

ALESSANDRO BARBOSA SHIRAHIGE

METODOLOGIA PARA AFERIÇÃO DA AÇÃO DE CONTROLE  
PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVA IMPLEMENTADA EM  
CONTROLADORES INDUSTRIAIS

SÃO PAULO  
2007

ALESSANDRO BARBOSA SHIRAHIGE

METODOLOGIA PARA AFERIÇÃO DA AÇÃO DE CONTROLE  
PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVA IMPLEMENTADA EM  
CONTROLADORES INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo como requisito de parcial para  
obtenção de título de Mestre em  
Engenharia

Área de Concentração:  
Sistemas de Potência

Orientador:  
Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira

SÃO PAULO  
2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Shirahige, Alessandro Barbosa**

**Metodologia para aferição da ação de controle proporcional integral derivativa implementada em controladores industriais / A.B. Shirahige. -- São Paulo, 2007.**

**117 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.**

**1. Controle automático I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.**

## AGRADECIMENTO

À Sra. Luzia do Carmo Namiki, secretária do GAESI, pela ajuda nesta Etapa de conclusão do mestrado

Ao Departamento de Suporte Técnico Telefônico da Rockwell Automation do Brasil, em especial a Wheeler Sanchez e Marcos Oliveira Sá, pelos esclarecimentos técnicos.

Ao convênio EPUSP e Rockwell Automation do Brasil que me concederam condições e recursos para realizar este trabalho de pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas (PEA) da EPUSP por fornecer o laboratório para realização dos experimentos e testes do trabalho.

Ao Prof. Dr. Cícero Couto de Moraes pelo apoio e incentivo neste período de trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Eng. Raul Victor Groszmann pela incentivo e compreensão neste período de trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira, pelo apoio, confiança e pela sua dedicada orientação.

Aos meus familiares, meus avós, Tacino, Alice, Kenichi (em memória) e Tetsu (em memória), meu irmão Flávio, vulgo Fidélis, a minha mãe, Aparecida e Karin Keunecke, pelo apoio e a paciência neste período de trabalho de pesquisa.

Em especial ao meu pai, Takashi que desde minha infância me ensinou os caminhos do estudo e da dedicação.

## RESUMO

Uma das atribuições da engenharia de automação é o desenvolvimento de solução de automação e controle de processos contínuos industriais. Para tanto, a principal ferramenta empregada para este controle é a ação de controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Nas últimas décadas diversas empresas fabricantes de equipamentos de automação industrial têm desenvolvido e aprimorado seus controladores industriais. Estes, além de realizarem o controle de processo por lógica de intertravamento, também possuem a ação de controle PID com a finalidade de executar o controle de processo contínuo como controle de velocidade, controle de pressão, controle de nível, etc.

Porém, devido a grande variedade de controladores industriais por consequência, a grande variedade de implementações de instrução PID, implica, muitas vezes, em falta de padronização da programação e operação do algoritmo da equação PID implementados nos mais diversos controladores industriais. Tal fato, dificulta a engenharia de automação industrial em desenvolver controle de processos contínuos através de instruções PID.

Este trabalho de pesquisa aborda o desenvolvimento de metodologia "MAFPID" como ferramenta de engenharia de automação para aferir o funcionamento da instrução de controle PID implementada em equipamentos de controle e automação. Esta metodologia é constituída de três Etapas de testes. A primeira Etapa constitui o estudo do equipamento testado a partir das documentações fornecidas pelo fabricante. A segunda Etapa constitui de teste dos parâmetros proporcional, integral e derivativo, realizados no controlador industrial isolado de qualquer processo. A terceira Etapa constitui de teste do controlador interagindo com um circuito analógico. Este circuito simula o comportamento de alguns processos industriais, fornecendo ao controlador aferido sinais de entradas e de saída semelhantes aos processos reais. Este trabalho também apresenta dois estudos de caso, nos quais foi aplicada a metodologia MAFPID.

Palavras-chave: Automação Industrial. Controladores Industriais. PID.

## ABSTRACT

One of attributions of the automation engineering is the development of automation solution and control of industrial continuous processes. For in such a way, the main tool uses for this control is the action of Proportional-Integral-Derivative control (PID).

In the last diverse decades companies equipment manufacturers of industrial automation have developed and improved its industrial controllers. These, besides carrying through the control of process for interlocking logic, also possess the action of control PID with the purpose to execute the control of continuous process as control of speed, control of pressure, control of level, etc.

However, due to great variety of industrial controllers for consequence, the great variety of implementations instruction PID, it implies in lack standardization of the programming and operation of the algorithm of equation PID implemented in the most diverse industrial controllers. Such fact, it makes difficult the engineering of industrial automation in developing control of continuous processes through instructions PID.

This work of research approaches the development of methodology MAFPID as tool of engineering of automation to survey the functioning of the instruction of control PID implemented in control equipment and automation. This methodology is constituted of three stages of tests. The first stage constitutes the study of the equipment tested from the documentations supplied for the manufacturer. The second stage constitutes of test of the parameters proportional, integral and derivative, carried through in the isolated industrial controller of any process. The third stage constitutes of test of the controller interacting with an analogical circuit. This circuit simulates the behavior of some industrial processes, supplying signals of input and output to the surveyed controller of similar to the real processes. This work also presents two studies of case, in which was applied methodology MAFPID.

Key-words: Industrial Automation. Industrials Controllers. PID.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama da localização do trabalho de pesquisa em relação a área do conhecimento. ....	3
Figura 2 - Classificação de sistemas modificada a partir de Cassandras (1993).....	6
Figura 3 - Sistema de controle em malha fechada .....	11
Figura 4 - Controle liga e desliga .....	12
Figura 5 - Diagrama da ação de controle PID.....	13
Figura 6 - Controle de nível de um tanque.....	14
Figura 7 - Ação de controle em função do sinal de erro gerada pelo controlador.....	17
Figura 8 - Gráfico ilustrativo da resposta do termo integral no sistema. ....	19
Figura 9 - Gráfico ilustrativo da resposta do termo derivativo no sistema.....	20
Figura 10 - Diagrama da ação de controle utilizando <i>Fuzzy</i> como controlador. ....	22
Figura 11 - Diagrama da ação de controle utilizando <i>Fuzzy</i> como supervisor.....	22
Figura 12 - Conversão analógica - digital. ....	24
Figura 13 - Conversão digital - analógica .....	24
Figura 14 - Diagrama de execução das operações de conversão A/D e D/A.....	25
Figura 15 - Exemplo de <i>Single-loop</i> .....	27
Figura 16 - Exemplo de CLP <sup>®</sup> .....	29
Figura 17 - Linguagem de programação de <i>Ladder</i> .....	31
Figura 18 - Principais partes do CLP <sup>®</sup> .....	32
Figura 19 - Linguagem de Programação de SDCD Function Block.....	35
Figura 20 - Arquitetura SDCD.....	36
Figura 21 - Arquitetura do PCU. ....	37
Figura 22 - Diagrama da metodologia MAFPID .....	47
Figura 23 - Fluxograma simplificado da MAFPID. ....	47
Figura 24 - Diagrama do teste do parâmetro proporcional ( $K_P$ ).....	51
Figura 25 - Resposta esperada no teste do parâmetro $K_P$ .....	51
Figura 26 - Diagrama do teste do parâmetro integrativo ( $T_i$ ). ....	52
Figura 27 - Resposta esperada no teste do parâmetro $T_i$ .....	53
Figura 28 - Diagrama do teste do parâmetro derivativa ( $T_d$ ). ....	54
Figura 29 - Resposta esperada no teste do parâmetro $T_D$ .....	54
Figura 30 - Ação do filtro passa-baixo na saída da instrução PID. ....	55

Figura 31 - Configuração para cada bloco do circuito do simulador analógico.....	56
Figura 32 - Diagrama de blocos do sistema amortecido.....	57
Figura 33 - Diagrama de blocos do sistema sub-mortecido.....	57
Figura 34 - Diagrama de blocos do sistema oscilatório. ....	58
Figura 35 - Esquema do simulador analógico construído.....	59
Figura 36 - Simulador analógico montado. ....	59
Figura 37 - Gráfico de Resposta em Degrau do Simulador Analógico para o Sistema Amortecido. ....	60
Figura 38 - Gráfico de Resposta em Degrau do Simulador Analógico para o Sistema Sub-amortecido.....	61
Figura 39 - Diagrama do arranjo experimental. ....	62
Figura 40 -Resposta esperada da instrução PID na Etapa 3.....	63
Figura 41 - Fluxograma completo da MAFPID.....	65
Figura 42 - Continuação do Fluxograma completo do MAFPID.....	66
Figura 43 - Resposta da instrução PID para o parâmetro proporcional.....	70
Figura 44 - Resposta da instrução PID para o parâmetro integral.....	70
Figura 45 - Resposta da instrução PID para o parâmetro derivativo. ....	71
Figura 46 - Saída CLP <sup>®</sup> no cartão analógico quando executado o teste do parâmetro derivativo. ....	72
Figura 47 - Efeito do cálculo da derivada para entrada com conjunto de degraus. ....	73
Figura 48 - Resposta da instrução PID para o parâmetro derivativo, após modificação na entrada da instrução.....	73
Figura 49 - Resultado do teste de linearidade do cartão analógico. ....	74
Figura 50 - Resultado da Etapa 3 utilizando o Simulador Analógico. ....	75
Figura 51 - Resposta da instrução PID para o parâmetro proporcional.....	78
Figura 52 - Resposta da instrução PID para o parâmetro integral.....	79
Figura 53 - Resposta da instrução PID para o parâmetro derivativo. ....	79
Figura 54 - Resultado do teste de linearidade do cartão analógico. ....	80
Figura 55 - Teste com simulador analógico - Resposta a Degrau do Sistema Amortecido .....	81
Figura 56 - Características da resposta ao salto do processo relevantes para o ajuste de Ziegler-Nichols.....	85





## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Controle liga e desliga (OGATA 1995) .....	12
Equação 2 - Equação PID segundo OGATA. ....	15
Equação 3 - Equação PID padrão ISA (ANSI/ISA51.1-1979).....	15
Equação 4 - Equação PID proveniente dos controladores pneumáticos. ....	16
Equação 5 - Parcela Proporcional da equação PID.....	16
Equação 6 - Relação entre $K_p$ e banda proporcional percentual. ....	17
Equação 7 - Parcela Integral da equação PID.....	18
Equação 8 - Parcela Derivativa da equação PID.....	19
Equação 9 - Equação PID em tempo discreto segundo OGATA.....	25
Equação 10 - Parcela Derivativa com filtro passa-baixo da equação PID. ....	43
Equação 11 - Relação da tensão de entrada e tensão de saída em um circuito AMP-OP. .....	56
Equação 12 - Função de transferência do sistema amortecido de 2° ordem: .....	57
Equação 13 - Função de transferência do sistema sub-amortecido de 2° ordem.....	57
Equação 14 - Função de transferência do sistema oscilatório de 3° ordem. ....	58
Equação 15 - Equação PID utilizada pelo SLC-500. ....	68
Equação 16 - Primeiro modo de operação da instrução PID utilizada pelo ControlLogix®.	77
Equação 17 - Segundo modo de operação da instrução PID utilizada pelo ControlLogix®. .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros PID calculados. ....	62
Tabela 2 - Dados do SLC-500 <sup>®</sup> fornecidos pelo fabricante.....	68
Tabela 3 - Dados do ControlLogix <sup>®</sup> fornecidos pelo fabricante.....	76
Tabela 4 - Tabela de Ziegler e Nichols pelo Método da Resposta ao Salto. ....	86
Tabela 5 - Tabela sumário de ajuste manual de parâmetros PID.....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\tau_A$	Período de amostragem do conversor A/D
$\tau_H$	Período de atualização do conversor D/A
$\tau$	Período de varredura do controlador industrial
A/D	Conversão Analógica - Digital
CLP <sup>®</sup>	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
CV	Variável Controlada
D/A	Conversão Digital - Analógica
I/O	Entrada / Saída
IHM	Interface Homem-Máquina
ISA	The Instrumentation Systems and Automation Society
$K_P$	Parâmetro Proporcional da instrução PID
MAFPID	Metodologia de Aferição da Função PID
MES	Manufacturing Execution Systems
MIMO	Sistema de múltipla entrada e múltipla saída ( <i>Multi Input, Multi Output</i> )
PCU	Unidade de Controle de Processo ( <i>Process Control Unit</i> )
PID	Controle Proporcional - Integral - Derivativo
PI	Controle Proporcional - Integral
PV	Variável de Processo
$s$	Variável complexa de Laplace ( $s = \sigma + j\omega$ )
S88	Norma da ISA referente ao controle de processo a batelada
SCADA	Sistema de Controle, Supervisório e Aquisição de Dados ( <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> )
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SISO	Sistema de uma entrada e uma saída ( <i>Single Input, Single Output</i> )
SP	Valor de referência ( <i>Set Point</i> )
$T_d$	Parâmetro Derivativo da instrução PID
$T_i$	Parâmetro Integral da instrução PID

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO DE PESQUISA.....	3
1.2	OBJETIVO.....	4
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA .....	4
2.	CONCEITOS GERAIS DA TEORIA DE SISTEMAS E DE CONTROLE.....	6
2.1	CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS .....	6
2.1.1	Classificação dos Processos Industriais a partir da Classificação de Sistemas.....	8
2.2	CONCEITOS DA TEORIA DO CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS ....	10
2.2.1	Sistema de Controle Dinâmico .....	10
2.2.2	Sistema de controle em malha aberta e em malha fechada.....	11
2.2.3	Ações de Controle .....	11
2.2.3.1	Controle liga e desliga .....	12
2.2.3.2	Controle PID .....	13
2.2.3.3	Controle por Lógica <i>Fuzzy</i> ou <i>Nebulosa</i> .....	21
2.2.3.4	Controle Avançado .....	23
2.3	ALGORITMO PID DIGITAL .....	23
2.4	PRINCIPAIS CONTROLADORES INDUSTRIAIS .....	26
2.4.1	Controladores Isolados de Malha - Single-Loop e Multi-Loop .....	26
2.4.2	Controladores Lógicos Programáveis - CLP <sup>®</sup> .....	28
2.4.2.1	Arquitetura do CLP <sup>®</sup> .....	31
2.4.2.2	Funcionalidade do CLP <sup>®</sup> .....	33
2.4.3	Sistema Digital de Controle Distribuído - SDCD.....	34
2.4.3.1	Arquitetura do SDCD .....	35
2.4.3.2	Funcionalidade do SDCD <sup>®</sup> .....	38
2.4.4	Convergência das Tecnologias de Automação Industrial.....	38
2.5	INSTRUÇÕES PID EM CONTROLADORES COMERCIAIS .....	39
2.5.1	Transição Manual-Automático .....	39

2.5.2	Normalização das Variáveis .....	40
2.5.3	Integração Excessiva em Caso de Saturação .....	41
2.5.4	Limitações da Ação Derivativa .....	42
2.5.5	Implementações Digitais em Controladores .....	43
3.	<b>METODOLOGIA “MAFPID” .....</b>	<b>45</b>
3.1	ETAPA 1 - DOCUMENTAÇÃO E REFERÊNCIAS .....	48
3.2	ETAPA 2 - TESTE DO CONTROLADOR ISOLADO .....	50
3.3	ETAPA 3 - TESTE DE AFERIÇÃO COM SIMULADOR ANALÓGICO .....	55
3.3.1	Simulador Analógico.....	56
3.3.2	Descrição da Etapa 3 - Teste de Aferição com Simulador Analógico.....	61
3.4	CONCLUSÕES APÓS APLICAÇÃO DA MAFPID .....	64
4.	<b>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA “MAFPID” EM CONTROLADORES INDUSTRIAIS COMERCIAIS .....</b>	<b>67</b>
4.1	ESTUDO DE CASO I .....	67
4.1.1	Etapa 1 - Documentação e Referências .....	67
4.1.2	Etapa 2 - Teste do Controlador Isolado .....	69
4.1.3	Etapa 3 - Teste de Aferição com Simulador Analógico .....	74
4.1.4	Conclusão .....	75
4.2	ESTUDO DE CASO II .....	76
4.2.1	Etapa 1 - - Documentação e Referências.....	76
4.2.2	Etapa 2 - Teste do Controlador Isolado .....	78
4.2.3	Etapa 3 .....	80
4.2.4	Conclusão .....	81
5.	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	83
6.	<b>ANEXO A - MÉTODOS DE ZIEGLER-NICHOLS.....</b>	<b>84</b>
6.1	MÉTODO DA RESPOSTA AO SALTO .....	85
6.2	TÉCNICAS DE AJUSTE MANUAL DE PID .....	87
7.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A economia do mundo moderno anseia por produtividade e eficiência nos modos de produção, sejam eles processos de produção agrícola, comercial, industrial ou de serviços. Este processo é facilmente notado no decorrer da história na qual as últimas décadas as empresas têm perseguido exaustivamente a melhoria dos índices de produtividade e de qualidade, etc.

Em sua maioria, a evolução nos meios produtivos está atrelada a inovações tecnológicas, sejam elas a simples utilização de equipamentos mais modernos, ou até mesmo o emprego de novas técnicas de produção (DUARTE, 1999).

Nas últimas décadas pode-se observar que cada vez mais a implementação de novas máquinas e computadores afetaram significativamente todos processos produtivos, principalmente nos meios industriais. Em meados do século passado, este fato é comprovado a partir do início da utilização de máquinas eletrônicas e computadores nos processos de controle e automação dos processos industriais (MIYAGI, 1996). O principal objetivo em utilizar estes dispositivos para controle e automação industrial é otimizar a produção a partir de maior produtividade e flexibilidade dos sistemas. Estas máquinas eletrônicas e computadores dedicados para o controle e automação industrial são denominados controladores industriais.

Inicialmente surgiram dois tipos de controladores industriais, o Controlador Lógico Programável (CLP<sup>®</sup>) dedicado à automação das indústrias de manufatura e o Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) dedicado para a automação da indústria de processo contínuo.

O CLP<sup>®</sup>, a princípio, era destinado para substituir painéis de controle eletromecânico. Estes painéis eram compostos basicamente de relé e contadores. Portanto o mesmo deveria ser capaz de executar programas de lógica combinacional em álgebra Booleana com a finalidade de realizar intertravamentos de eventos em processos industriais.

O SDCD foi concebido para realizar controle e automação de processos contínuos, cuja característica principal é possuir muitas malhas de controle e predominância de variáveis contínuas. Portanto o mesmo deveria ser capaz de executar

diversas malhas de controle ao mesmo tempo. Porém, o custo dos SDCDs era mais elevado em relação aos CLP<sup>®</sup>.

Entretanto, a evolução tecnológica resultou na convergência destas tecnologias, atualmente os CLP<sup>®</sup> realizam funções de controle de malha antes dedicados aos SDCDs e, por outro lado, os SDCDs tiveram seu custo reduzido. E por isso, dependendo da aplicação, o custo do SDCD se compara ao custo do CLP<sup>®</sup>.

