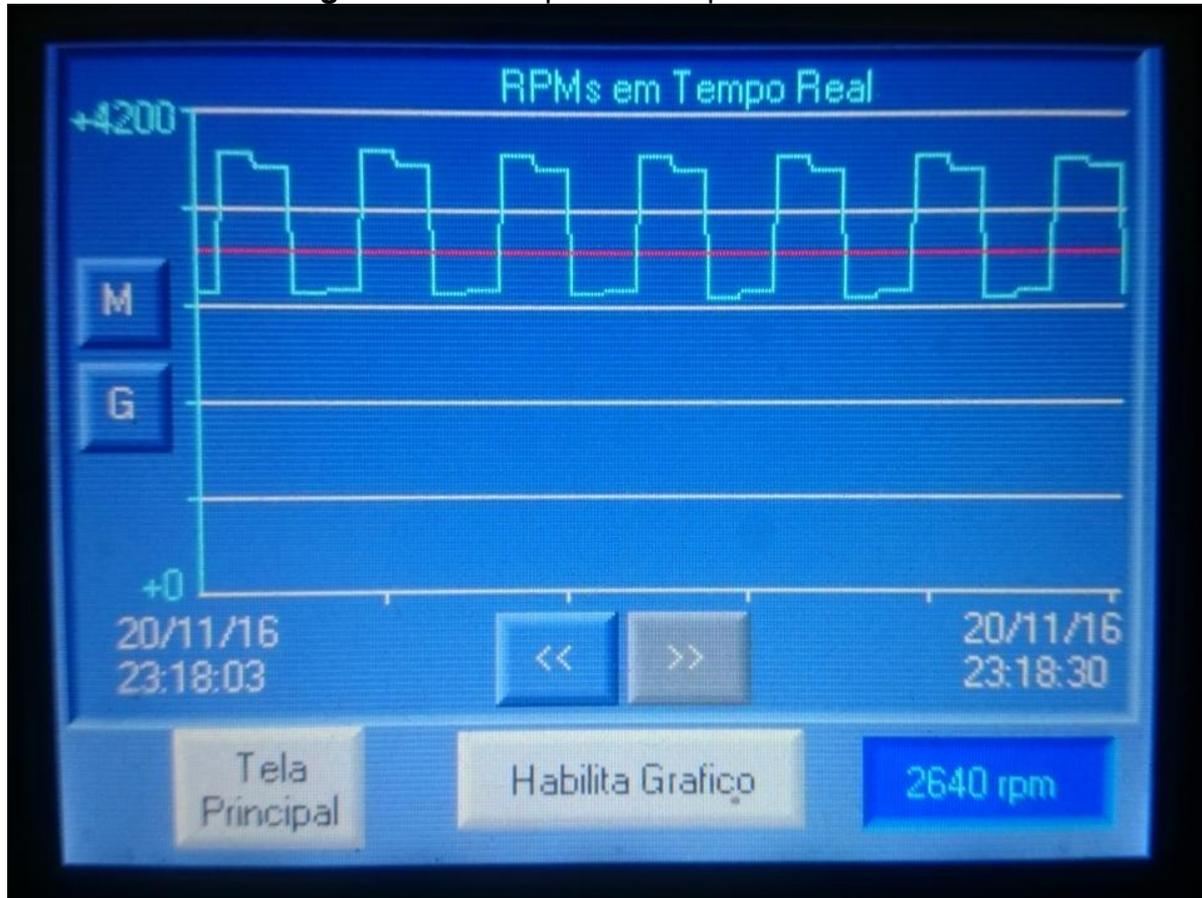
Figura 5.18– Resposta Sub Amortecido para $P = 1500$.



Fonte: Dos Autores (2016)

Executando ajuste fino com decrementos até retornar à resposta oscilante onde temos o valor de P atual representando o valor crítico sendo $K_{cr} = 1166$ e no gráfico oscilante foi extraído o valor $P_{cr} = 4s$ que representa o tempo de cada ciclo ou período de um pico até o próximo pico, conforme Figura 5.19.

Figura 5.19– Resposta M.E. para $P = 1166$.



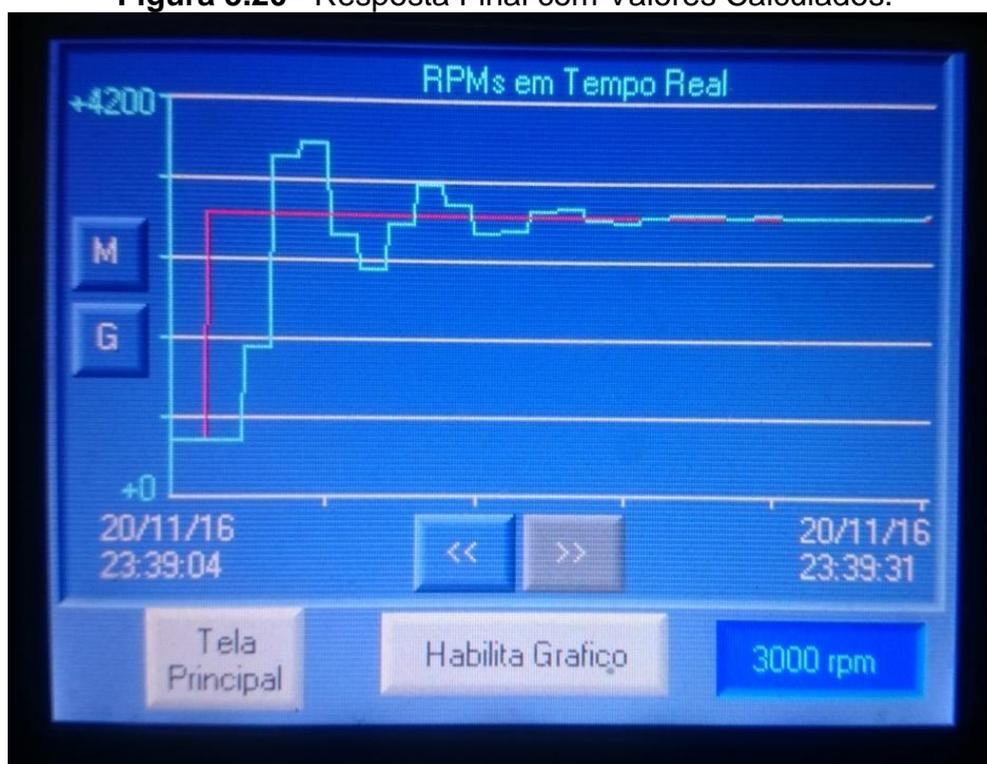
Fonte: Dos Autores (2016)

Utilizando a tabela para cálculo definida por Ziegler e Nichols pode-se obter os valores a seguir:

- $K_p = 0,6 \times K_{cr} = 0,6 \times 1166 = 700$
- $T_i = 0,5 \times P_{cr} = 0,5 \times 4 = 2$
- $T_d = 0,125 \times P_{cr} = 0,125 \times 4 = 0,5$ (1)

Com os valores calculados, os mesmos foram inseridos no compensador PID e obtendo a resposta conforme a Figura 5.20.

Figura 5.20– Resposta Final com Valores Calculados.



Fonte: Dos Autores (2016)

Como pode ser observado o método foi bem sucedido com um sistema Sub Amortecido com um Overshot de 25% (aproximadamente 3750 RPM) conforme citado por Ziegler e Nichols sobre o objetivo do método, sendo válidos ajustes extras caso a resposta não atender processos específicos.

5.3 Auto Tune

O processo de Auto Tune ou Auto Sintonizador é bem simples, rápido e eficaz, como a maioria dos equipamentos de controle hoje em dia se dispõe do recurso, o projeto deixa disponível a função para obter o conhecimento da ferramenta no sistema.

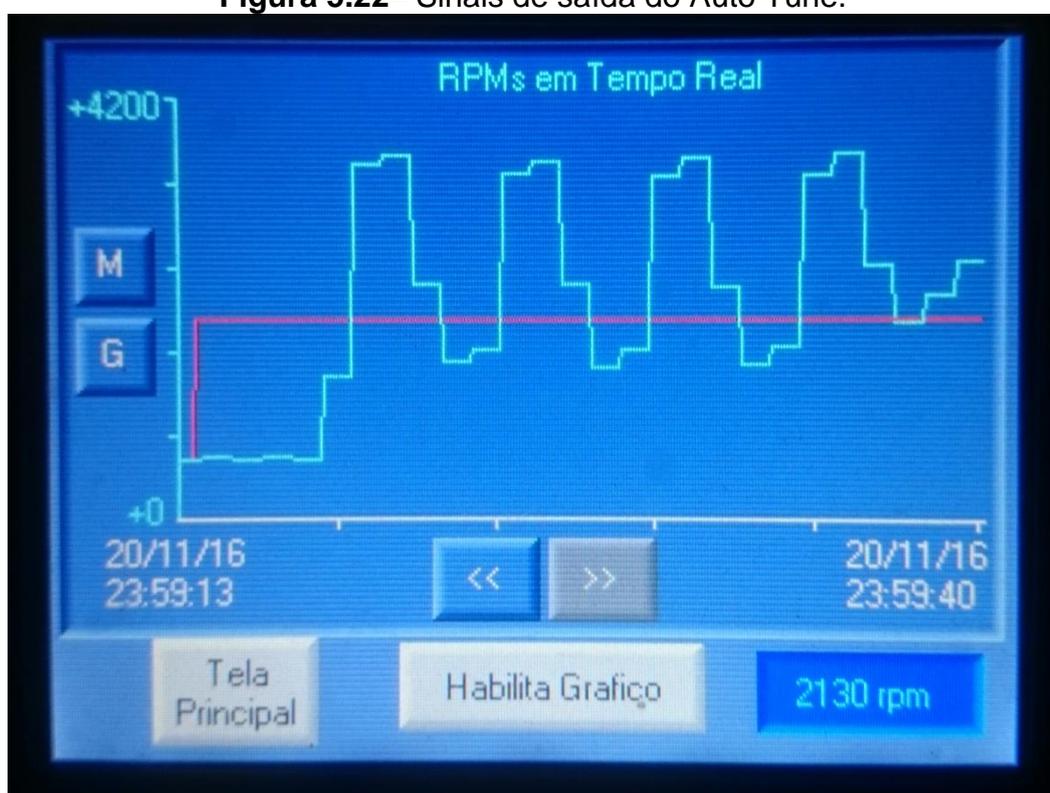
Pela tela inicial onde se encontra os comandos para habilitação das ferramentas, Set-Point e parâmetros do compensador, onde foi habilitada a opção “Liga Auto Tune” para o sistema jogar o Set-Point em 2000 RPM conforme na Figura 5.21, e jogando em sua saída sinais de Controle On-Off (Figura 5.22) para se obter automaticamente a características da planta e assim calcular os valores ideais de PID, conforme Figura 5.23.