Dentro deste cenário, o engenheiro de automação necessita de um profundo conhecimento dos equipamentos de automação que abrange desde as configurações básicas até o funcionamento das instruções mais complexas como controle de malha. A absorção deste conhecimento é dificultada pelo fato de que atualmente existem inúmeros fabricantes de equipamentos de automação industrial e, ainda cada fabricante, ou até mesmo modelo de controladores industriais, apresenta modo de operação e configuração das instruções de controle diferentes. Este fator é preponderante para o sucesso da implementação da automação industrial, já que o bom funcionamento das instruções de controle inicia-se pela configuração correta destas.

Uma das instruções de controle mais utilizada na automação industrial é a ação de controle de malha Proporcional Integral Derivativa (PID). Esta ação de controle está presente em todo processo de automação que necessita controle de malha, e necessita de um ajuste de parâmetros para que a mesma funcione de forma adequada.

Existem inúmeras técnicas de ajuste de parâmetros PID (OGATA, 1995) (ZIEGLER NICHOLS, 1942), que vão desde técnicas mais sofisticadas de ajuste, como análise de diagrama de estabilidade, até técnicas empíricas, como técnica de resposta a salto de Ziegler-Nichols. Porém, não é difícil detectar plantas industriais operando instruções PID em modo manual, ou seja, o controlador industrial não atua no processo conforme a instrução PID, e sim a atuação no processo é realizada pelo operador do sistema manualmente. Este problema pode acarretar em muitas consequências indesejadas a indústria, por exemplo, obtenção de produtos fora de especificação no período de transição de set point, sobre-sinal excessivo, instabilidade no processo, entre outros.

É evidente que é difícil afirmar a real causa do problema da operação em modo manual de uma forma geral, mas pode-se listar algumas causas, como o desconhecimento das técnicas de ajuste dos parâmetros do controle de malha PID, desconhecimento pleno do processo controlado, desconhecimento das funcionalidades do



controlador industrial, entre outros. No caso da ação de controle de malha PID, a implementação desta ação nos equipamentos de automação e controle, muitas vezes não são plenamente conhecidos pelos engenheiros de automação, e isto dificulta a otimização do sistema. O pouco conhecimento do engenheiro de automação da funcionalidade das ações de controle de malha PID nos controladores industriais é ocasionada pela grande quantidade de controladores industriais presentes no mercado, e que não existe um padrão de implementação desta ação e até mesmo um padrão de configuração dos controladores.

### 1.1 Motivação do Trabalho de Pesquisa

Existem pouco material acadêmico sobre a implementação da ação de controle de malha PID em controladores industriais, sendo que a maioria dos trabalhos de pesquisa desta área estão focados em técnicas de ajuste dos parâmetros de controle PID, ou implementação e aplicação de novos algoritmos de controle. Este trabalho de pesquisa se foca no estudo da implementação da ação de controle de malha PID, e se localiza na intersecção de trabalhos de técnicas de ajuste de malha e trabalhos implementação e aplicação de técnicas de controle.

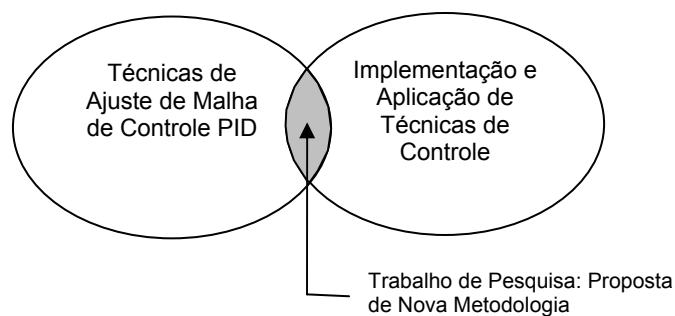


Figura 1 - Diagrama da localização do trabalho de pesquisa em relação a área do conhecimento.

As motivações deste trabalho de pesquisa se baseiam no fato que existem muitos controladores indústrias instalados em plantas indústrias operando de forma inadequada, desenvolver uma metodologia que permita o engenheiro de automação a conhecer melhor o controlador industrial e desenvolver um trabalho em um ramo do conhecimento

importante da automação industrial que é a aferição de instruções de controle. A proposta desta metodologia é que a mesma pode ser aplicada em controladores industriais já implementados em plantas, ou em controladores ainda não utilizados em processos industriais.

Não é foco deste trabalho desenvolver técnicas de ajuste de malha de controle PID, mais sim, fornecer uma ferramenta de engenharia para possibilite o engenheiro de automação conhecer o funcionamento do controlador industrial.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho de pesquisa é o desenvolvimento de uma metodologia de aferição da instrução PID implementada em controladores industriais que possibilite o engenheiro de automação industrial conhecer os limites de operação e a confiabilidade presente do controlador. Deseja-se que a metodologia possua assertividade, praticidade e confiabilidade, pois a intenção é que desta metodologia se torne uma ferramenta principalmente para os engenheiros de automação que atuam mais próximos do processo industrial.

## 1.3 Estrutura do Trabalho de Pesquisa

Este trabalho de pesquisa é estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 descreve-se o embasamento teórico utilizado neste trabalho de pesquisa. Nele discute-se a definição e a classificação de sistema, além do enquadramento desta classificação nos processos industriais. Também são abordados as técnicas de controle de processos industriais, e a implementação de algumas destas técnicas em controladores industriais. Ainda são apresentados os principais equipamentos de automação industriais utilizados.

No capítulo 3 descreve-se na Metodologia de Aferição da Função PID (MAFPID), no qual descreve-se as Etapas de execução, com suas motivações, e os resultados esperados.

No capítulo 4 descreve-se a aplicação da MAFPID em dois estudos de caso, a título de validação da metodologia proposta. No primeiro estudo de caso, aplica-se a MAFPID em um controlador industrial presente no Laboratório de Automação Industrial do

Departamento de Engenharia Elétrica de Energia e Automação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e discute-se os resultados obtidos. No segundo estudo de caso, aplica-se a MAFPID em um controlador industrial de tecnologia de avançada, e discute-se os resultados obtidos.

No capítulo 5 descreve-se as conclusões e considerações finais do trabalho de pesquisa e os possíveis trabalhos futuros após a finalização deste trabalho.

Em anexo descreve-se os métodos de ajuste de parâmetros PID denominado Ziegler-Nichols, que se utilizou neste trabalho.

## 2. CONCEITOS GERAIS DA TEORIA DE SISTEMAS E DE CONTROLE

Antes de abordar a implementação das instruções de controle em controladores indústrias, serão explorados conceitos de sistema e a teoria de controle, com a finalidade de direcionar a presente pesquisa.

Segundo Monteiro (2002, p.39), um sistema pode ser definido como um conjunto de objetos agrupados por alguma interação ou interdependência, de modo que existam relações de causa e efeito nos fenômenos que ocorrem com os elementos desse conjunto. O estudo de sistemas é fundamental para a engenharia de automação, já que os processos industriais são modelados a partir da Teoria de Sistemas.

Para tanto é necessário o estudo da classificação dos sistemas para entender a dinâmica de cada modelo. No capítulo 2.1 é demonstrada a classificação de sistema utilizada nesta pesquisa.

### 2.1 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Existem diversas maneiras de se classificar os sistemas. Neste trabalho de pesquisa é utilizado a classificação modificada a partir da classificação proposta por Cassandras (1993), conforme ilustrado na Figura 2. Esta classificação se fundamenta nas características de relação de causa e efeito dos elementos do sistema.

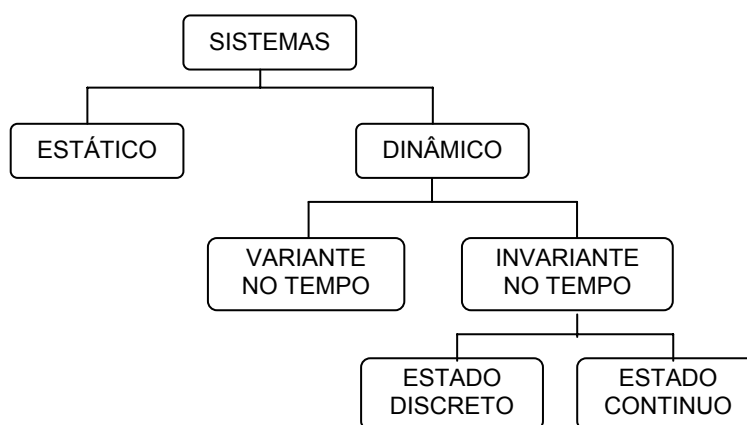


Figura 2 - Classificação de sistemas modificada a partir de Cassandras (1993).

- Sistemas Dinâmicos e Estáticos:

Nos Sistemas Estáticos a saída é sempre independente dos valores passados de entrada. Nos Sistemas Dinâmicos a saída depende dos valores passados de entrada. As equações diferenciais são geralmente utilizadas para descrever o comportamento dos sistemas dinâmicos.

- Sistemas Invariantes no Tempo e Variantes no Tempo:

O comportamento do Sistema Invariante no Tempo não muda com o tempo. Esta propriedade implica em possibilidade de aplicar uma entrada específica em um sistema e este sempre responderá da mesma maneira. O comportamento do Sistema Variante no Tempo muda com o decorrer do tempo. Esta propriedade causa dificuldade para o modelamento deste sistema já que para uma entrada específica aplicada em dois instantes diferentes podem resultar em respostas distintas.

- Sistemas de Estado Contínuo e Estado Discreto:

No Sistema de Estado Contínuo, as variáveis de estado podem geralmente ser qualquer valor real ou complexo. No Sistema de Estado Discreto, as variáveis de estado são elementos de um conjunto discreto.

Apesar de não ser abordado no diagrama da Figura 2, os sistemas apresentam outras classificações que também são utilizadas nesta pesquisa. Estas outras classificações não foram inseridas na Figura 2 devido a complexibilidade em estabelecer todas as relações entre as classificações, e estas não são o objeto principal deste trabalho de pesquisa. Segue as outras classificações:

- Sistemas Lineares e Não Lineares:

Um Sistema Linear satisfaz a propriedade linear  $f(C_1 \cdot u_1 + C_2 \cdot u_2) = C_1 \cdot f(u_1) + C_2 \cdot f(u_2)$ , onde  $u_1$  e  $u_2$  são vetores de entrada,  $C_1$  e  $C_2$  são constantes reais, e  $f(\ )$  é a saída resultante. Um Sistema Não Linear não satisfaz a propriedade linear a cima citada. Uma característica importante dos Sistemas Dinâmicos Lineares Invariantes no Tempo é que os mesmos são descritos por modelo de Espaço de Estado.

- Sistemas em Função do Tempo e em Função de Eventos:

No Sistema em Função do Tempo, a variável de estado continuamente se altera conforme o tempo muda. No Sistema em Função de Eventos, a variável de estado é apenas muda com ocorrência de eventos discretos geralmente assíncronos que força instantaneamente a mudança de estado. Entre a ocorrência de eventos, o estado continua inalterado.

- Sistemas Determinísticos e Estocásticos:

Um Sistema se torna Estocástico sempre que uma ou mais variáveis saídas deste são variáveis aleatórias. Neste caso, o sistema torna-se um sistema estocástico, e uma abordagem probabilística é requerida para descrever o comportamento deste sistema. Um Sistema Determinístico apresenta todas as variáveis saídas não aleatórias. Este sistema normalmente é modelado através de equações aritméticas ou equações diferenciais.

- Sistemas de Tempo Discreto e Tempo Contínuo:

Um Sistema de Tempo Contínuo é aquele em que todas as variáveis de entradas, estados e saídas são definidas em todos possíveis valores de tempo. No Sistema de Tempo Discreto uma ou mais destas variáveis são definidas em pontos discretos no tempo, normalmente resultado de algum processo amostrado.

### *2.1.1 Classificação dos Processos Industriais a partir da Classificação de Sistemas*

Normalmente os processos produtivos industriais apresentam características dinâmica e invariável no tempo, nos quais, segundo a ISA, destacam-se três grandes grupos, a indústria manufatureira, a indústria de processo contínuo e a indústria de processo a batelada.

A indústria manufatureira apresenta como características variáveis de processo de estado discreto e seu controle é em função dos eventos, ou seja, as variáveis são independentes do tempo, e as ações de controle são desenvolvidas ao decorrer dos acontecimentos do processo. Esta pode ser modelada como sistema dinâmico, invariante no tempo de estado discreto, e envolve os processos de fabricação de produtos ou bens

através de montagem de peças e/ou partes. As principais indústrias que enquadram nesta classificação são Indústrias Automotiva, Eletrodoméstica, etc.

A indústria de processo contínuo apresenta como características variáveis de processo de valores contínuos no domínio do tempo, como pressão, velocidade, densidade, etc., e seu processo utiliza malhas de controle. Esta pode ser modelada como sistema dinâmico, invariante no tempo de estado contínuo, e envolve os processos de fabricação que possui um fluxo contínuo de material. Estão nesta classificação as indústrias químicas, petroquímicas, etc.

A indústria de processo a batelada pode ser modelado como sistema dinâmico, invariante no tempo, porém apresenta ora estado discreto, ora estado contínuo. Isso é devido a sua natureza, pois este processo industrial é dividido em Etapas bem definidas denominadas células de processo, que acontecem de forma consecutiva em função dos eventos do processo. Cada célula de processo ainda apresenta um conjunto de operações que podem envolver controle em função dos eventos ou controle de malha. Ao contrário da indústria de processo contínuo as matérias primas são processadas em uma ordem definida e em quantidades determinadas, este processo é denominado Receita. A automação e controle desta indústria é normalizada pela ISA S88, e as principais indústrias que são classificadas como indústria de processo a batelada, são a indústria farmacêutica, indústria de pneus, etc.

Historicamente, cada tipo de indústria apresentava um equipamento específico para a automação e controle de seu processo. Todavia, atualmente há uma conversão de tecnologias na qual os equipamentos de automação modernos podem controlar processos industriais com características diferentes. Isso exigem do engenheiro de automação um conhecimento vasto dos equipamentos e tecnologias envolvidas para todos os tipos de indústrias.

Porém, devido ao objeto desta pesquisa, não será detalha as técnicas de controle de processos de estado discreto presentes na indústria manufactureira, e nem as técnicas de controle descritas na norma ISA S88, cujo foco é o processo a batelada. No capítulo 2.2, é explanado as técnicas de controle dos sistemas dinâmicos, invariantes no tempo de estado contínuo presentes na indústria de processo contínuo.

## 2.2 CONCEITOS DA TEORIA DO CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS

Resumidamente, é entendido por controle o processo contínuo pelo qual se altera o valor de uma grandeza que se deseja controlar para que este assuma um determinado valor pré-estabelecido, denominado valor de referência ou *set point*. Uma vez existindo um erro entre estes valores, resulta em uma ação, conhecida por ação de controle, que minimizará esse erro. Esta ação pode ser manual, quando existe atuação direta do homem sobre a máquina, ou automático, quando a interação se restringe apenas entre máquinas ou dispositivo de qualquer natureza. Assim, para compreender esse processo são descritos, com mais rigores, tópicos da teoria de controle.

### 2.2.1 Sistema de Controle Dinâmico

Um sistema de controle dinâmico é um arranjo de componentes, conectados ou relacionados de forma a comandar, dirigir ou regular a si próprios ou a outros sistemas. Além disso, os sistemas de controle dinâmico podem apresentar características linear ou não-linear, determinístico ou estocástico e de tempo discreto ou de tempo contínuo. Comumente o sistema de controle é representado por diagrama de blocos, no qual é possível facilmente visualizar a dinâmica do sistema. No diagrama de blocos, cada componente individual é representado por um bloco com entrada e saída unidirecional bem definidas, que é interligado com os demais por meio de setas que indicam o fluxo de energia ou de informação de um componente para o outro. Sistemas que possuem uma única entrada e uma única saída são denominadas sistemas SISO (*Single Input, Single Output*). Caso contrário, para sistemas que possuem mais de uma entrada e mais de uma saída são denominados sistemas MIMO (*Multi Input, Multi Output*).

A entrada de um sistema de controle é o estímulo ou excitação aplicado a um sistema através de uma fonte de energia visando obter uma resposta específica na saída. A saída de um sistema de controle é a resposta fornecida pelo sistema a uma excitação que pode ser ou não da mesma natureza física do sinal de entrada.

Normalmente um sistema de controle é classificado em duas formas, sistema de controle em malha aberta, e sistema de controle em malha fechada.



### 2.2.2 Sistema de controle em malha aberta e em malha fechada

Um sistema de controle está em malha aberta quando as saídas não são comparadas em nenhum instante com os sinais de entrada. Um sistema de controle está em malha fechada (ou realimentado) quando as informações na saída também são utilizadas no controle do sistema. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos de um sistema SISO de controle realimentado genérico.

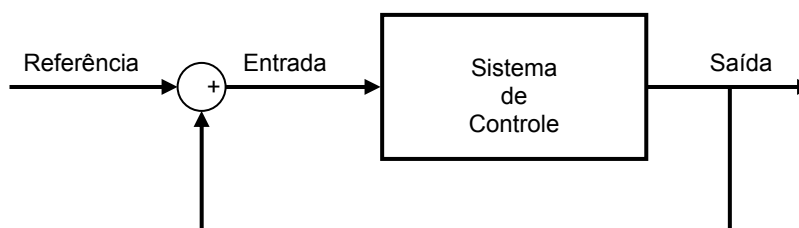


Figura 3 - Sistema de controle em malha fechada

A grande maioria dos sistemas industriais utiliza sistema de controle em malha fechada, pois este garante maior eficácia no controle e estabilidade do mesmo.

### 2.2.3 Ações de Controle

É compreendido, como ação de controle, toda atuação em um sistema com a finalidade de manter um valor de saída em um valor desejado, conforme descrito sucintamente no início do capítulo 2.2. Para atuar em um sistema existem algumas ações de controle consagradas, na qual podemos destacar:

- Controle liga e desliga;
- PID;
- Lógica Fuzzy ou Lógica Nebulosa;
- Controle Avançado;

No capítulo 2.2.3.1, detalha-se as ações de controle acima citadas demonstrando como estas são aplicadas no controle de processos industriais, e também como estas ações de controle serão abordadas neste trabalho de pesquisa.

### 2.2.3.1 Controle liga e desliga

A ação de controle liga e desliga é a ação de controle mais simples. Esta atua de acordo com o modelo de um dispositivo de dois estados ilustrado na Figura 4.

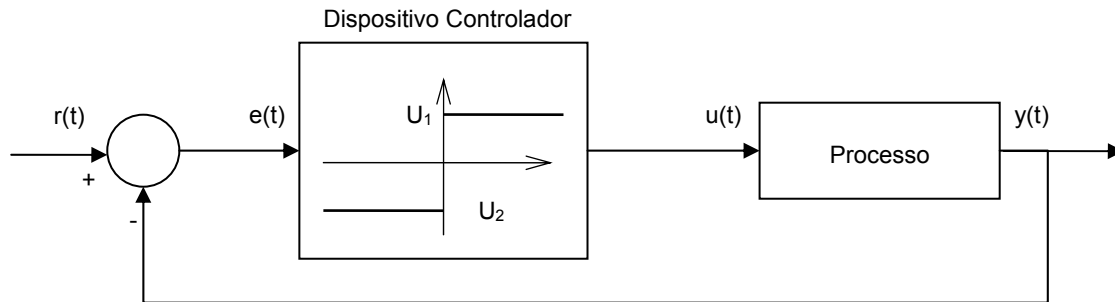


Figura 4 - Controle liga e desliga

Onde  $y(t)$  é o sinal proveniente do transmissor ou sensor que monitora uma variável do processo,  $u(t)$  é o sinal de controle proveniente do dispositivo controlador e controla um dispositivo (ex. motor, válvula, aquecedor, etc.) que atua no processo,  $r(t)$  é o valor de referência, e  $e(t)$  é a diferença entre  $r(t)$  e  $y(t)$ . Esta diferença pode ser realizada de duas formas " $e(t) = r(t) - y(t)$ " e " $e(t) = y(t) - r(t)$ ", sendo que esta forma é ajustada no dispositivo controlador. Na Figura 4 é adotado  $e(t) = r(t) - y(t)$ .

Basicamente o controle liga e desliga atua no processo a partir do sinal de controle do processo  $u(t)$ , e este pode assumir apenas dois valores, conforme o  $e(t)$  seja positivo ou negativo. Pode-se modelar matematicamente este controle como:

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{se } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{se } e(t) < 0 \end{cases}$$

Equação 1 - Controle liga e desliga (OGATA 1995)

Este tipo de função pode ser implementado como um simples comparador ou mesmo um relé físico. Neste caso tem-se uma inconsistência em zero e, na presença de ruídos, tem-se chaveamentos espúrios quando o sinal  $e(t)$  for próximo de zero.

A ação de controle liga e desliga pode assim ser considerada a ação de controle mais simples e mais econômica. Entretanto, este tipo de ação possui limitações no que diz respeito ao comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema em malha fechada. Suas aplicações são restringidas a sistemas onde não é necessária precisão e nem um bom desempenho dinâmico. Como a ação de controle liga e desliga apresenta uma característica simples, sendo que a mesma não resulta em dificuldades em seu ajuste, esta ação de controle não será foco da metodologia proposta neste trabalho de pesquisa.

### 2.2.3.2 Controle PID

A ação de controle PID é a ação de controle mais empregada nas indústrias atualmente que necessitam de controle de malha. Os processos em que normalmente é utilizada a ação de controle PID, são do tipo entrada e saída simples (SISO), nos quais há apenas uma variável controlada de entrada do processo e uma variável de monitorada na saída do processo. O controle PID apresenta uma variável de processo (PV), um valor de referência (SP) e uma variável controladora (CV). A variável de processo é a grandeza a ser monitorada no processo controlado. O valor de referência é o valor que se deseja manter a grandeza monitorada. A variável controladora é a grandeza a ser controlada no processo. A variável erro é determinada pela diferença entre o valor de SP e o valor PV. A Figura 5 ilustra a implementação em diagrama de blocos da ação PID em um sistema SISO e com uma única malha de realimentação.

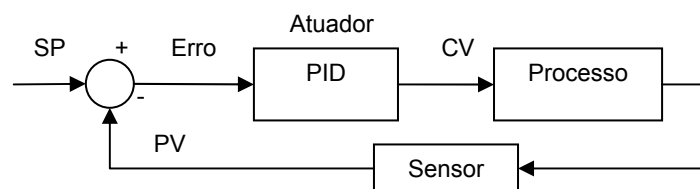


Figura 5 - Diagrama da ação de controle PID.

Para exemplificar, um tanque onde se deseja controlar o nível (Figura 6), apresenta uma tubulação de entrada que tem sua vazão controlado por uma válvula

automática, e também apresenta uma tubulação de saída com uma válvula manual. Para manter o nível do tanque (PV) em um valor constante (SP) a partir do controle de vazão da tubulação de entrada deste tanque (CV), a ação de controle PID atua no processo por meio de CV, monitorando a discrepância entre os valores de PV e SP, de tal forma a eliminar esta.

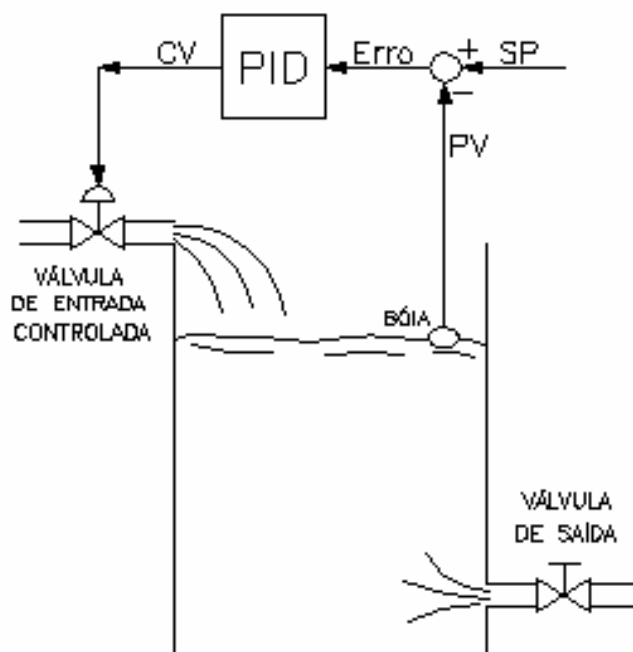


Figura 6 - Controle de nível de um tanque.

A variável PV é obtida por uma bóia de nível (sensor) e SP é determinado pelo operador do processo. A ação de controle PID recebe o valor do erro entre PV e SP, e executa o cálculo para fornecer CV que atua na válvula controlada automática. Caso PV seja menor que SP, a instrução fornece um valor para CV para que a válvula abra mais. Para PV maior que SP, o valor de CV resulta em fechamento da válvula. Qualquer mudança na válvula de saída implica em uma ação de controle do PID na válvula de entrada. Dependendo da variação na válvula de saída, a atuação da instrução PID pode ocasionar um erro estacionário entre os valores de PV e SP.

A ação de controle PID é executada a partir de uma equação diferencial. Essa equação é composta por três parcelas, uma proporcional, uma integrativa e outra derivativa. A parte proporcional é dada pela multiplicação do erro entre o PV e SP por um fator. A parte integrativa é obtida pela integral do erro em relação ao tempo multiplicado

por um outro fator. A parte derivativa é calculada pela variação do erro em relação ao tempo multiplicado por um outro fator. Historicamente existem três principais implementações da equação da ação de controle PID.

A primeira implementação deriva da teoria de controle clássico (OGATA, 1995), e é especificada segundo a Equação 2.

$$CV = K_p \times e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

onde:  $e(t) = SP - PV$

Equação 2 - Equação PID segundo OGATA.

Pode-se notar que para cada termo da equação (Proporcional, Integral e Derivativo) existe um parâmetro multiplicativo independente.

A segunda implementação segue o padrão ISA (ANSI/ISA51.1-1979), é descrita na Equação 3.

$$CV = K_p \times \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

onde:  $e(t) = SP - PV$

Equação 3 - Equação PID padrão ISA (ANSI/ISA51.1-1979).

Ao contrário da Equação 2, a Equação 3 padrão ISA há dependência dos parâmetros integrativos e derivativos com o parâmetro proporcional.

O terceiro modo de implementar a equação PID deriva dos antigos controladores pneumáticos, no qual é descrito na Equação 4.

$$CV = K_p \times \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \times \left[ 1 + T_d \frac{d}{dt} \right]$$

onde:  $e(t) = SP - PV$

Equação 4 - Equação PID proveniente dos controladores pneumáticos.

Este modo de implementação da equação PID apresenta complexas inter-relações entre os parâmetros proporcional, integral e derivativo. Todavia, a mesma entrou em desuso a partir do momento que os controladores pneumáticos se tornaram obsoletos.

Apesar destas diferenças no modo de implementação da equação PID, todos os modos de equações PID apresentados possuem três parcelas, a proporcional, integral e derivativa, onde cada qual influencia de maneira específica a dinâmica do sistema controlado. A seguir, detalha-se o comportamento de cada parcela da equação PID segundo OGATA (1995).

#### 2.2.3.2.1 Parcela Proporcional da equação PID

A ação de controle gerada pelo modo proporcional é diretamente proporcional a sua entrada, ou seja, o sinal de erro em função do tempo, como mostrado na Equação 5.

$$CV = K_p \times e(t)$$

onde:  $e(t) = SP - PV$

Equação 5 - Parcela Proporcional da equação PID.

A Figura 7 mostra a relação entre o sinal de erro e a ação de controle gerada pelo modo de controle proporcional. Excluída a faixa de saturação da variável manipulada (sinal de erro fora da banda proporcional), cada valor de erro tem um único valor correspondente de ação de controle e vice-versa.

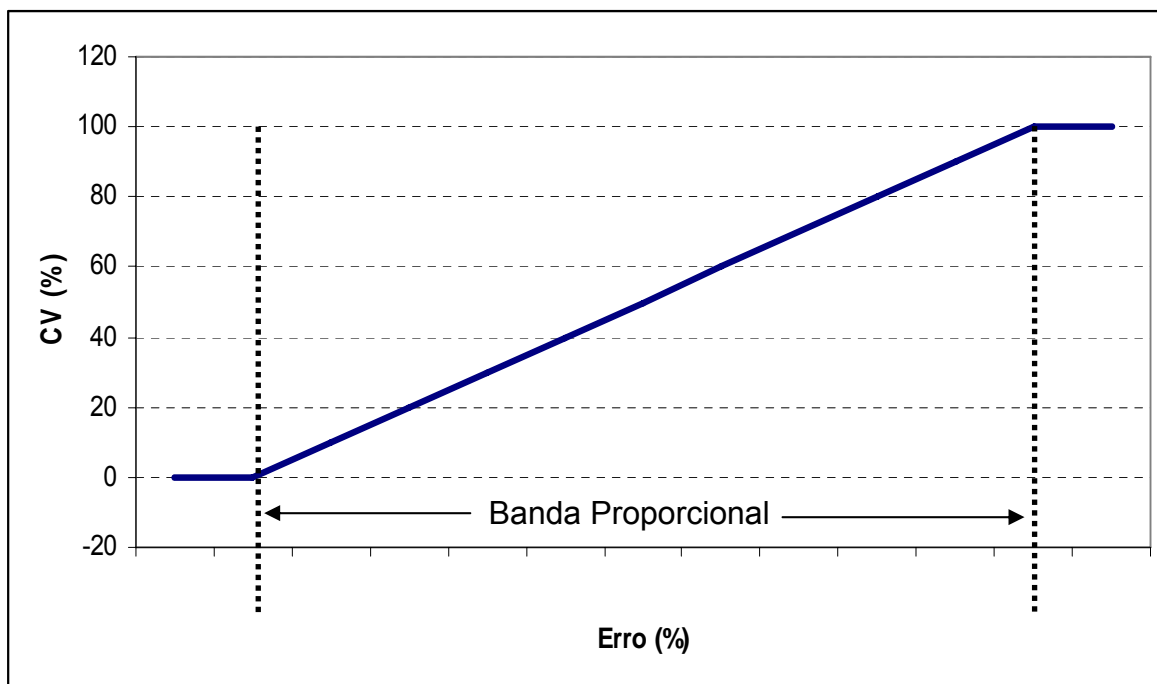


Figura 7 - Ação de controle em função do sinal de erro gerada pelo controlador.

Como o ganho do controlador é dado pela inclinação da reta sobre a banda proporcional percentual (BP), a relação entre ambos é dada pela Equação 6. Esta representação é genérica para o caso onde a saída do controlador varia entre 0 e 100%. Para casos específicos onde isto não ocorre, esta relação não é válida.

$$BP = \frac{100}{K_p}$$

Equação 6 - Relação entre  $K_p$  e banda proporcional percentual.

Neste caso, o controlador é apenas um amplificador com um ganho constante, quanto maior o erro, maior a ação de controle gerada. Assim, a parcela proporcional aumenta a velocidade resposta do sistema de forma proporcional ao parâmetro  $K_p$ , assim diminuindo o tempo de acomodação do sistema, contudo, este aumento pode resultar em instabilidade e aumento do sobre-sinal do sistema de controle. A principal desvantagem deste modo é que ele apresenta erro em regime permanente. O erro em regime

permanente diminui com o aumento do ganho proporcional  $K_P$ , no entanto isto diminui a faixa correspondente à banda proporcional, tornando o controlador mais oscilatório.

#### 2.2.3.2.2 Parcela Integral da equação PID

A ação de controle gerada pelo modo integral é proporcional à integral do sinal de erro no tempo, como mostrado na Equação 7. O grande benefício da sua utilização é a eliminação do erro estacionário em regime permanente, contudo, ela reduz a estabilidade da malha de controle (MOORE, 1999).

$$CV = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt$$

onde:  $e(t) = SP - PV$

Equação 7 - Parcela Integral da equação PID.

A Equação 7 mostra que a ação de controle integral depende do histórico do erro, desde que o processo de integração foi iniciado ( $t = 0$ ) até o instante atual. A ação integral também pode ser vista como um mecanismo que atualiza automaticamente o valor base do controlador com ação proporcional.

A presença do termo de natureza integral reduz ou elimina erros estacionários, pois atua na integral do erro entre SP e PV, conforme Figura 8. Em contrapartida, esse benefício geralmente é obtido às custas de uma redução da estabilidade ou do amortecimento do sistema.

Uma das características do termo integral é a capacidade de fornecer, na saída do controlador, um sinal não nulo, mesmo após o sinal de erro, que é o sinal de entrada do controlador, ter-se anulado. A explicação para este comportamento é o fato da saída do controlador depender não apenas dos valores instantâneos do erro, mas também dos valores acumulados. Em outras palavras, erros passados são acumulados no integrador com um determinado valor, o qual se mantém acumulado mesmo após o valor instantâneo do erro ter-se anulado. Ao contrário do controlador proporcional, no controlador integral as perturbações de valores constantes podem ser rejeitadas mesmo que o sinal de erro instantâneo seja nulo.



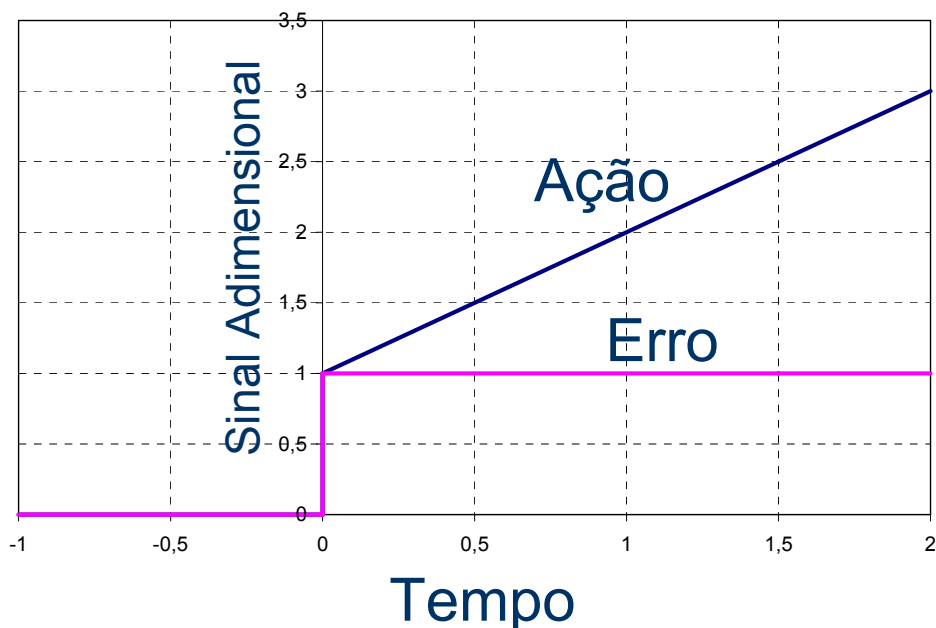


Figura 8 - Gráfico ilustrativo da resposta do termo integral no sistema.

#### 2.2.3.2.3 Parcela Derivativa da equação PID

A ação de controle gerada pelo modo derivativo é proporcional à taxa de variação do sinal de erro, ou seja, a sua derivada no tempo, segundo a Equação 8. Ela estima a tendência de aumento ou diminuição do erro futuro. Assim, este modo é capaz de aumentar a velocidade de correção do processo, pois atua de forma antecipatória quando são detectadas variações no sinal de erro. Por causa disso, a ação derivativa é bastante sensível a erros de alta frequência, como ruídos de processo e mudanças no valor de referência da variável controlada.

$$CV = T_d \frac{de(t)}{dt}$$

onde:  $e(t) = SP - PV$

Equação 8 - Parcela Derivativa da equação PID.

A função do termo derivativo é aumentar o amortecimento, e desta forma, melhorar a característica de estabilidade de um sistema. No entanto, se o erro apresentar uma taxa de variação não nula, o termo derivativo assume a função de antecipar a ação

do controlador. Esta característica torna o controlador sensível à taxa de variação do erro e atua no sentido de aumentar o amortecimento do sistema.

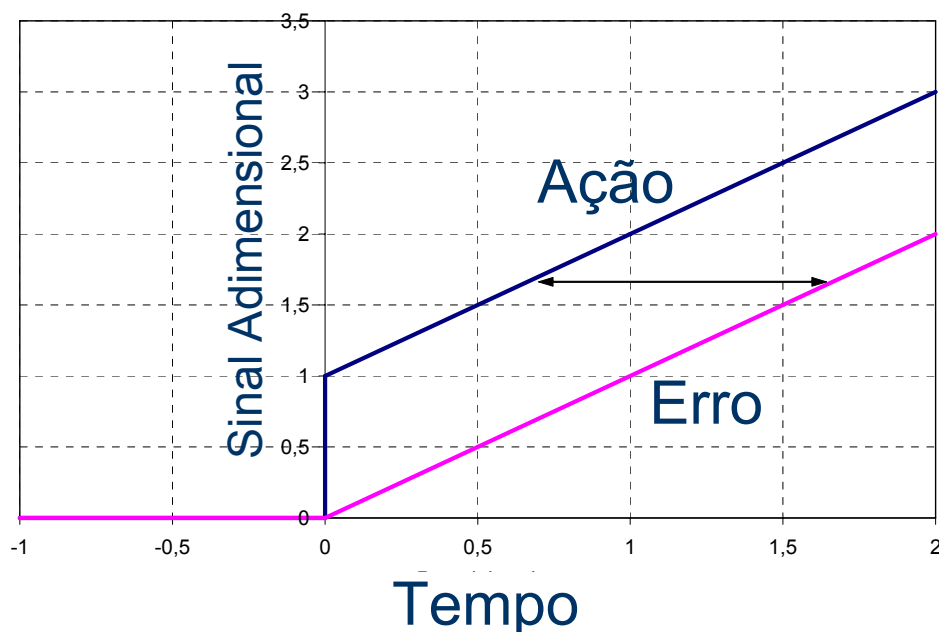


Figura 9 - Gráfico ilustrativo da resposta do termo derivativo no sistema.

Nota-se que o modo derivativo somente age quando há variação do erro no tempo. Se o erro for constante, mesmo que grande, não há ação corretiva. Por isso, este modo não é utilizado sozinho, mas associado com outros modos de controle.