Figura 5.21– Ligando Auto Tune.



Fonte: Dos Autores (2016)

Figura 5.22– Sinais de saída do Auto Tune.



Fonte: Dos Autores (2016)

Figura 5.23– Valores calculados pelo Auto Tune.



Fonte: Dos Autores (2016)

Com os valores obtidos no processo de Auto Tune foi ligado automaticamente o PID e gerado Resposta no sistema como Sub Amortecido com Overshot e Tempo de assentamentos moderados conforme Figura 5.24.

Figura 5.24– Resposta do PID calculado pelo Auto Tune.



Fonte: Dos Autores (2016)

Conforme os métodos anteriores, sendo válidos ajustes finos extras para a resposta atender o mais próximo possível ao objetivo do controle no processo aplicado.

5.4 Perturbação no sistema

Após os métodos de sintonização do compensador PID, foi realizado teste do sistema simulando uma perturbação pela porta de escape instalado no sistema onde se podem alterar as características da planta original em tempo real a fim de testar a compensação do sistema quando há algum tipo de perturbação de qualquer natureza.

Para a simulação ser realizada com mais detalhes, foi necessário aguardar a estabilização do sistema até o erro estacionário ficar igual a zero, com a estabilização o próximo passo foi abrir a porta de escape e observar a resposta na saída verificando a ação do sistema para compensar o valor da saída pelo compensador, conforme o registro na Figura 5.25.

Figura 5.25– Teste perturbação no sistema.



Fonte: Dos Autores (2016)

Teste realizado com sucesso e conforme observado, utilizando um dos parâmetros sintonizados nos métodos anteriores (parâmetro PID calculado pelo Auto Tune em 1000-5-2), a compensação funciona perfeitamente caso havendo perturbações nos sistemas de controle.

6 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

O projeto foi concluído conforme expectativas mencionadas no objetivo, apresentando seu ótimo funcionamento e resultados finais satisfatórios pelos métodos aplicados de Tentativa e Erro, Ziegler-Nichols e a Ferramenta de Auto Sintonizador. Com as experiências específicas absorvidas ao longo do projeto, é prática muito comum utilizada na indústria sendo possível aplicar métodos envolvidos no presente relatório para alcançar expectativas dentro da área de atuação dos integrantes composto ao grupo em projetos de Controle e Automação na Indústria.

Como proposta para continuidade deste projeto foi orientado para realização de um estudo ao projeto físico para Modelagem do sistema, sendo assim capaz de aplicar métodos matemáticos para sintonização mais precisa no compensador do sistema, utilizando ferramentas de cálculos transformando a função em Laplace pelo Lugar Geométrico das Raízes, Avanço-Atraso de Fase e Model Matching podendo alcançar um controle ótimo no sistema.

REFERÊNCIAS

FREGONEZE, GisleineBartolomei; TRIGUEIRO, Rodrigo de Menezes; RICIERI, Marilucia; BOTELHO, Joacy M. **Metodologia científica**. Londrina: Educacional, 2014.

HOLANDA, Aurélio Buarque. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 12. impressão. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1975.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 5. ed. - Editora Atlas, 2003.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Versão Traduzida - Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil, 1982.

STURM, Wilerson. **Sensores Industriais**.–Rio de Janeiro: Editora Papel Virtual, 2004.

NATALE, Ferdinando. **Automação Industrial**. 10. ed. - São Paulo: Editora Érica, 2009.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. – Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

PUGLIA, Luiz Vasco; DELATORE, Fábio; FILHO, J. Valter Gomes. **Controle Clássico**. Nota de aula de Controle Automático e Servo Mecanismo - São Paulo: 2013.

VISHAY SEMICONDUCTORS. **TCRT5000(L) -Reflective Optical Sensor with Transistor Output**, 2000.

ADDA CORPORATION. **AD8025GP SERIES**, 2008.

PHILIPS SEMICONDUCTORS. **BC548 – NPN general purpose transistors**, 1997.

UNITRONICS. **Samba™ OPLC™ Installation Guide**, 2014.

UNITRONICS. **SM35-J-T20 Technical Specifications**, 2014.

UNITRONICS. **VisiLogic – Getting Started V230-21-G23 Rev: 3:00**, 2014.

UNITRONICS. **VisiLogic: HMI Applications V230-21-G23 Rev: 3:00**,2014.

UNITRONICS. **VisiLogic: Ladder Programming V230-21-G23 Rev: 3:00**,2014.

MEAN WELL. **RS-35 series – 35W Single Output Switching Power Supply**, 2011.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-6 - Equipamento de Proteção Individual**. 2009.