A combinação dos termos de natureza proporcional, integral e derivativa permite reduzir o erro estacionário e simultaneamente satisfazer as exigências relativas ao amortecimento e, portanto, de estabilidade.

A título de esclarecimento deste trabalho, utiliza-se o termo instrução PID, o conjunto de regras e operações matemáticas, sendo elas discretas no tempo ou não, que implemente um controle de malha PID. A equação PID é a forma matemática que a mesma se apresenta.

### 2.2.3.3 Controle por Lógica *Fuzzy* ou Nebulosa

Com a evolução tecnológica, principalmente no campo do processamento de dados dos controladores industriais, possibilita a implementação de lógicas mais complexas para o controle de processo, tal como a Lógica *Fuzzy* ou Nebulosa.

Lógica *Fuzzy* ou Nebulosa é uma técnica de Inteligência Artificial, disciplina que procura maneiras de máquinas simularem o raciocínio humano na solução de problemas diversos. Esta abordagem procura mimetizar a forma humana atuar. Um sistema baseado em Lógica *Fuzzy* pode ter sua ação esquematizada pelos seguintes elementos constituintes:

- Fuzzificador,
- Regras, ou base de conhecimento,
- Inferência, ou lógica de tomada de decisões,
- Defuzzificador.

O fuzzificador é responsável pelo mapeamento das entradas numéricas em conjuntos *Fuzzy*, variáveis lingüísticas. A Inferência é realizada mapeando-se valores lingüísticos de entrada em valores lingüísticos de saída com o uso das regras. Esta usa implicações *Fuzzy* para simulação de decisões humanas, gerando ações de controle, chamados de conseqüentes, partindo-se de um conjunto de condições de entrada, chamada de antecedentes.

Esta base de conhecimento representa o modelo do sistema a ser controlado, consistindo numa base de dados e uma base de regras *Fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece definições numéricas e a base de regras caracteriza os objetivos do controlador e sua estratégia usada, geralmente fornecida por pessoas especialistas no sistema.

O defuzzificador mapeia valores lingüísticos em valores numéricos de saída. Esta função é realizada por uma interface de defuzzificação, obtendo-se um valor discreto que possa ser usado numa ação de controle no mundo real.

A determinação do grau de pertinência, para conjuntos *Fuzzy* contínuos, se dá pela análise de Funções de Pertinência. Estas funções possibilitam o cálculo do grau de

pertinência de acordo com o valor assumido pela variável. Elas representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *Fuzzy*.

A utilização de lógica *Fuzzy* em controladores industriais pode ocorrer basicamente de duas formas. A primeira forma é a implementação desta lógica como um controlador em substituição da instrução PID, conforme Figura 10. Esta implica na implementação de regras específicas a cada processo para obter o controle desejado.

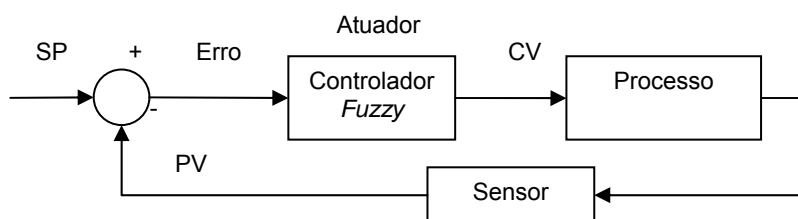


Figura 10 - Diagrama da ação de controle utilizando *Fuzzy* como controlador.

Uma outra forma de implementação da lógica *Fuzzy* no controle de processos é uma ação em conjunto com a instrução PID. Esta ação é estabelecida com a lógica *Fuzzy* atuando como um supervisor da instrução PID. O supervisor *Fuzzy* possui regras específicas que atuam sobre a instrução PID a partir do monitoramento dos valores de entrada da instrução PID e das informações fornecidas pela planta controlada, conforme Figura 11. Estas regras específicas e as informações da planta dependem do tipo de processo controlado.

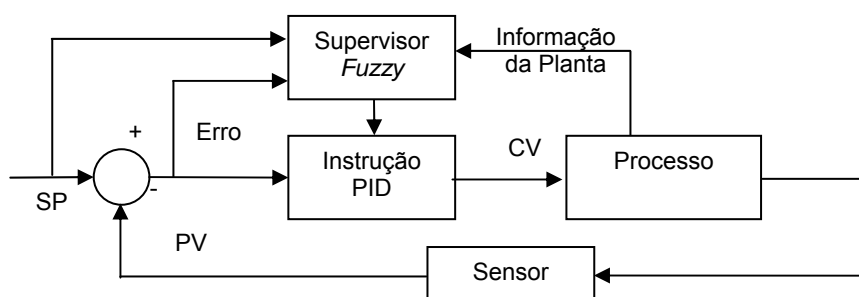


Figura 11 - Diagrama da ação de controle utilizando *Fuzzy* como supervisor.

Como os parâmetros da instrução de controle por lógica *Fuzzy* depende das regras e da base de conhecimento, além do modo de implementação no controlador, e isso ampliaria significativamente o objeto de pesquisa deste trabalho. Assim, este trabalho de pesquisa não se aprofunda nas técnicas de controle de processo e nem no detalhamento das características deste controle. A metodologia proposta neste trabalho não deverá ser aplicada com fins de aferição deste sistema de controle por lógica *Fuzzy*.

#### 2.2.3.4 Controle Avançado

Em muitas aplicações de controle de processos industriais, a utilização da instrução PID não é suficiente para a controle, otimização e estabilidade do processo. Normalmente estes processos apresentam grau de complexibilidade elevado, sendo que as equação diferenciais que descreve o processo normalmente são não-lineares ou de ordem elevada.

Para o controle destes processos são utilizadas técnicas de controle que utilizam algoritmos de Inteligência Artificial, tal como Redes neurais, ou em técnicas mais sofisticadas de controle, tal como controle preditivo, controle adaptativo, entre outros. Estas técnicas são realizados por *software* especialistas, e muitas vezes atuam em conjunto com instruções PID dos controladores. E por isso, as soluções de Controle Avançado apresentam uma arquitetura de *software* e *hardware* complexa.

Devido a grande variedade de técnicas de Controle Avançado, e também a variedade de sistemas de *software* e *hardware* empregados neste tipo de controle, a metodologia proposta neste trabalho não deverá ser aplicada para controle Avançado.

### 2.3 ALGORITMO PID DIGITAL

Devido a advento de novas tecnologias e a utilização da eletrônica digital e microprocessadores na automação industrial, os controladores industriais evoluíram e, atualmente, as ações de controle são executadas em tempo discreto. Para tanto, os controladores industriais modernos apresentam módulos de conversão A/D e D/A que convertem os sinais analógicos de campo proveniente dos sensores e transmissores do

processo em sinais digitais (Figura 12), e os sinais digitais processados pelo controlador em novamente sinal analógico que atua no processo (Figura 13).

O modulo de conversão A/D apresenta um período de amostragem  $\tau_A$  está na ordem de micro segundos, conforme ilustrado na Figura 12.

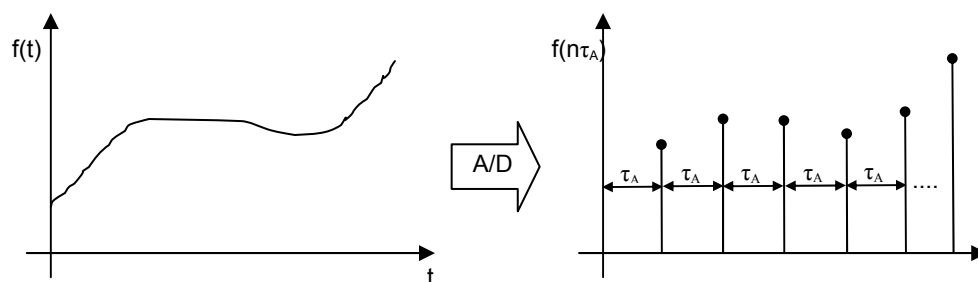


Figura 12 - Conversão analógica - digital.

O modulo de conversão D/A apresenta um período de atualização  $\tau_H$  está na ordem de micro segundos, conforme ilustrado na Figura 13.

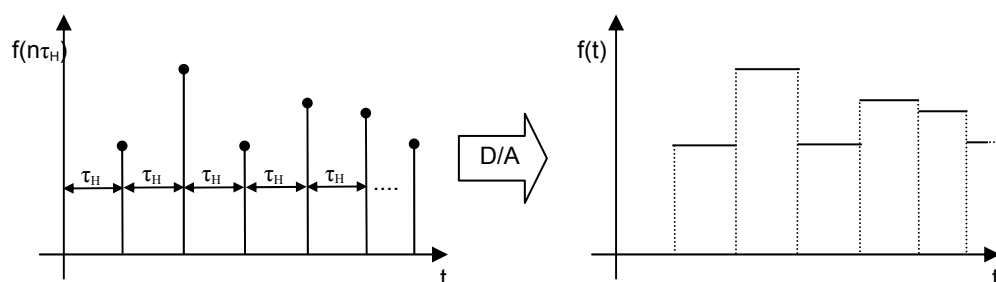


Figura 13 - Conversão digital - analógica

O período de amostragem, período de atualização e período de execução da instrução do controlador não são necessariamente sincronizados. Assim, estes tempos de execução podem ser diferentes e fora de fase. A Figura 14 demonstra o diagrama de execução de um controlador industrial que possui períodos de execução de instruções internas e amostragens de entrada e saída diferentes.

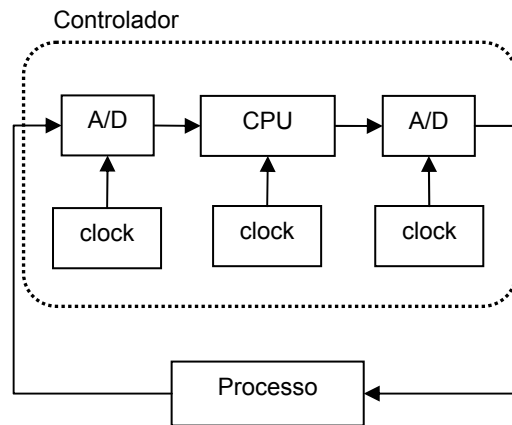


Figura 14 - Diagrama de execução das operações de conversão A/D e D/A.

Assim, a execução da equação PID é realizada em tempo discreto, a equação da teoria de controle clássico é descrita na Equação 9.

$$CV = K \times e(n\tau) + \frac{\tau}{T_i} \sum_{n=1} \frac{e(n\tau) + e((n-1)\tau)}{2} + \frac{T_d}{\tau_n} [e(n\tau) - e((n-1)\tau)]$$

onde:  $e(n\tau) = SP - PV(n)$

Equação 9 - Equação PID em tempo discreto segundo OGATA.

Note-se que a parcela integral é implementada como a somatória dos trapézios formados pelos valores dos erros consecutivos e o período de discretização. Já a parcela derivativa é dada pela diferença dos valores dos erros consecutivos dividido pelo período de discretização.

Uma questão relevante é os períodos de amostragem do conversor A/D, período de cálculo do algoritmo e o período de atualização do conversor D/A, normalmente para o algoritmo ter bom desempenho o período de cálculo deve ser maior que os outros dois, e todos estes devem ter um valor adequado ao processo controlado.

Segundo OGATA (1995), o período de cálculo pode influenciar drasticamente a dinâmica do controle é recomendado em sistemas térmicos constantes entre 10 a 30 segundos, em sistemas que envolvam pressão entre 1 a 5 segundos e em sistemas de nível de líquido entre 1 a 10 segundos.

## 2.4 PRINCIPAIS CONTROLADORES INDUSTRIAIS

A constante busca das indústrias em otimizar seus processos, tanto no ponto de vista de produção e de eficiência, como de segurança e de confiabilidade, torna a automação industrial uma das principais alternativas utilizadas nos dias de hoje.

Segundo Moraes e Castrucci (2001), pode-se definir a automação industrial como qualquer sistema, apoiado em computadores, dispositivos mecânicos ou elétricos, que substitua o trabalho humano e que vise a soluções rápidas e econômicas para atingir os complexos objetivos das indústrias.

Defina-se neste trabalho de pesquisa, controlador industrial é todo sistema ou equipamento capaz de atuar e/ou controlar um processo industrial. Dentro dos inúmeros controladores industriais para a automação, podem-se destacar três mais utilizados, denominados *Single-Loop* ou *Multi-Loop*, Controladores Lógicos Programáveis (CLP<sup>®</sup>) e Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD).

### 2.4.1 Controladores Isolados de Malha - *Single-Loop* e *Multi-Loop*

Historicamente, os controladores isolados de malha, *Single-loops* (Figura 15), foram os primeiros dispositivos utilizados para o controle de malha em processos contínuos industriais. Em sua concepção inicial, os *Single-loops* eram dispositivos eletrônicos analógicos de pequeno porte que eram dedicados a realizar uma única ação de controle PID, na qual seus ajustes de ganhos proporcional, integral e derivativo eram realizados através de variação de potenciômetros neste circuito eletrônico.





Figura 15 - Exemplo de *Single-loop*.

Atualmente, os *Single-loops* continuaram sendo de pequeno porte, mas evoluíram e deixaram de ser um dispositivo analógico, para ser digitais, possibilitando a utilização de microprocessadores e, conseqüentemente, implementação de instruções mais avançadas de controle de malha. Este avanço tecnológico também possibilitou a conexão de redes industriais e o adjeto de entradas e saídas digitais nestes dispositivos, sendo isso importante para a atuação dos equipamentos de automação industrial atuarem de forma integrada.

Os *Single-loops* modernos podem operar desde em modo controle liga-e-desliga até controle de malha mais avançado. Os controladores industriais que apresentam tamanhos similares que os *Single-Loops* e podem implementar mais de uma malha de controle, denomina-se *Multi-loop*.

A programação e a parametrização do *Single-loop* atuais são realizadas pela Interface Homem-Máquina (IHM) presente na parte frontal deste dispositivo, assim não necessitando de microcomputadores e nem software de programação para a implementação das ações de controle.

Ultimamente, os *Single-loops* são utilizados em poucas aplicações industriais. Mais precisamente, utiliza-se os *Single-Loops* em processos isolados no qual controladores como CLPs<sup>®</sup> e SDCDs são soluções mais caras.

### 2.4.2 Controladores Lógicos Programáveis - CLP®

Durante a década de 50, nas indústrias manufatureiras, os dispositivos eletromecânicos foram os recursos mais utilizados para efetuar controles lógicos e de intertravamentos nas linhas de produção e em máquinas isoladas. Tais dispositivos são baseados principalmente em relés (MIYAGI, 1996), tinham especial importância na indústria automobilística em que a complexidade dos processos produtivos envolvidos exigia, não raro, instalações em painéis e cabines de controle com centenas de relés e, conseqüentemente, um número maior ainda de interconexões deles.

Tais sistemas de controle, apesar de funcionais, apresentavam problemas de ordem prática bastante relevantes. Como as instalações possuíam uma grande quantidade de elementos, a ocorrência de uma falha qualquer significava o comprometimento de várias horas ou mesmo dias de trabalho de pesquisa e correção do elemento faltoso. Além disto, pelo fato de os relés apresentarem dimensão física elevada, os painéis ocupavam grande espaço, o qual deveria ser protegida contra umidade, sobre temperatura, gases inflamáveis, oxidações, poeira, etc.

Outro fator ainda comprometedor das instalações a relés era o fato de que como a programação lógica do processo controlado era realizada por interconexão elétrica com lógica fixas, eventuais alterações na mesma exigiam interrupções no processo produtivo a fim de se reconectarem os elementos. Interrupções estas nem sempre bem-vindas na produção industrial. Como conseqüência ainda, tornava-se obrigatória à atualização das listas de fiação como garantia de manter a documentação do sistema.

Com o advento da tecnologia de estado sólido, desenvolvida a princípio em substituição às válvulas a vácuo, alguns dispositivos transistorizados foram utilizados no final da década de 50 e início dos anos 60, sendo que tais dispositivos reduziam muitos dos problemas existentes nos relés. Porém, foi com o surgimento dos componentes eletrônicos integrados em larga escala, que novas fronteiras se abriam ao mundo dos computadores digitais e, em especial às tecnologias para a automação industrial. Assim, CLP® foi idealizado pela necessidade de poder se alterar uma linha de montagem sem que tenha de fazer grandes modificações mecânicas e elétricas. A Figura 16 ilustra um CLP®.



Figura 16 - Exemplo de CLP<sup>®</sup>.

O CLP<sup>®</sup> nasceu praticamente dentro da indústria automobilística, especificamente na Hydronic Division da General Motors, em 1968 (MIYAGI, 1996).

A idéia inicial do CLP<sup>®</sup> foi de um equipamento com as seguintes características resumidas:

- Facilidade de programação;
- Facilidade de manutenção;
- Alta confiabilidade;
- Dimensões menores que painéis de Relês, para redução de custos;
- Envio de dados para processamento centralizado;
- Preço competitivo;
- Expansão em módulos;
- Mínimo de 4000 palavras na memória.

Pode-se dividir a história do CLPs<sup>®</sup> de acordo com o sistema de programação por ele utilizado:

1a. Geração: Os CLPs<sup>®</sup> de primeira geração se caracterizam pela programação intimamente ligada ao hardware do equipamento. A linguagem utilizada era o *Assembly* que variava de acordo com o processador utilizado no projeto do CLP<sup>®</sup>, ou seja, para poder programar era necessário conhecer o *hardware* do projeto do CLP<sup>®</sup>. Assim a tarefa de programação era desenvolvida por uma equipe técnica altamente qualificada, gravando-se o programa em memória EPROM, sendo realizada normalmente no laboratório junto com a construção do CLP<sup>®</sup>.

2a. Geração: Surgem as primeiras Linguagens de Programação não tão dependentes do hardware do equipamento, possíveis pela inclusão de um Programa Monitoração no CLP<sup>®</sup>, o qual converte as instruções do programa, verifica o estado das entradas, compara com as instruções do programa do usuário e altera o estados das saídas. Os Terminais de Programação eram na verdade Programadores de Memória EPROM. As memórias depois de programadas eram colocadas no CLP<sup>®</sup> para que o programa do usuário fosse executado.

3a. Geração: Os CLP's<sup>®</sup> passam a ter uma Entrada de Programação, onde um Teclado ou Programador Portátil é conectado, podendo alterar, apagar, gravar o programa do usuário, além de realizar testes e depurações no equipamento e no programa. A estrutura física também foi alterada para os Sistemas Modulares com Bastidores ou Racks.

4a. Geração: Com a popularização e a diminuição dos preços dos microcomputadores, os CLP's<sup>®</sup> passaram a incluir uma entrada para a comunicação serial. Com o auxílio dos microcomputadores a tarefa de programação passou a ser realizada nestes. As vantagens eram a utilização de várias representações das linguagens, possibilidade de simulações e testes, treinamento e ajuda por parte do software de programação, possibilidade de armazenamento de vários programas no micro, etc.