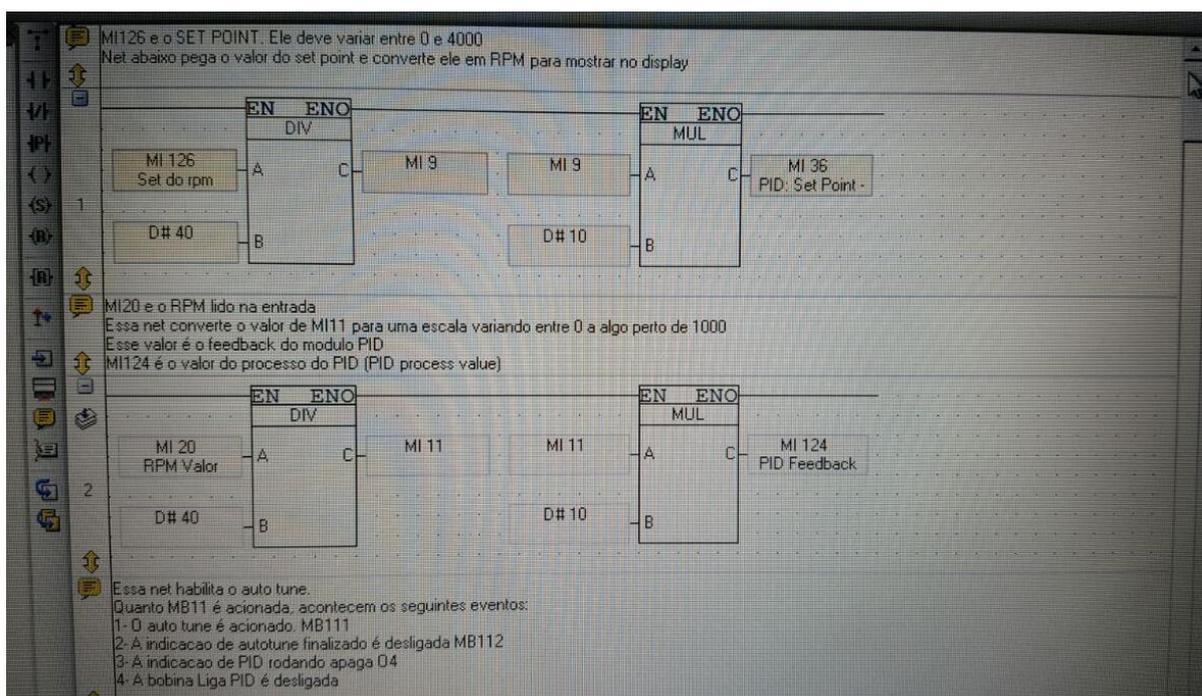
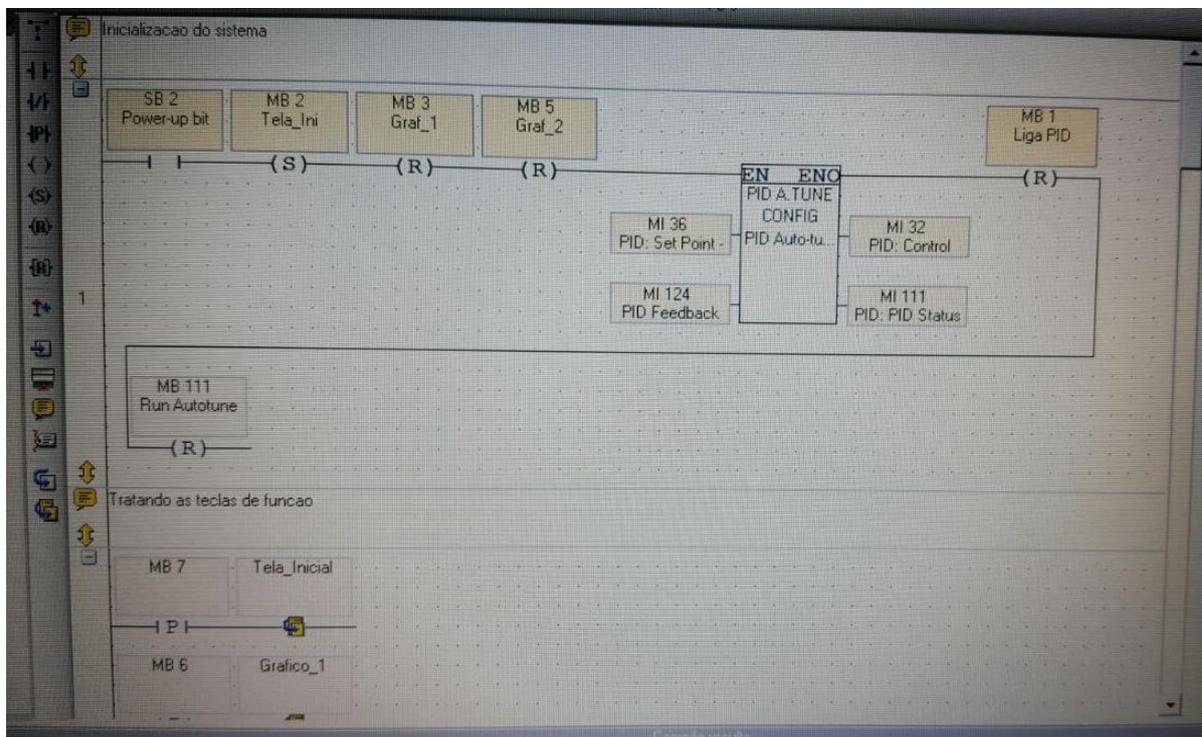
METALTEX. **Interface Relé Q**, 2016.