5a. Geração: Atualmente existe uma preocupação em padronizar protocolos de comunicação para os CLP's<sup>®</sup>, de modo a proporcionar que o equipamento de um fabricante comunique com o equipamento outro fabricante, não só CLP's<sup>®</sup>, como Controladores de Processos, Sistemas Supervisórios, Redes Internas de Comunicação e etc., proporcionando uma integração a fim de facilitar a automação, gerenciamento e desenvolvimento de plantas industriais mais flexíveis e normalizadas, fruto da chamada

Globalização. Existem Fundações Mundiais para o estabelecimento de normas e protocolos de comunicação.

Para a programação e parametrização dos CLP's<sup>®</sup> é utilizado software de programação instalados em microcomputadores, no qual as lógicas são implementadas a partir da linguagem denominada *Ladder*, conforme ilustrado na Figura 17. A linguagem de programação *Ladder* é baseada na lógica de contato, utilizada em circuitos de contator e relé de painéis elétricos.

Na programação *Ladder*, semelhante aos diagramas de circuitos de relés, cada contato ao assumir dois estados (fechado ou aberto), representa uma variável boolana, ou seja, uma variável que assume dois estados: verdadeiro ou falso. Ao contrário dos circuitos elétricos de relé, a programação *Ladder* é apenas uma representação lógica, trabalhando somente com símbolos, não considerando a tensão envolvida nas barras de alimentação nem a intensidade da corrente que normalmente um diagrama de circuito a relé apresentaria.

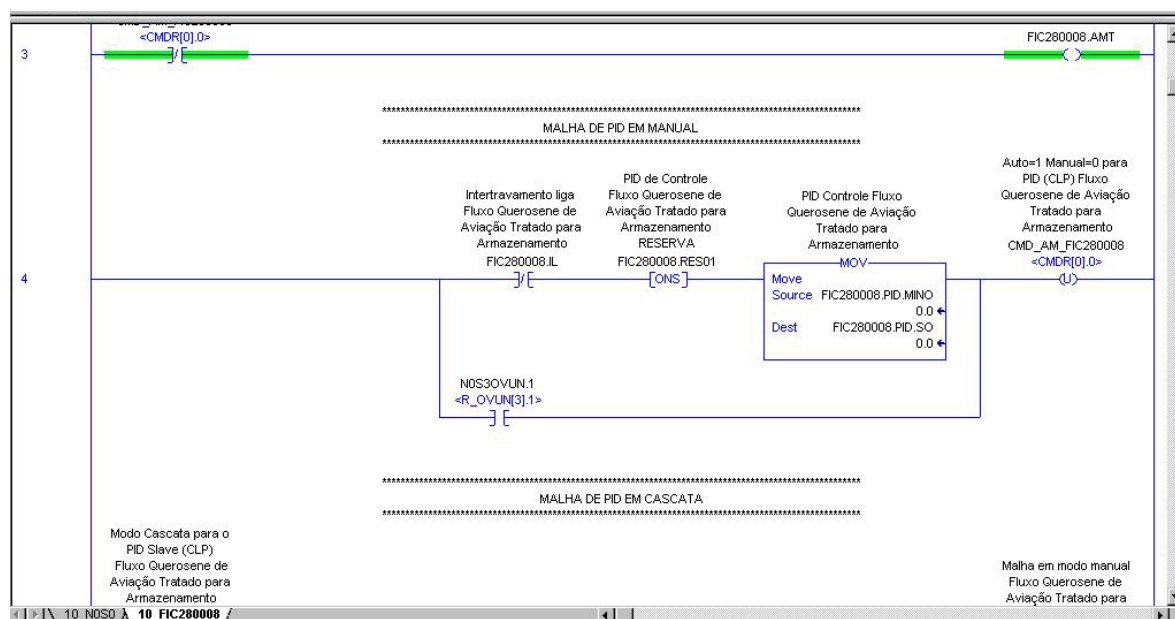


Figura 17 - Linguagem de programação de *Ladder*.

#### 2.4.2.1 Arquitetura do CLP<sup>®</sup>

Um CLP<sup>®</sup> é constituído basicamente de:

- Fonte de Alimentação;
- CPU;
- Memórias dos tipos fixo e volátil;
- Dispositivos de entrada e saídas (cartões I/O);
- Terminal de Programação;

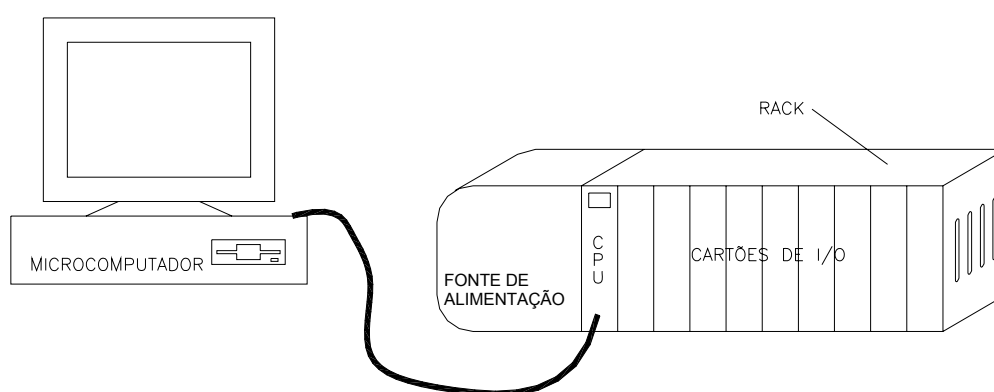


Figura 18 - Principais partes do CLP®.

A fonte de alimentação converte corrente alternada em contínua para alimentar o controlador. Caso falte energia, há uma bateria que impede a perda do programa do usuário. Ao se retornar a energia, o programa se reinicia.

A Unidade Central de Processamento é responsável pela execução do programa do usuário, atualização da memória de dados e memória-imagem das entradas e saídas.

As memórias podem ser divididas em quatro partes, memória EPROM, memória do usuário, memória de dados e memória-imagem das entradas e saídas. A memória EPROM contém o programa monitor elaborado pelo fabricante que faz a inicialização do controlador, armazena dados e gerencia a seqüência de operações. Este tipo de memória não está acessível ao usuário do controlador programável. A memória do usuário armazena o programa aplicativo do usuário. A CPU processa esse programa, atualiza a memória de dados internos e imagem entrada e saídas e retorna novamente para essa

área da memória. Ela possui dos estados: em operação, com varredura cíclica; e parado, quando se carrega o programa aplicativo no CLP<sup>®</sup>. Na memória de dados são encontrados os dados referentes ao processamento do programa do usuário, isto é, uma tabela de valores manipuláveis. A memória-imagem das entradas e saídas reproduz os estados dos periféricos ligados nas entradas e saídas do CLP<sup>®</sup>.

Os módulos de entradas e saídas correspondem aos cartões nos quais são feitas as ligações físicas dos sensores, atuadores chaves, seletoras, botões, etc provenientes do processo de controle.

O terminal de programação, normalmente, é microcomputador, é um acesso para o usuário do CLP<sup>®</sup> ter ao programa ou memória do CLP<sup>®</sup>, normalmente pode ter esse acesso via porta serial localizada na CPU. Uma outra possibilidade é o CLP<sup>®</sup> ter cartões de comunicação de rede, tal como um cartão de comunicação Ethernet.

#### 2.4.2.2 Funcionalidade do CLP<sup>®</sup>

Inicialmente os CLP<sup>®</sup> foram desenvolvidos para controle de lógica de intertravamento, conforme já descrito neste trabalho. Normalmente este tipo de controle é realizado em pontos específicos e isolados do processo industrial.

Com a evolução da tecnologia dos CLP<sup>®</sup> e seus componentes, e o advento dos sistema supervisórios, possibilitou-se o desenvolvimento de Sistemas de Controle, Supervisório e Aquisição de Datas (SCADA). Este sistema é destinado à automação e controle de processos com predominância de sinais discretos, e foram concebidos para integrar diversas módulos de entradas e saídas ligados em rede. Assim, o controle dos processos passaram a ser integrados, ou seja, cada parte da planta industrial poderia trocar informações com a outra.

Atualmente, com a crescente redução no custo do CLP<sup>®</sup> e incorporação de instruções funções cada vez mais avançadas como, por exemplo, lógica *Fuzzy*, controle de batelada conforme ISA SP88, etc. observa-se o incremento de sua utilização nas indústrias em geral, independente de seu porte ou ramo de atividades. Os CLP<sup>®</sup> modernos são capazes de processar grande quantidade de informações, controlando sistemas de variáveis discretas e contínuas. Apesar desta evolução, ainda não existem aplicações de controle Avançado utilizando como controlador o CLP<sup>®</sup>.

A grande consequência desta evolução tecnologia é o aumento da funcionalidade e por consequência das aplicações dos CLP<sup>®</sup>, porém a configurações dessas

funcionalidade são cada vez mais complexas e exigem do engenheiro de automação investimento de tempo e recursos para implementar alguma destas.

### 2.4.3 Sistema Digital de Controle Distribuído - SDCD

Os Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCDs) foram concebidos inicialmente para substituir os *Single-loops* analógicos e incrementar novas funcionalidades à automação industrial. Sua principal aplicação foi nas indústrias de processo contínuo como as indústrias químicas, petroquímicas, etc.

O SDCD é composto basicamente por um conjunto integrado de dispositivos que se completam no cumprimento das suas diversas funções - o sistema controla e supervisiona o processo produtivo da unidade. Utilizam-se técnicas de processamento digitais (discreto) em oposição ao analógico (contínuo), com o objetivo de proporcionar uma manutenção no comportamento de um referido processo na planta da indústria, dentro de parâmetros já estabelecidos.

O sistema é dotado de processadores e redes redundantes, normalmente proprietária, e permite uma descentralização do processamento de dados e decisões, através do uso de unidades remotas na planta. Além disso, o sistema oferece uma IHM que permite o interfaceamento com CLP<sup>®</sup>, controladores PID, equipamentos de comunicação digital e sistemas em rede.

É através das Unidades de Processamento, distribuídas nas áreas, que os sinais dos equipamentos de campo são processados de acordo com a estratégia programada. Estes sinais, transformados em informação de processo, são atualizados em tempo real nas telas de operação das Salas de Controle.

Os SDCDs foram introduzidos no mercado mundial em 1975, pioneiramente e simultaneamente pelas empresas Honeywell, de origem norte-americana, e Yokogawa, de origem japonesa, que desenvolveram respectivamente os sistemas TDC 2000<sup>®</sup> e CENTUM<sup>®</sup>. Posteriormente, no mesmo ano, a empresa US-based Bristol lançou o sistema denominado UCS 3000<sup>®</sup>. Em 1980, a empresa norte-americana Bailey (atualmente conhecida como ABB) introduziu no mercado o sistema NETWORK 90<sup>®</sup>.



Atualmente os SDCD utilizam linguagem de programação denominada *Function Block* (exemplificado na Figura 19), na qual é utilizados para a programação de lógicas e parametrização as estações de Engenharia que compõe o SDCD.

A *Function Block* é um meio de programação que permite especificar algoritmos ou conjuntos de ações aplicados aos dados de entrada. A estruturação desta programação é realizada através de conexões de blocos, e cada bloco possui uma função definida. Por exemplo, o bloco OR que executa a operação de lógica booleana OR.

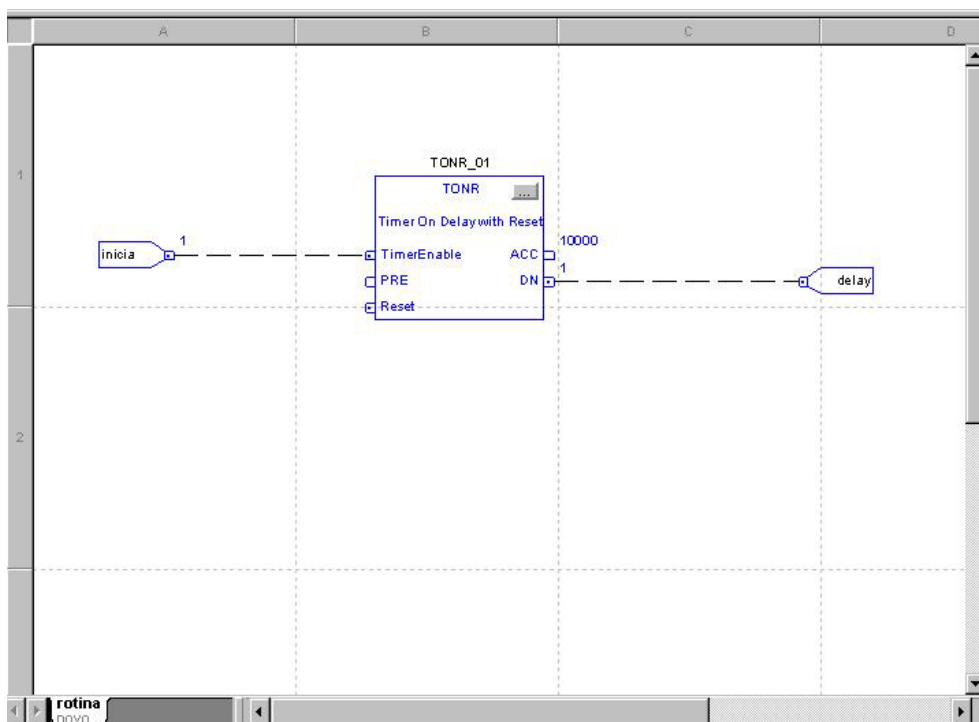


Figura 19 - Linguagem de Programação de SDCD Function Block.

#### 2.4.3.1 Arquitetura do SDCD

Um SDCD é um sistema composto de diversos equipamentos, sendo que os principais são:

- Unidade de Controle de Processo (PCU);
- Rede de comunicação entre PCU;
- Rede de comunicação entre Estações;
- Estação de Operação;

- Estação de Engenharia;
- Central de Dados;

A arquitetura de um SDCD típico é mostrada na Figura 20.

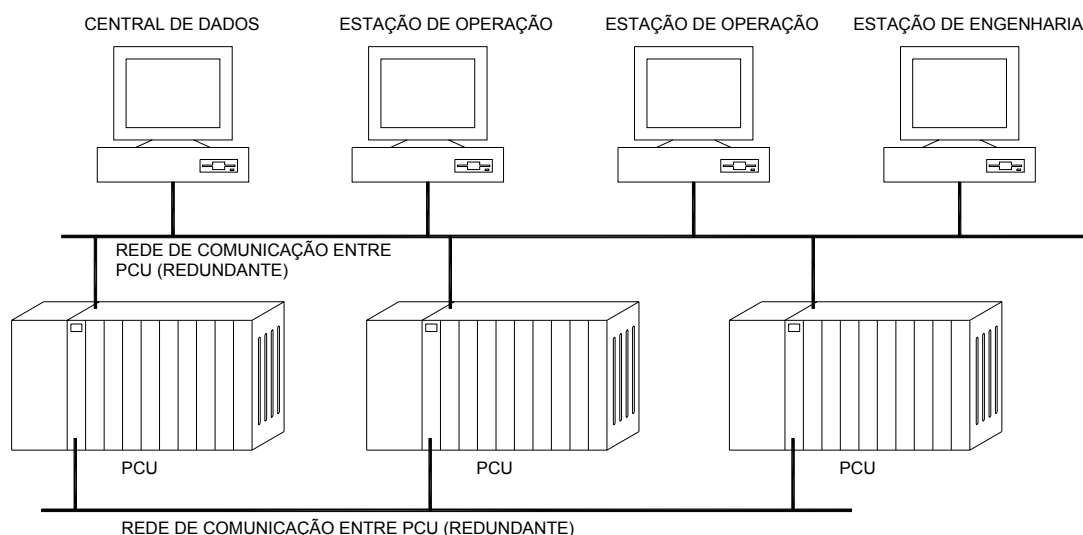


Figura 20 - Arquitetura SDCD.

A programação da lógica e do controle, e a parametrização do sistema são realizadas na Estação de Engenharia do SDCD. As Estações de Operação é responsável pela supervisão e operação do sistema quando este se encontra em funcionamento controlando o processo, sendo que estas estações não permitem parametrizações ou mudanças da lógica ou do controle do sistema.

A Central de Dados é responsável pela armazenagem de parâmetros do sistema e do histórico de algumas variáveis do sistema. Este pode ser considerado um servidor de dados do SDCD.

O SDCD possui basicamente dois níveis de rede, que normalmente apresenta característica determinística e proprietárias. O primeiro nível é a rede responsável pela comunicação entre as PCU, na qual os controladores trocam informações entres as áreas controladas. O segundo nível é a rede responsável pela transmissão de informações entre PCU e as Estações de Operação e Engenharia.

A PCU funciona como sub-sistemas de controle do SDCCD, ela possui arquitetura semelhante aos CLPs<sup>®</sup> conforme ilustração.

- Fonte de Alimentação;
- CPU;
- Memórias dos tipos fixo e volátil;
- Dispositivos de entrada e saídas (cartões I/O);

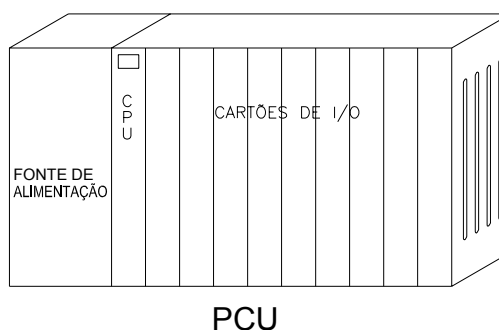


Figura 21 - Arquitetura do PCU.

Igualmente como o CLP<sup>®</sup>, a fonte de alimentação converte corrente alternada em contínua para alimentar o controlador. Caso falte energia, há uma bateria que impede a perda do programa do usuário. Ao se retornar a energia, o programa se reinicia.

A Unidade Central de Processamento é responsável pela execução do programa do usuário, atualização da memória de dados e memória-imagem das entradas e saídas.

As memórias podem ser divididas em quatro partes, memória EPROM, memória do usuário, memória de dados e memória-imagem das entradas e saídas. A memória EPROM contém o programa monitor elaborado pelo fabricante que faz o inicialização do controlador, armazena dados e gerencia a seqüência de operações. Este tipo de memória não está acessível ao usuário do controlador programável. A memória do usuário armazena o programa aplicativo do usuário. A CPU processa esse programa, atualiza a memória de dados internos e imagem entrada e saídas e retorna novamente para essa área da memória.

Os módulos de entradas e saídas correspondem aos cartões nos quais são feitas as ligações físicas dos sensores, atuadores chaves, seletoras, botões, etc provenientes do processo de controle.

#### 2.4.3.2 Funcionalidade do SDCD<sup>®</sup>

Inicialmente os SDCDs era empregados para controle de plantas indústrias de processos contínuos que possuem predominância sinais analógicos. Ao contrário dos CLP<sup>®</sup>, os SDCDs foram desenvolvidos de forma integrada, sendo implementados para controlar deste parte de uma planta industrial até mesma a planta inteira.

Ao decorrer da evolução tecnológica, os SDCDs tiveram seu custo reduzido e diminuíram seu porte físico, sendo que atualmente um SDCD possui tamanho similar ao CLP<sup>®</sup>.