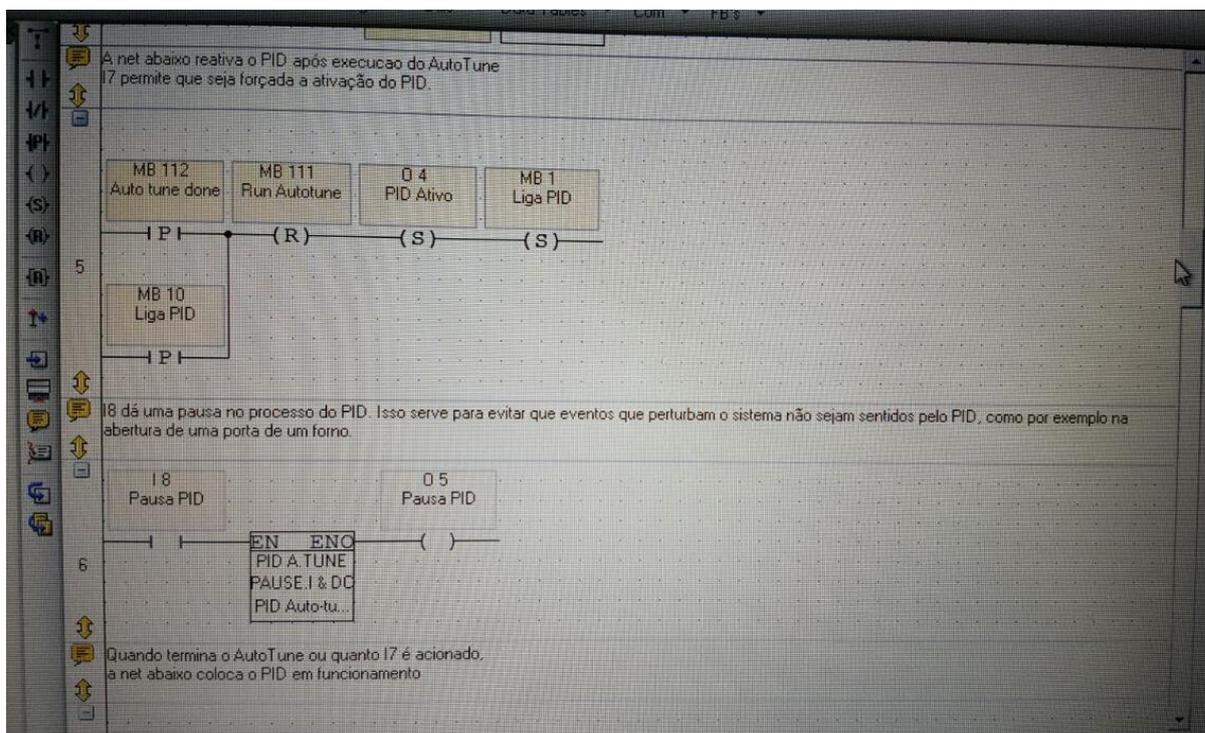
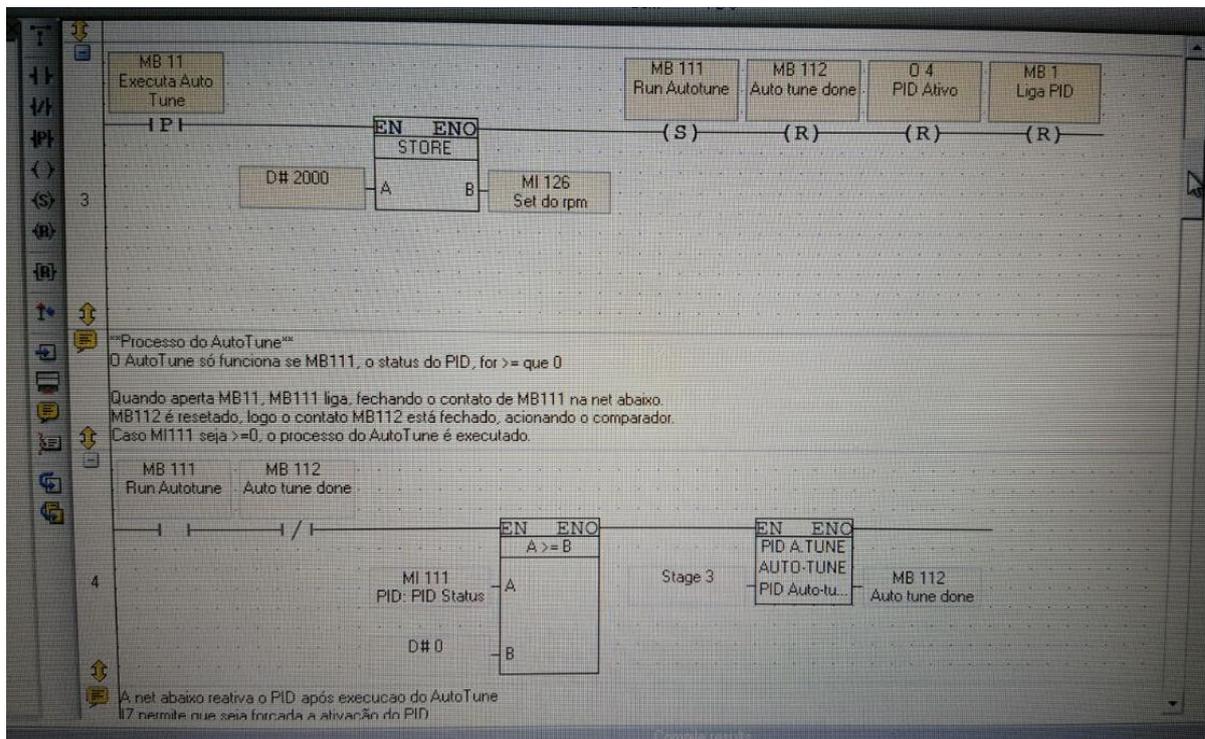
NOVUS. **Artigo Técnico – Introdução ao Controle PID**, 2003.