Devido a sua configuração mais complexa, os SDCDs são capazes de realizar funcionalidades mais complexas como MES (normalizados pela ISA SP 95), que consiste na organização do fluxo de informações, e permite o gerenciamento do processo produtivo pelo sistema cooperativo, e até mesmo aplicações mais sofisticadas como o controle Avançado.

#### 2.4.4 *Convergência das Tecnologias de Automação Industrial*

Historicamente, os SDCD foram fortemente difundidos na automação de indústrias de processo contínuos, por outro lado os CLP<sup>®</sup> foram empregados na indústria manufatureira. Todavia, com os avanços tecnológicos tanto no campo da microeletrônica quando no campo da informática resultou na convergência das tecnologias de automação industrial.

Atualmente um CLP<sup>®</sup> possui funcionalidades que antes só eram possíveis aos SDCD, ainda se agregado às tecnologias das redes indústrias de protocolo aberto, os CLPs<sup>®</sup> podem realizar funções antes apenas dedicadas aos SDCDs. Por outro lado, os SDCDs tiveram seu custo reduzido ao longo dos anos e deixaram de possuir redes de comunicação com protocolo fechado.

Atualmente, devido a protocolos de comunicação abertos e redes não proprietárias, os sistemas de automação industrial modernos utilizam-se equipamentos de

diversos fabricantes. As sistemas de automação industrial que utilizam controladores do tipo SDCD e CLP<sup>®</sup> em conjunto são denominados sistemas híbridos.

Os sistemas híbridos não possuem influência direta nas instruções PID, já que funcionalmente a atuação em conjunto dos controladores não afeta o desempenho individual de cada controlador. Mas os sistemas híbridos fornecem uma flexibilidade na solução de automação industrial muito importante atualmente.

Como as instruções PID não apresentam características diferentes de uma instrução PID implementada em outros controladores, também recomenda-se a utilização da metodologia sugerida neste trabalho de pesquisa para aferir os sistemas híbridos.

## 2.5 Instruções PID em Controladores Comerciais

As instruções PID apresentadas no capítulo 2.2.3.2. são padrões de implementação das equações PID. Porém, para utilização em processos industriais, alguns detalhes devem ser considerados para garantir a funcionalidade e operacionalidade do sistema de controle. Adicionalmente, cada fabricante implementa o algoritmo de forma particular, de acordo com a tecnologia desenvolvida pelo mesmo. Dessa forma, é grande o número de parametrizações de controladores PID existentes em plataformas comerciais e operando diariamente nas indústrias de todo o mundo.

Para fazer o ajuste dos parâmetros do controlador, necessita-se conhecer a estrutura e parametrização do mesmo, o que lamentavelmente, nem sempre está disponível nos manuais dos fabricantes. Não raro, alguns fabricantes desenvolvem novos artifícios para melhorar o desempenho ou facilitar o ajuste, como filtros ou outros mecanismos, e os utilizam como diferenciais do produto no mercado. Dessa forma, tais artifícios não são abertos aos usuários, tornando-os dependentes do desenvolvedor da tecnologia, e limitando, principalmente, a exploração de todas as potencialidades disponíveis nestes sistemas de controle. A seguir são discutidas algumas características que devem ser levadas em conta para aplicação em nível industrial do controlador PID.

### 2.5.1 *Transição Manual-Automático*

Nos antigos controladores PID pneumáticos, a transição do modo de operação manual (malha aberta, sem controlador) para o modo automático (malha fechada, com

controlador) não era um procedimento simples, devido à necessidade de redirecionar o fluxo do suprimento de ar da válvula pneumática, para passar através de um mecanismo regulador. Dessa forma, o controlador seria capaz de alterar o fluxo de ar, variando a pressão exercida sobre a cabeça da válvula e, conseqüentemente, a sua posição.

Mas o principal problema envolvido neste procedimento era a ocorrência de um salto inicial indesejado na ação de controle, o chamado *bump*. Como o valor de referência da variável controlada era normalmente ajustado através de um botão, ou algum mecanismo similar, ele possuía memória, guardando a última posição selecionada. Ao entrar no modo automático, este valor poderia diferir consideravelmente do valor medido da variável controlada. Este sinal de erro inicial produzia uma ação corretiva, tão maior quanto maior o ganho do controlador, causando uma variação brusca na ação de controle. Na prática, isto podia ser minimizado, selecionando um valor de referência mais próximo possível do valor medido antes de ligar o controlador, o que continuava sendo dependente da ação do operador.

Ao longo dos anos, diversas tecnologias foram desenvolvidas para evitar este problema. Contudo, com o advento dos controladores digitais, a solução ficou bem mais fácil. Atualmente, implementações inteligentes (chamadas de *bumpless*), conseguem eliminar este problema através de um simples processo de inicialização (maiores detalhes em GRAEBE e AHLÉN, 1996). Ao entrar em modo automático, o controlador faz a primeira leitura da variável controlada e força a variável de referência para este valor, produzindo um sinal de erro inicial nulo. Após a inicialização, este valor pode ser alterado normalmente pelo operador e ao sair de operação, o valor de referência atual do controlador é apagado, sendo definido novamente, no próximo processo de inicialização.

### 2.5.2 Normalização das Variáveis

Uma característica bastante comum nos controladores existentes em pacotes comerciais é a normalização das variáveis envolvidas no cálculo das ações de controle. Este procedimento visa escalonar as variáveis de diferentes tipos de processo, utilizando uma escala padrão, normalmente a própria faixa de operação admissível da variável. Isto evita a utilização de valores extremos (muito baixos ou elevados), que são um problema para sistemas de controle digitais discretos, devido a erros de precisão, truncamento ou da própria operacionalidade dos cálculos. Além disso, o escalonamento evita a

preocupação com a especificação das unidades das variáveis, pois assim, elas ficam padronizadas em valores percentuais de uma faixa de operação específica.

Os algoritmos que utilizam as variáveis normalizadas no cálculo também geram ações de controle normalizadas, que devem ser tratadas (desnormalizadas) para efetiva aplicação no processo. Neste caso, cabe ressaltar que o ganho do controlador (e eventualmente outros parâmetros), também são normalizados e merecem especial atenção no momento do ajuste.

Normalmente, indica-se métodos específicos para ajuste, ou no caso da utilização de métodos clássicos (ZIEGLER e NICHOLS, 1942), deve-se realizar algum procedimento de conversão. Em alguns casos, em vez de especificar o valor do ganho proporcional, especifica-se o valor percentual da banda proporcional, conforme Equação 6.

Uma preocupação adicional está relacionada com as constantes de tempo integral e derivativa (respectivamente  $T_I$  e  $T_D$ ). Estas variáveis possuem unidades de tempo (segundo, minuto ou hora), e como tal devem ser consideradas para efeitos de ajuste. Em certos casos, a resposta do controlador torna-se insatisfatória pela não observância destes preceitos, que podem ser específicos para cada sistema de controle.

### 2.5.3 Integração Excessiva em Caso de Saturação

Quando o valor da variável manipulada alcança uma restrição operacional (limites máximo ou mínimo) do atuador, ocorre a saturação do sinal de controle. Isto equivale a perder um grau de liberdade no sistema de controle, pois o atuador permanecerá no respectivo limite, independentemente da saída do processo, até que o mesmo saia da restrição.

Quando isto ocorre e o controlador possui ação integral, o sinal de erro continuará a ser integrado, acumulando a saída da ação integral. Assim, a ação de controle permanece na saturação além do tempo necessário, até que todo este erro integrado excessivamente seja cancelado por um sinal de erro de sinal oposto. Este fenômeno é conhecido por *wind-up*, e este é responsável por tornar a resposta transitória do sistema lenta e oscilatória, características extremamente indesejadas em processos industriais.

Dessa forma, a quase totalidade dos controladores PID existentes em pacotes comerciais possui alguma estratégia de modo a minimizar ou eliminar este efeito indesejado (estratégias *anti wind-up*). Antigamente, os fabricantes de controladores

analógicos inventaram e incorporaram diversas destas estratégias em seus controladores de forma secreta, e sua funcionalidade acabava se tornando característica para competição de mercado. Em alguns casos, elas não atuavam de forma satisfatória, e não raro, acabavam limitando a própria performance do controlador.

Com o advento dos controladores digitais, o problema voltou à tona. Novas estratégias foram desenvolvidas e tornaram-se mais comuns, como: integração condicional e chaveamento da ação integral, onde a mesma é desativada em caso de saturação ou outros casos específicos, onde o termo integral é corrigido dinamicamente através da adição de uma nova constante de tempo, de forma que a ação de controle permaneça no valor limite do atuador em caso de saturação; e outras incorporadas no algoritmo de cálculo são muito usadas (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 1995).

Cabe ressaltar que algoritmos de controlador PID digitais implementados na forma incremental, também chamada forma velocidade, apresentam estratégia *anti-wind-up* intrínseca, pois a ação de controle calculada a cada tempo de amostragem é o incremento a ser adicionado à ação de controle. Em caso de saturação, o incremento só é adicionado quando o mesmo fizer a variável manipulada sair da condição de saturação. Além de simples, esta técnica não apresenta as desvantagens das anteriores, como a desativação da ação de controle em certas condições e a adição de mais um parâmetro de ajuste.

#### 2.5.4 Limitações da Ação Derivativa

A função de transferência do modo de controle derivativo implica em um ganho que cresce com o aumento da frequência, tornando o controlador muito sensível a distúrbios de alta frequência, como ruídos de processo e variações do tipo degrau no valor da variável de referência. Assim, na prática a ação derivativa é implementada com a introdução de um filtro de primeira ordem, cujo pólo que tem a função de limitar o ganho do controlador em altas frequências, evitando assim, a propagação de ruído (BAZANELLA e SILVA JR., 1999). Dessa forma o modo de controle derivativo é dado, tipicamente, pela Equação 10.



$$D(s) = \frac{T_d \cdot s}{\alpha \cdot T_d \cdot s + 1}$$

onde:  $D(s)$  é a parcela derivativa da equação PID

$\alpha$  é uma constante de ajuste do filtro passa-baixo

Equação 10 - Parcela Derivativa com filtro passa-baixo da equação PID.

Quanto menor o valor de  $\alpha$ , mais próximo da ação derivativa pura. Em alguns controladores, este é um parâmetro de ajuste, em outros casos, entretanto, possui um valor fixo (normalmente 0,1). A existência deste filtro torna muito mais difícil a conversão dos parâmetros entre as diversas formas a equação PID.

O motivo da ação derivativa apresentar uma grande sensibilidade a mudanças no valor de referência da variável controlada deve-se ao fato destas mudanças serem realizadas na forma de um degrau, cuja derivada é um impulso. Dessa forma, o controlador com ação derivativa apresentará uma alteração brusca na ação de controle, produzindo uma sobrelevação excessiva indesejada no processo e causando, muitas vezes, saturação na variável manipulada. A ação derivativa com filtro ameniza tal problema, contudo, para eliminá-lo na prática, opta-se por utilizar a ação derivativa atuando somente sobre a variável controlada (PV), ao invés do sinal de erro. Este procedimento, além de usual, é muitas vezes imprescindível.

### 2.5.5 Implementações Digitais em Controladores

Para utilização do algoritmo de controle PID em sistemas digitais, é necessária a sua conversão para a forma discreta, onde uma nova ação de controle é executada após um intervalo regular de tempo, denominado tempo de amostragem. Dentro do intervalo entre cada tempo de amostragem, a ação de controle é, normalmente, mantida constante. Neste processo de conversão, no entanto, os operadores integral e derivada necessitam ser aproximados por operações discretas equivalentes.

O resultado obtido com o algoritmo PID discreto é também dependente do tempo de amostragem escolhido. Quanto menor o tempo de amostragem, mais próxima da ação

original fica a ação discreta, porém, maior é a carga computacional requerida e maiores podem ser os erros numéricos envolvidos nos cálculos. Na verdade, a escolha do tempo de amostragem adequado requer um certo compromisso entre o esforço computacional e a obtenção de informações suficientes da dinâmica do processo a ser controlado. Na prática, aconselha-se a utilização de um tempo de amostragem menor que um quinto do valor do tempo de subida do sistema, pois assim ele é capaz de capturar a dinâmica do sistema de forma adequada. O efeito do tempo de amostragem sobre o desempenho de um sistema de controle não será analisado neste trabalho, porém, para maiores informações, recomenda-se consultar ÅSTRÖM e WITTENMARK (1997) ou CORRIPIO (2001).

### 3. METODOLOGIA “MAFPID”

Com o avanço da tecnologia nas últimas décadas, a grande parte dos controladores industriais possuem instrução PID, conforme já descrito neste trabalho. Esta instrução é implementada nos controladores de uma forma não padronizada, ficando ao critério do fabricante modo de execução e os números de parâmetros de ajuste da mesma.

Uma das grandes dificuldades dos engenheiros de automação é configurar os parâmetros da instrução de controle PID de tal forma a permitir um bom desempenho do sistema de automação. Para tanto, o engenheiro de automação deve ter o conhecimento da teoria de controle e da modelagem do processo a ser controlado e, um razoável conhecimento sobre o controlador industrial utilizado.

Apesar que uma boa modelagem de processo auxilia na obtenção de um bom controle, esta depende de investimentos de tempo e recursos da engenharia de automação para determinação das equações pertinentes a deste sistema. Existem diversas técnicas de modelagem e determinação de equações de processos industriais, mas estas não são temas deste trabalho de pesquisa.

Observando em outro foco o uso das instruções PID para controlar processos industriais, depara-se no fato da existência de inúmeros controladores industriais dos mais diversos fabricantes. O fato é que um mesmo fabricante pode implementar em controladores diferentes diversas forma de executar a instrução PID. Sendo que o critério para esta implementação está atrelado a questões de mercado como o fornecimento de um controlador de menor custo ao mercado, ou de desenvolvimento como um algoritmo de execução mais rápido, ou até de simplificação de produto.

Dentro da realidade atual da automação industrial, o engenheiro de automação deve ser um profissional dinâmico capaz de estudar os diversas documentações tais como manuais, catálogos e referências, a fim de desenvolver soluções de automações e controle industrial.

Porém, existem muitos manuais de produtos não apresentam informações suficientes para que facilite o engenheiro de automação a otimizar controle do processo. E também podem existir fatores limitantes do controlador que o engenheiro de automação desconhece, ou por falta de documentação ou por desconhecimento do produto.

A partir deste problema é proposto, este trabalho de pesquisa visa o desenvolvimento de uma metodologia de aferição da instrução PID para controladores industriais denominado MAFPID. Esta metodologia é o conjunto de Etapas bem definidas para avaliar o desempenho e as limitações do controlador industrial, dando subsídios ao engenheiro de automação industrial para conhecer melhor o controlador aferido.

Desenvolveu-se a MAFPID para ser aplicada tanto em controladores industriais que ainda serão implementados em processo industrial, como em controladores industriais já implementados e atuando no processo industrial. E no último caso, com cuidado em desativar a operação do controlador quando o mesmo for aferido.

Conforme descrita anteriormente, a MAFPID não é uma metodologia de ajuste e otimização de parâmetros da instrução PID ( $K_P$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ). Apesar de neste trabalho de pesquisa utilizou-se técnicas consagradas de ajuste de parâmetros PID como ferramenta para estruturação das Etapas do MAFPID.

A metodologia deve possuir três características fundamentais:

- **Praticidade:** a MAFPID deve ser aplicada com relativa facilidade sem a necessidade de grandes recursos.
- **Confiabilidade:** a MAFPID deve ter a capacidade de desempenhar, sem falhas, sua função de aferir a instrução PID sob determinadas condições.
- **Assertividade:** a MAFPID deve resultar em conclusões com o mínimo de erro possível, sendo que estas conclusões.

A MAFPID é estruturada em três Etapas, conforme diagrama da Figura 22. A primeira Etapa, denominada Documentação e Referências, consiste na busca de informações do fabricante através de consultas a manuais, referências, catálogos, janelas de ajuda dos softwares, etc., com a finalidade do engenheiro de automação obter informações importantes do funcionamento da instrução PID. A segunda Etapa, denominada Teste do Controlador Isolado, refere-se a testes das ações proporcional, integral e derivativa com o controlador industrial desconectado de qualquer dispositivo, cuja finalidade estabelecer métricas de referência para a Etapa posterior. A terceira Etapa, denominada Teste de Aferição com Simulador Analógico, consta de uma

simulação da atuação da instrução PID a partir de um circuito analógico. Eventualmente na impossibilidade de se obter um simulador analógico esta Etapa pode ser tercerizada. Entretanto a análise final deve ser efetuada pela engenharia de automação.

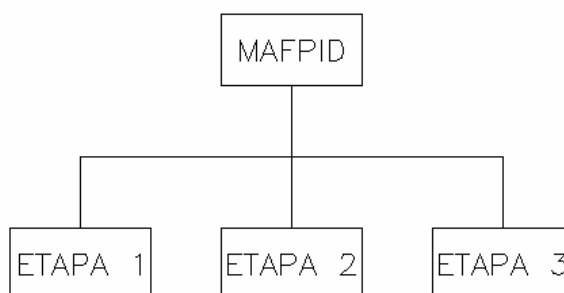


Figura 22 - Diagrama da metodologia MAFPID

Para melhor demonstrar as atividades relacionadas a metodologia de aferição MAFPID a Figura 23 ilustra o fluxograma simplificado da MAFPID.

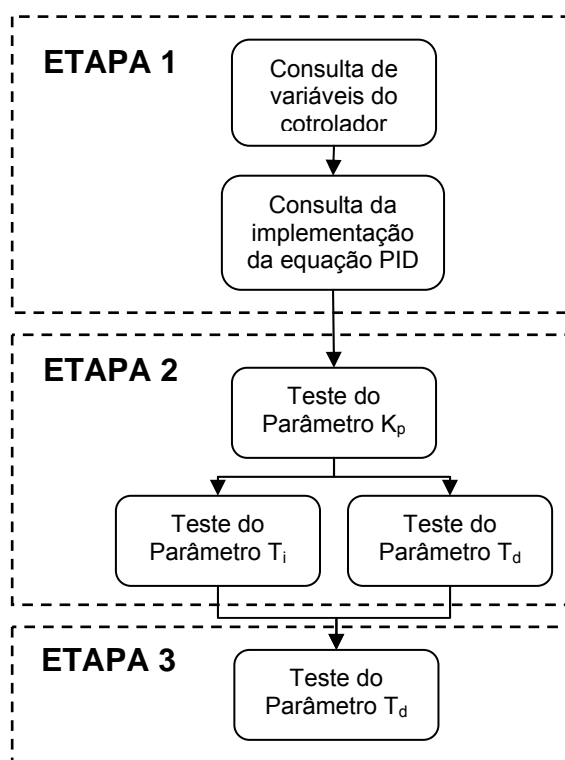


Figura 23 - Fluxograma simplificado da MAFPID.