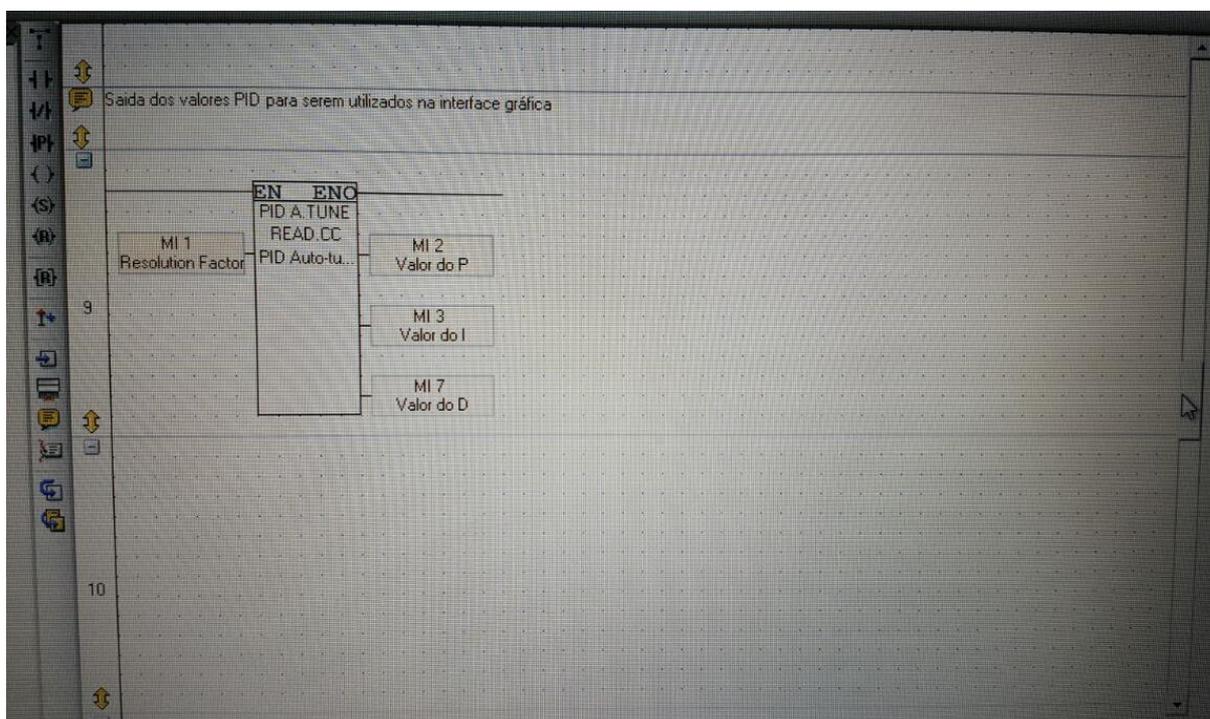
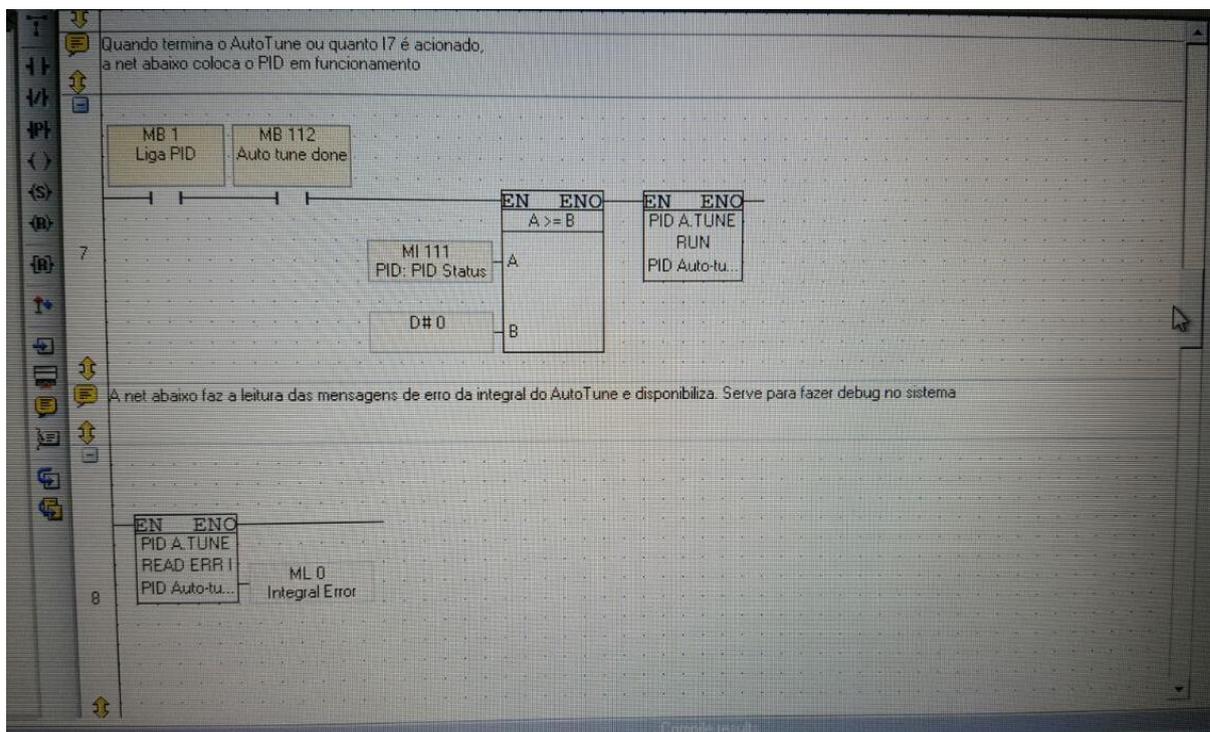
APÊNDICES

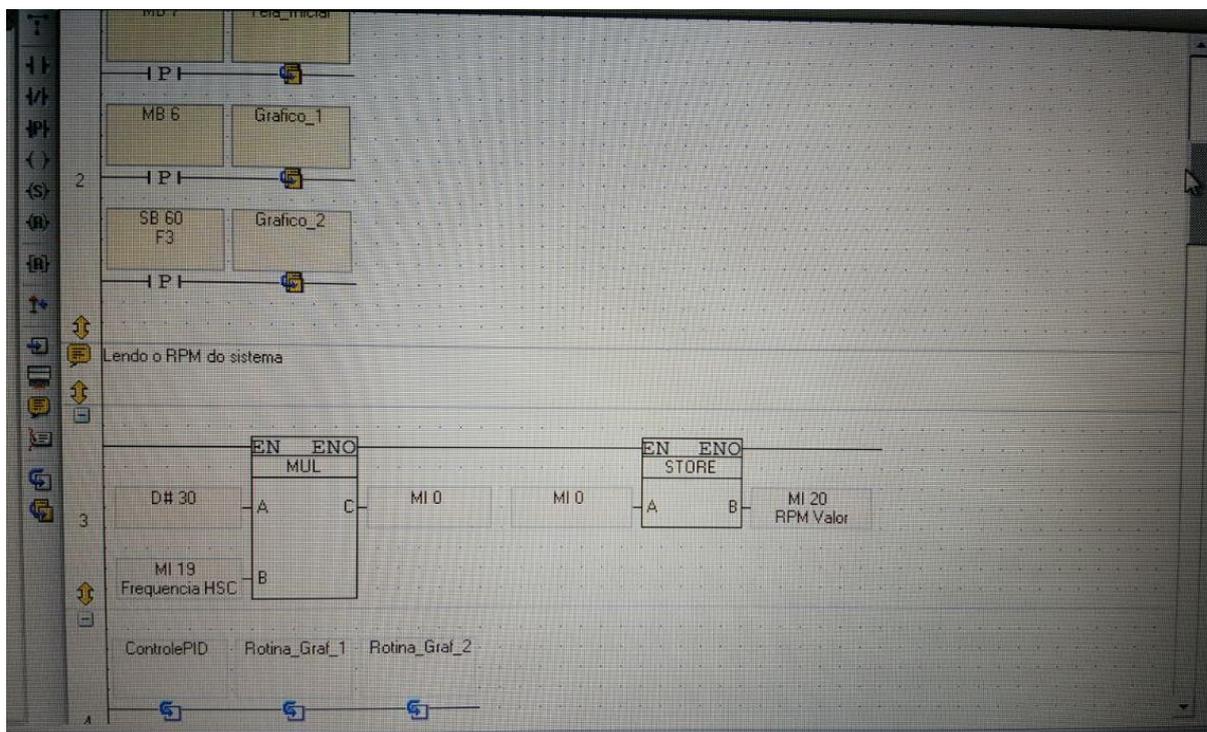
APÊNDICE A

Linguagem Ladder do projeto









APÊNDICE B
Projeto Tela IHM





ANEXOS

ANEXO A

Tabela de Transformada de Laplace

item	f(t)	F(s)
1	$\frac{du(t)^n}{dt^n}$	$s^n U(s)$
2	Impulso unitário $d(t)$	1
3	Degrau unitário = 1	$\frac{1}{s}$
4	t	$\frac{1}{s^2}$
5	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} p/ \quad n = 1, 2, 3, \dots$	$\frac{1}{s^n}$
6	$t^n \quad p/ \quad n = 1, 2, 3, \dots$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
7	e^{-at}	$\frac{1}{(s+a)}$
8	te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
9	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^n}$
10	$t^n e^{-at} \quad p/ \quad n = 1, 2, 3, \dots$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
11	$\text{sen } wt$	$\frac{w}{s^2 + w^2}$
12	$\text{cos } wt$	$\frac{s}{s^2 + w^2}$
13	$\text{senh } wt$	$\frac{w}{s^2 - w^2}$
14	$\text{cosh } wt$	$\frac{s}{s^2 - w^2}$
15	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)}$
16	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
17	$\frac{1}{b-a}(be^{-bt} - ae^{-at})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$

item	f(t)	F(s)
18	$\frac{1}{ab} \left[1 + \frac{1}{a-b} (be^{-at} - ae^{-bt}) \right]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
19	$\frac{1}{a^2} (1 - e^{-at} - at e^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)^2}$
20	$\frac{1}{a^2} (at - 1 - e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
21	$e^{-at} \operatorname{sen} wt$	$\frac{w}{(s+a)^2 + w^2}$
22	$e^{-at} \cos wt$	$\frac{(s+a)}{(s+a)^2 + w^2}$
23	$\frac{w_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta w_n t} \operatorname{sen} (w_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \quad p/ \quad 0 < \zeta < 1$	$\frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2}$
24	$-\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta w_n t} \operatorname{sen} (w_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \varphi) \quad p/ \quad \begin{cases} \varphi = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \\ 0 < \zeta < 1 \quad e \quad 0 < \varphi < \pi/2 \end{cases}$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2}$