Ao final de cada Etapa da MAFPID pode-se obter algumas conclusões preliminares. No final da Etapa 1 pode-se definir os limites de operação tanto do algoritmo quanto do modo de operação do controlador, como tempos de operação, limites de tensão de entrada e saída, etc. No final da Etapa 2 verifica-se a funcionalidade do algoritmo da instrução PID utilizada, e também aferir os parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ). No final da Etapa 3, existe a possibilidade de responder se a instrução PID está dentro das especificações do fabricante, além de aferir a instrução PID implementada no controlador. Nos capítulos 3.1, 3.2 e 3.3 descreve-se com detalhes cada Etapa da metodologia MAFPID.

### 3.1 Etapa 1 - Documentação e Referências

A primeira Etapa consiste em consultar os manuais, catálogos, referências, janelas de ajuda de software ou quaisquer outras especificações fornecidas pelo fabricante do controlador industrial. A grande motivação desta Etapa é o fato que cada fabricante trabalha com configurações e parametrização diferentes. Sendo que não existe um padrão nos controladores industriais comerciais. Neste trabalho indica os principais variáveis de ajuste, parâmetros e configurações que se deve procurar nas documentações do fabricante. Alguns fabricantes fornecem informações mais detalhas que pode ser fundamentas para o conhecimento da instrução PID implementada no controlador. De modo geral, a maioria das informações indicadas neste trabalho está presente no documento usualmente denominado Manual do Usuário fornecido junto com o controlador industrial. Basicamente, deve-se buscar as seguintes informações:

- os limites de alimentação do cartão de entrada e saída (tensão ou corrente);
- tempo de conversão analógico-digital;
- tempo de atualização dos valores no controlador;
- erro na conversão analógico-digital (tamanho da palavra);
- forma de execução da instrução PID;

- forma de execução da parcela integral da instrução PID;
- forma de execução da parcela derivativa da instrução PID;
- configurações gerais do controlador.

Os cartões de entrada e saída não podem operar com sinais acima dos limites de tensão e de corrente estabelecidos pelo fabricante, pois pode danificar o equipamento. Os tempos de conversões analógico-digitais e de atualizações dos valores devem ser muito menor que o tempo de variação do sistema a ser controlado, caso contrário compromete a eficácia do controle.

O erro de conversão analógico-digital é importante para definir a sensibilidade do sinal de entrada do controlador. Qualquer variação de sinal de entrada inferior a este erro não será percebida pelo controlador industrial.

Tanto a implementação da instrução PID quanto o modo de execução desta é fundamental para o desempenho do controle já que equações PID diferentes acarretam ajuste de parâmetros PID diferentes, conforme explanado no capítulo 2.2.3.2.

É importante verificar qual é o ciclo de cálculo que o controlador executa a instrução PID. Alguns controladores possuem ajuste de ciclo de cálculo. Basicamente neste ajuste, o usuário seleciona se o controlador executará o cálculo de instrução PID sincronizada com a execução de outros algoritmos de controle ou se o cálculo da instrução PID seguirá um ciclo independente do ciclo de cálculo normal controlador. A seleção incorreta deste parâmetro acarretará em queda do desempenho do controlador ou até mesmo instabilidade no controle.

Também deve-se verificar as dimensões que os parâmetros Integral e Derivativo possuem no controlador, já que estas podem assumir estacas de tempo em segundos, minutos e horas. A não verificação destas dimensões pode resultar em instabilidade no controle.

Alguns fabricantes fornecem informações extras sobre a instrução PID que poderá ser relevante na metodologia como modos de configuração de tempo morto, constante de filtro passa-baixo para a parcela derivativa da instrução, modo de cálculo do erro (PV-SP ou SP-PV), entre outras.

### 3.2 Etapa 2 - Teste do Controlador Isolado

Nesta Etapa metodologia consiste nos ensaios do controlador isolado. A mesma consiste em verificar a execução da instrução PID de cada parâmetro (Proporcional, Integral e Derivativo). Esta Etapa, realiza-se com o controlador isolado, sem conexões de entrada ou saída, sendo a variável de processo gerado por funções matemáticas utilizando o software de programação do próprio controlador testado. A finalidade esta Etapa é aferir o algoritmo PID implantado no controlador, e não é possível tirar conclusões sobre os dispositivos do controlador como módulos de conversão A/D e D/A.

Antes de iniciar a Etapa 2, é importante recorrer as informações verificadas na Etapa anterior. A verificação das funcionalidades de parâmetros como tempo e modo de execução do cálculo, o uso de filtro passa-baixo na parcela derivativa da instrução, entre outros podem acarretar resultados inconstantes nesta Etapa.

Definiu-se estes ensaios em três partes. A primeira testando o comostamento a parcela proporcional da instrução PID. A segunda testando o comostamento a parcela integral da instrução PID. A terceira testando o comostamento a parcela derivativa da instrução PID. A idéia da implementação destes teste é de fornecer uma resultado de fácil análise ao engenheiro de automação que utiliza a MAFPID. Além disso, todos os algoritmos utilizados nesta Etapa 2 são as formas mais simples para testar o comostamento de cada parcela da instrução PID.

O primeiro parâmetro a ser testado é Proporcional ( $K_P$ ). É configurada a instrução PID com os valores de SP, PV e  $K_P$  constantes.

Na Figura 24 é mostrado o diagrama do teste do parâmetro  $K_P$ , como o erro (SP-PV) é constante, CV é um valor constante que é resultante do produto do erro com  $K_P$ , conforme a expressão padrão ISA para cálculo PID.



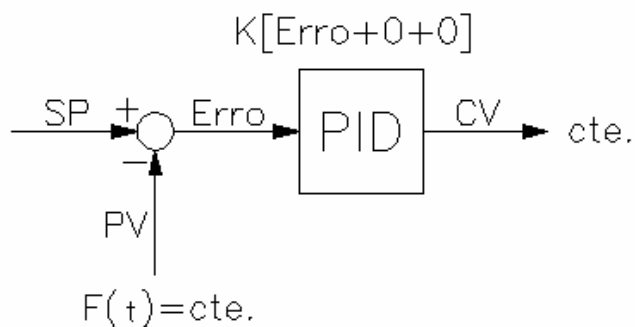


Figura 24 - Diagrama do teste do parâmetro proporcional ( $K_P$ ).

A resposta esperada na saída da instrução PID para o teste do parâmetro  $K_P$ , é ilustrado na Figura 25. O sinal é representado de forma adimensional, sendo que CV pode assumir valores menores que Erro dependendo do valor de  $K_P$  assumido.

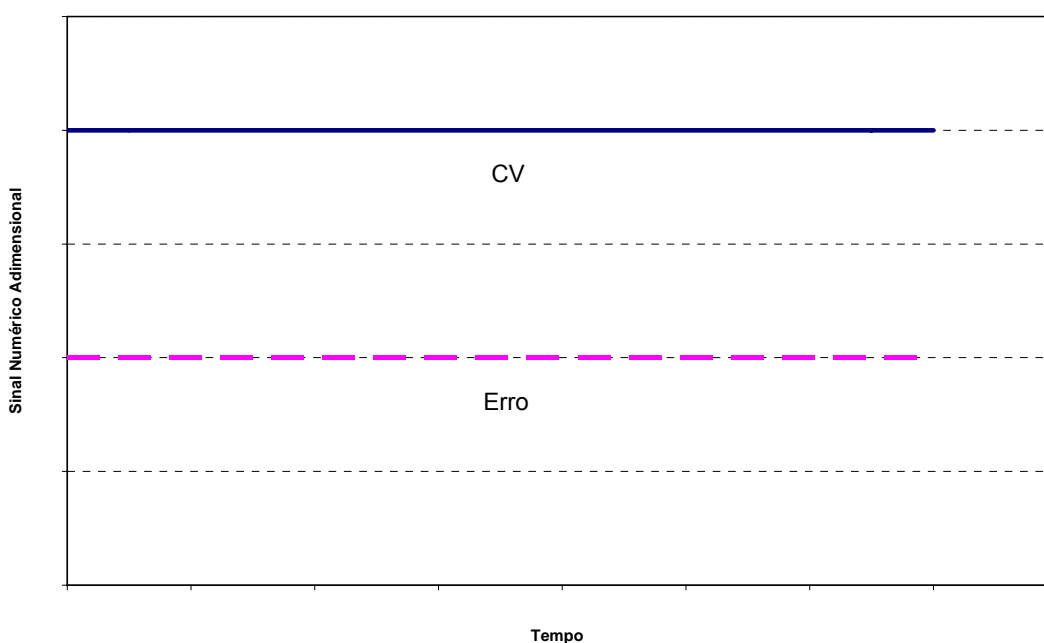


Figura 25 - Resposta esperada no teste do parâmetro  $K_P$ .

Na execução deste teste deve-se variar o valor do parâmetro  $K_P$ , e os resultados obtidos devem possuir a mesma proporção as constantes utilizadas. No caso dos resultados obtidos não respeitarem a proporção, mas apresentarem uma linearidade em

relação a variação das constantes realizadas, sugere-se definir um fator corretivo ao parâmetro  $K_P$  a partir do desvio da proporcionalidade constatada. Caso este fator corretivo não seja facilmente definido, ou que a instrução PID não possua resultados proporcionais em relação aos valores dos parâmetros  $K_P$  utilizados, deve-se reprová-la no teste do parâmetro  $K_P$ .

Utilizou-se um erro constante na instrução PID, pois esta é a forma mais simples de testar a característica de proporcionalidade que esta parcela deve possuir.

Uma vez validado o funcionamento do parâmetro proporcional, é testado o parâmetro integral. Configura-se valor unitário no parâmetro  $K_P$ , valores constantes no parâmetro integral e em SP. O valor unitário no parâmetro  $K_P$  é necessário para que o teste não seja influenciado pelo tipo de equação PID utilizada na instrução.

Na Figura 26 mostra-se o diagrama do teste do parâmetro  $T_i$ , como o erro (SP-PV) é constante e  $K_P$  é unitário, CV é uma função linear do tempo, tendo o coeficiente linear o produto do erro e inverso do parâmetro  $T_i$  somado ao erro inicial, padrão ISA para cálculo PID.

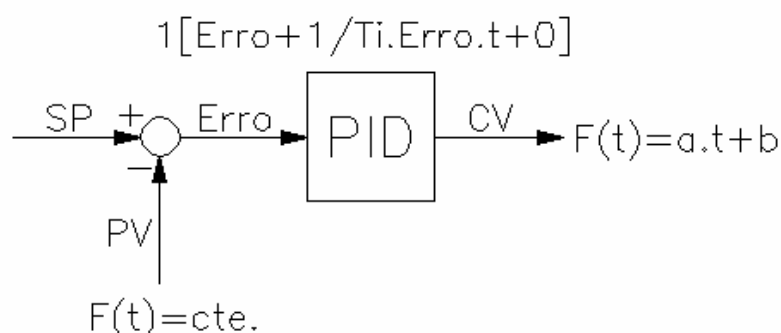


Figura 26 - Diagrama do teste do parâmetro integrativo ( $T_i$ ).

A resposta genérica esperada na saída da instrução PID para o teste do parâmetro  $T_i$ , é ilustrado na Figura 27. O sinal é representado de forma adimensional.

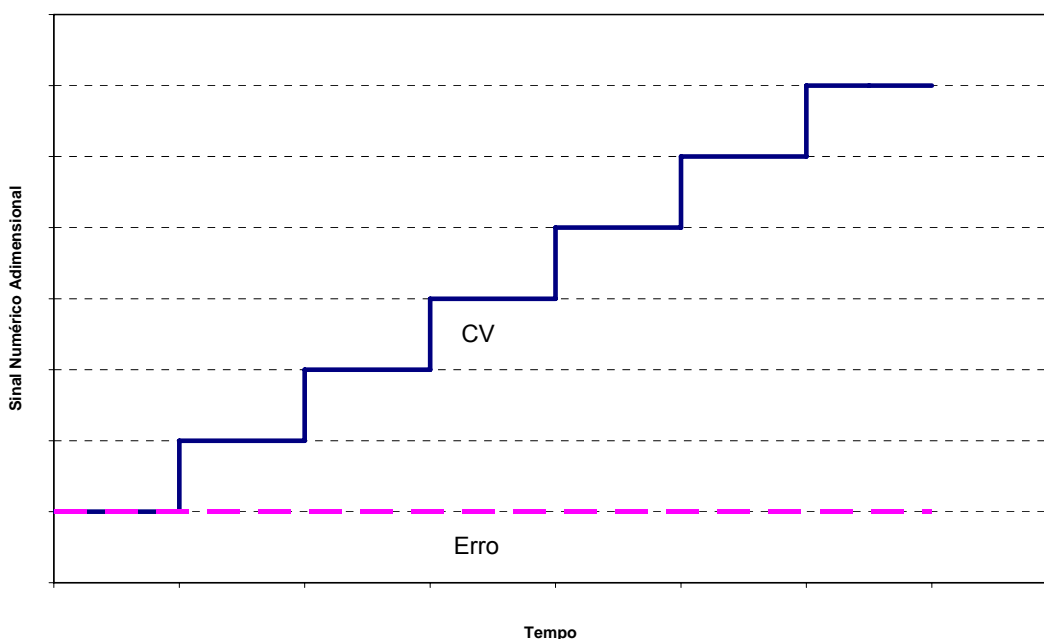


Figura 27 - Resposta esperada no teste do parâmetro  $T_i$ .

Na execução deste teste deve-se variar o valor do parâmetro  $T_i$ , e os resultados obtidos devem possuir declividade proporcional em relação as constantes utilizadas. No caso dos resultados obtidos não respeitarem esta proporção, mas apresentarem uma linearidade em relação a variação das constantes realizadas, sugere-se definir um fator corretivo ao parâmetro  $T_i$  a partir do desvio da proporcionalidade constatada. Caso este fator corretivo não seja facilmente definido, ou que a instrução PID não possua resultados proporcionais em relação aos valores dos parâmetros  $T_i$  utilizados, deve-se reprovar o a instrução PID no teste do parâmetro  $T_i$ .

Utilizou-se um erro constante na instrução PID, pois este é forma mais simples de testar a característica acumulativas na saída que esta parcela deve possuir.

O teste do parâmetro derivativo ( $T_D$ ) é realizado mantendo o parâmetro  $K_P$  unitário e SP constante, porém é configurado PV para uma função linear.

Na Figura 28 é mostrado o diagrama do teste do parâmetro  $T_D$ . PV é uma função linear, assim o erro e CV são funções lineares com coeficientes negativos, conforme a expressão padrão ISA para cálculo PID. Esta função linear é implementada a partir de temporizadores, em escala de milisegundos, fornecidos na lista de instruções de programação do controlador.

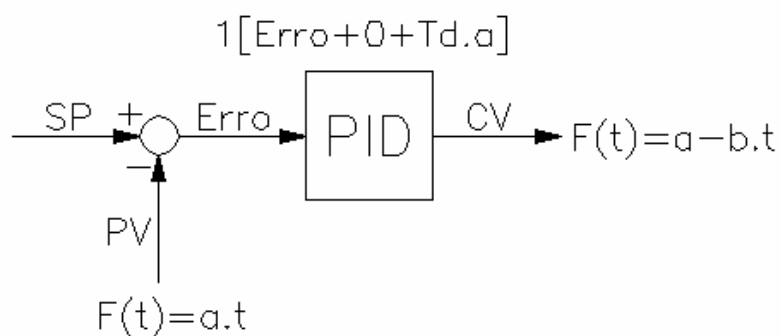


Figura 28 - Diagrama do teste do parâmetro derivativa ( $T_d$ ).

A resposta genérica esperada na saída da instrução PID para o teste do parâmetro  $T_D$ , é ilustrado na Figura 29. O sinal é representado de forma adimensional.

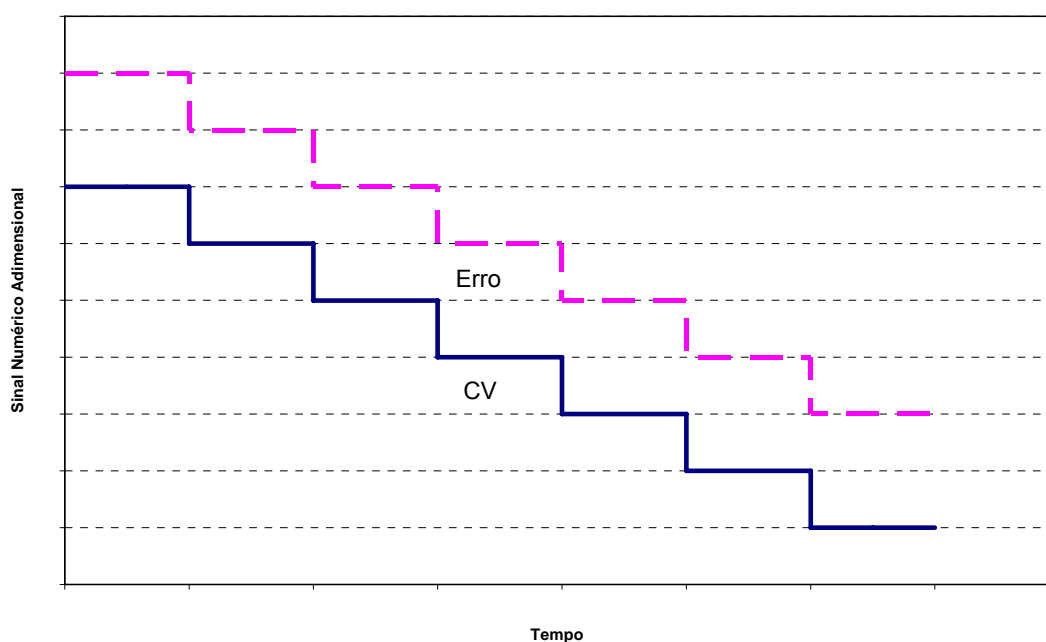


Figura 29 - Resposta esperada no teste do parâmetro  $T_D$ .

Deve-se atentar especialmente no teste do parâmetro derivativo a ativação do filtro passa-baixo. A implementação digital da derivada, dependendo o tempo de cálculo e/ou atualização da instrução, pode ocasionar um trem de pulsos na saída da instrução. E esta ação somada a ação do filtro passa-baixo resulta em distorções na saída da instrução, conforme a Figura 30.

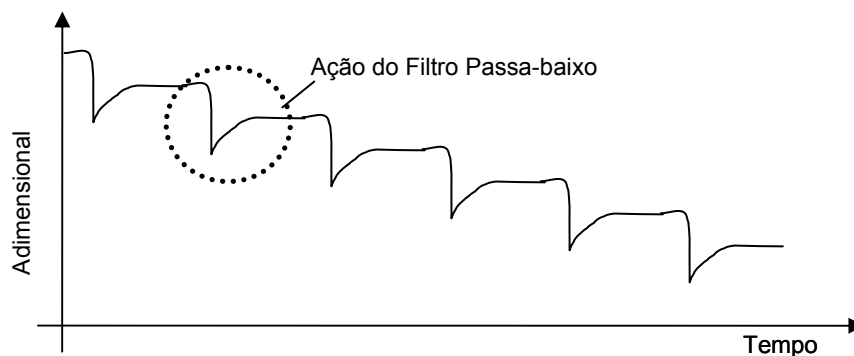


Figura 30 - Ação do filtro passa-baixo na saída da instrução PID.