25	$1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta w_n t} \operatorname{sen} (w_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \varphi) \quad p/ \quad \begin{cases} \varphi = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \\ 0 < \zeta < 1 \quad e \quad 0 < \varphi < \pi/2 \end{cases}$	$\frac{s}{s(s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2)}$
26	$1 - \cos wt$	$\frac{w^2}{s(s^2 + w^2)}$
27	$wt - \operatorname{sen} wt$	$\frac{w^2}{s^2(s^2 + w^2)}$
28	$\operatorname{sen} wt - wt \cos wt$	$\frac{2w^3}{(s^2 + w^2)^2}$
29	$\frac{1}{2w} t \operatorname{sen} wt$	$\frac{s}{(s^2 + w^2)^2}$
30	$t \cos wt$	$\frac{s^2 - w^2}{(s^2 + w^2)^2}$
31	$\frac{1}{w_2^2 - w_1^2} (\cos w_1 t - \cos w_2 t) \quad p/ \quad w_2^2 \neq w_1^2$	$\frac{s}{(s^2 + w_1^2)(s^2 + w_2^2)}$
32	$\frac{1}{2w} (\operatorname{sen} wt + wt \cos wt)$	$\frac{s^2}{(s^2 + w^2)^2}$
33	$\frac{M \angle \theta}{(s+a-bj)} + \frac{M \angle -\theta}{(s+a+bj)}$	$2M e^{-at} \cos (bt + \theta)$

ANEXO B

Ladder Elements and Functions List**Contacts**Direct Contact (NO) Inverted Contact (NC) Positive Transition (Rise) Negative Transition (Fall) 

Immediate: Read Physical Input

Immediate: Update High-speed Input

CoilsDirect Coil Inverted (negated) Coil Set Coil Reset Coil Toggle Coil 

Immediate: Write to Output

CompareGreater Than Greater/Equal Equal Not Equal Less/Equal Less Than 

Within Range

MathAdd Subtract Multiply Divide 

Modulo	
Linearization, vector	
Factor	
Power	
Square Root	
Increment/Decrement	

Floats

Basic: Store Direct, Add, Sub, Mul, Div, Abs

Extended: Square Root, Power, Exp, LN, Log10, A Mul (10^B)

Trig: Sin, Cos, Tan, ArcSin, ArcCos, ArcTan, Degrees, Radians

Compare: Greater Than, Greater Equal, Equal, Not Equal, Less Equal, Less Than

Convert: $A+B/n$, $INV (A+B/n)$

Logic

AND	
OR	
XOR	
Shift Left/Right	 
Rotate Left/Right	 
Bit Set/Reset	 
Bit Test	
RS-SR Flip-Flop	
RLO to Bit	

Clock

Time	
Day Of Week	
Day Of Month	
Month	
Year	

UTC (Universal Time) functions

Vector

Load	
Load Timer Bit Value	
Store	
Find	
Fill / Fill Offset	
Copy / Copy Offset	
Compare / Compare Offset	
Bit to Numeric, Numeric to Bit	 
Get Max	
Get Min	
Vector: Copy Memory	
Shift Byte Left	
Calls	
Jump to Label	
Load HMI Display	
HMI Display Loaded	
Load Last HMI Display	
Call Subroutine	
Subroutine Return	