Na execução deste teste deve-se variar o valor do parâmetro  $T_D$ , e as curvas resultantes devem transladar proporcionalmente em relação as constantes utilizadas. No caso dos resultados obtidos não respeitarem esta proporção, mas apresentarem uma linearidade em relação a variação das constantes realizadas, sugere-se definir um fator corretivo ao parâmetro  $T_D$  a partir do desvio da proporcionalidade constatada. Caso este fator corretivo não seja facilmente definido, ou que a instrução PID não possua resultados proporcionais em relação aos valores dos parâmetros  $T_i$  utilizados, deve-se reprovar o a instrução PID no teste do parâmetro  $T_i$ .

Utilizou-se um erro constante na instrução PID, pois este é forma mais simples de testar a característica acumulativas na saída que esta parcela deve possuir.

### 3.3 Etapa 3 - Teste de Aferição com Simulador Analógico

Defina-se a Etapa 3 por um teste do controlador aferido com um circuito analógico que simula a dinâmica de um processo industrial. Este circuito trata-se de um simulador analógico. Projetou-se este circuito para apresentar sistema amortecido de 2° ordem, sistema sub-amortecido de 2° ordem e sistema oscilatório de 3° ordem.

### 3.3.1 Simulador Analógico

Para a metodologia elaborada é utilizado um simulador analógico para fornecer o sinal de entrada e interage com controlador industrial. Um simulador analógico é o conjunto de componentes que realizam de certa forma operações matemáticas. No caso, foram utilizados dispositivos e componentes eletrônicos (amplificadores operacionais, resistores e capacitores) para reproduzem uma função de transferência. Estas foram calculadas a partir de diagramas de blocos. E cada bloco do diagrama é obtido por uma configuração ilustrada na Figura 31.

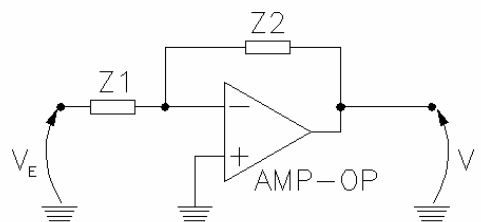


Figura 31 - Configuração para cada bloco do circuito do simulador analógico.

No circuito ilustrado há uma relação entre tensão de entrada ( $V_E$ ) e tensão de saída ( $V_S$ ) obtida pela expressão abaixo.

$$\frac{V_S}{V_E} = -\frac{Z2}{Z1}$$

Equação 11 - Relação da tensão de entrada e tensão de saída em um circuito AMP-OP.

Assim, cada bloco terá essa relação, para valores constantes as impedâncias são resistências, e para obter a variável complexa “s” foi utilizado capacitores e resistências.

Para os ensaios foram confeccionadas três funções de transferência. Estas funções foram calculadas com a finalidade de fornecer os comportamentos mais comuns em uma planta industrial, considerando as constantes de tempo e acomodação de um sistema real. Abaixo são mostrados os três sistemas com seus diagramas de blocos e função de transferência.

Diagrama de blocos do sistema de 2° ordem amortecido:

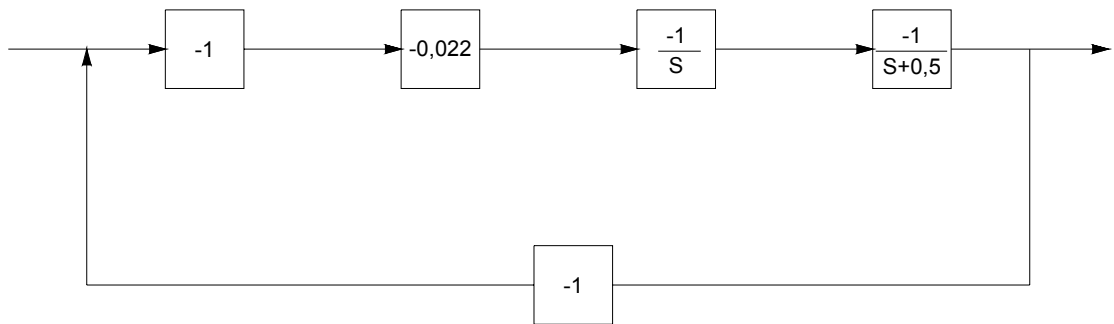


Figura 32 - Diagrama de blocos do sistema amortecido.

Função de transferência do sistema amortecido de 2° ordem.

$$F(s) = \frac{0,022}{s^2 + 0,5s + 0,022}$$

Equação 12 - Função de transferência do sistema amortecido de 2° ordem:

Sistema de 2° ordem sub-amortecido:

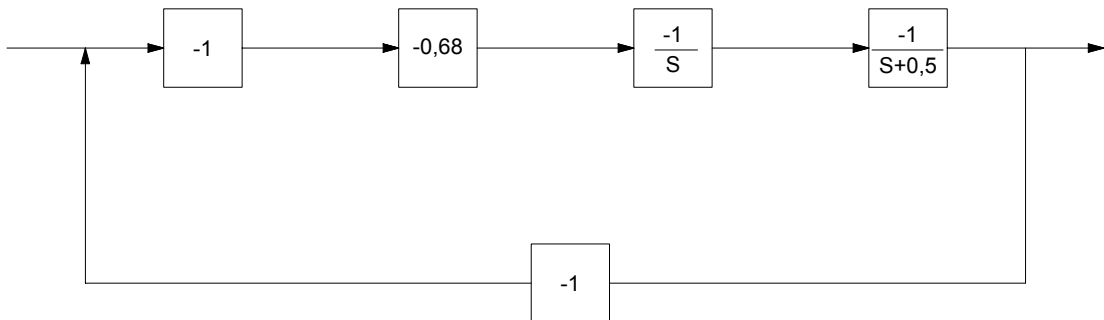


Figura 33 - Diagrama de blocos do sistema sub-mortecido.

Função de transferência do sistema sub-amortecido de 2° ordem:

$$F(s) = \frac{0,68}{s^2 + 0,5s + 0,68}$$

Equação 13 - Função de transferência do sistema sub-amortecido de 2° ordem

Sistema de 3° ordem oscilatório:

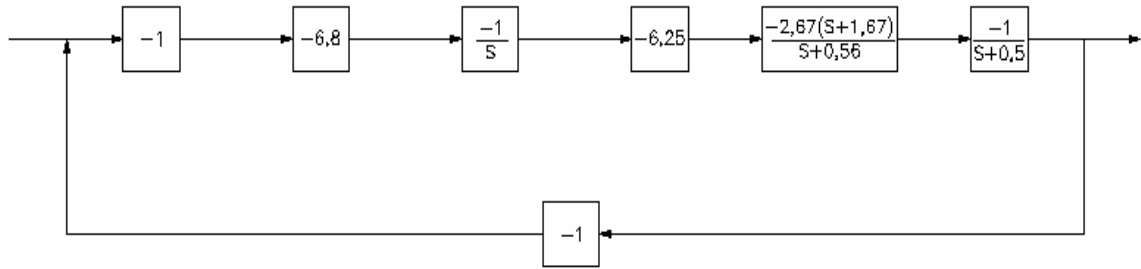


Figura 34 - Diagrama de blocos do sistema oscilatório.

Função de transferência do sistema oscilatório de 3° ordem:

$$F(s) = \frac{113,48(s + 1,67)}{(s + 1,651s)(s^2 - 0,615s + 114,76)}$$

Equação 14 - Função de transferência do sistema oscilatório de 3° ordem.

O circuito eletrônico sintetizado, ilustrado na Figura 35, é posto uma entrada padrão em degrau e chaves que permite a modificação do amortecimento e a ordem do sistema e tipo de malha (aberta ou fechada). A chave que introdução uma entrada padrão em degrau é necessária para a caracterização do comportamento transitório e estacionário do simulador analógico. Ainda há a possibilidade de inserir perturbações ao sistema através de um gerador de função, porém essas funcionalidades não serão utilizadas neste trabalho de pesquisa.

Apesar do desenvolvimento deste simulador analógico atender os requisitos para execução da Etapa 3, este também pode ser utilizado para outras finalidade, como por exemplo simulação de controle de processos, simulação de sistemas SCADA, simulação de sistemas supervisórios, etc.



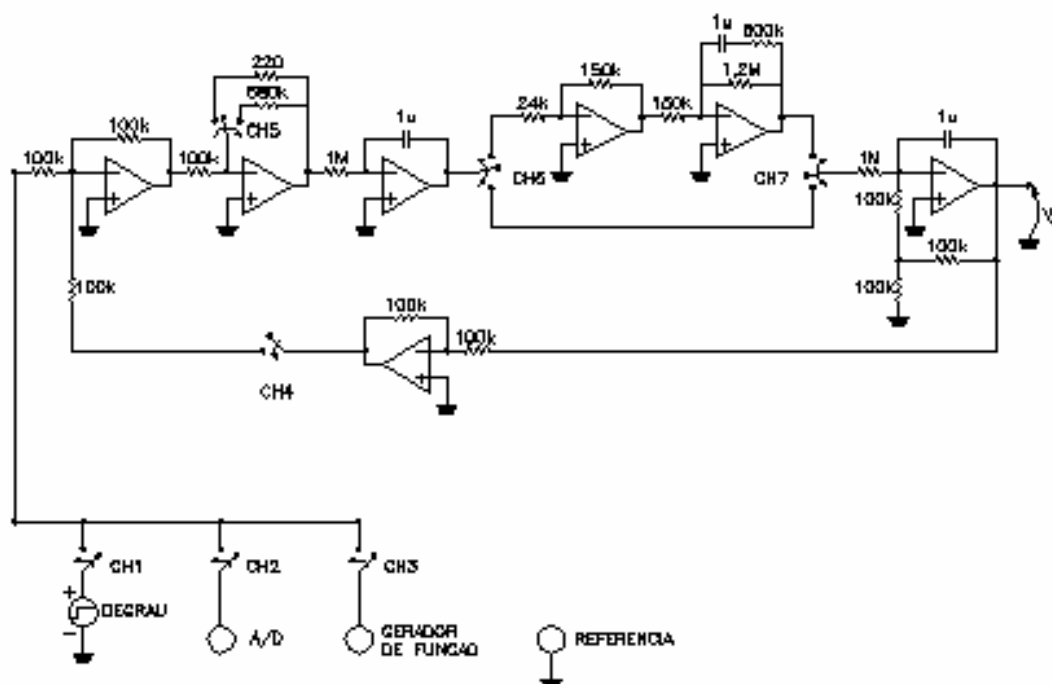


Figura 35 - Esquema do simulador analógico construído.

A partir do circuito eletrônico analógico projetado, montou-se o simulador analógico, e o mesmo afixou-se em uma caixa para facilitar o seu manuseio. A Figura 36 mostra o fotos do simulador analógico montado.

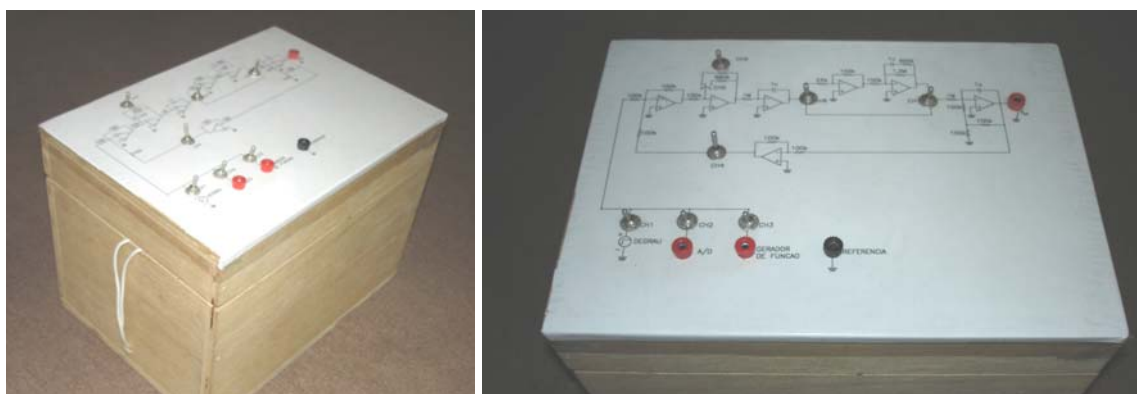


Figura 36 - Simulador analógico montado.

Aferiu-se o comportamento do Simulador Analógico a partir da medição da curva em resposta em degrau dos sistemas amortecido e sub-amortecido, e a estas curvas comparou-se com as curvas calculadas a partir das funções de transferências mostradas na Equação 12 e Equação 13 respectivamente. As Figura 37 e Figura 38 ilustram estas comparações.

Apesar do simulador possuir um comportamento de 3° ordem, este não foi aferido, pois não será utilizado neste trabalho de pesquisa.

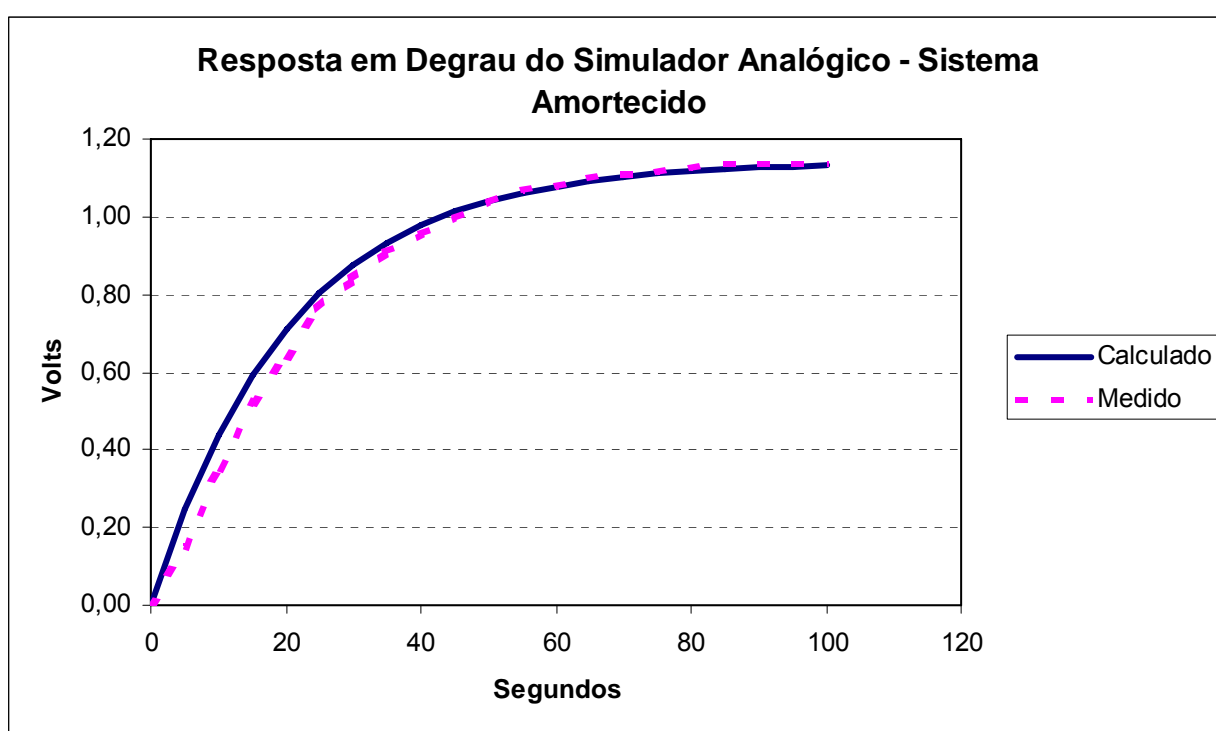


Figura 37 - Gráfico de Resposta em Degrau do Simulador Analógico para o Sistema Amortecido.

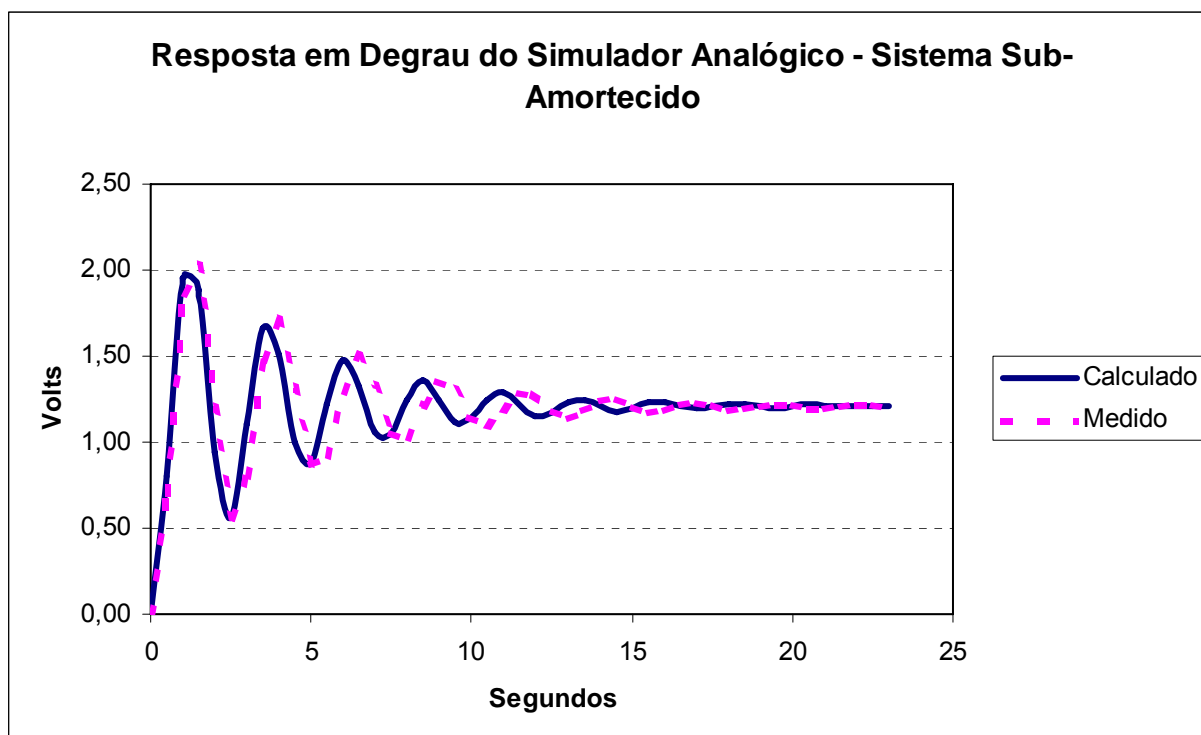


Figura 38 - Gráfico de Resposta em Degrau do Simulador Analógico para o Sistema Sub-amortecido.

A efeito de teste da Etapa 3, não é necessário utilizar o comportamento sub-amortecido de 2º ordem do simulador. Para a aferição de controladores é condição suficiente apenas utilizar o comportamento amortecido de 2º ordem do simulador

### 3.3.2 Descrição da Etapa 3 - Teste de Aferição com Simulador Analógico

A última Etapa da metodologia elaborada é referida por ensaios do controlador industrial integrado com o simulador analógico. O simulador fornece o sinal de entrada para o controlador, e este o processa conforme os parâmetros PID e atua no simulador através do sinal de saída (Figura 39).

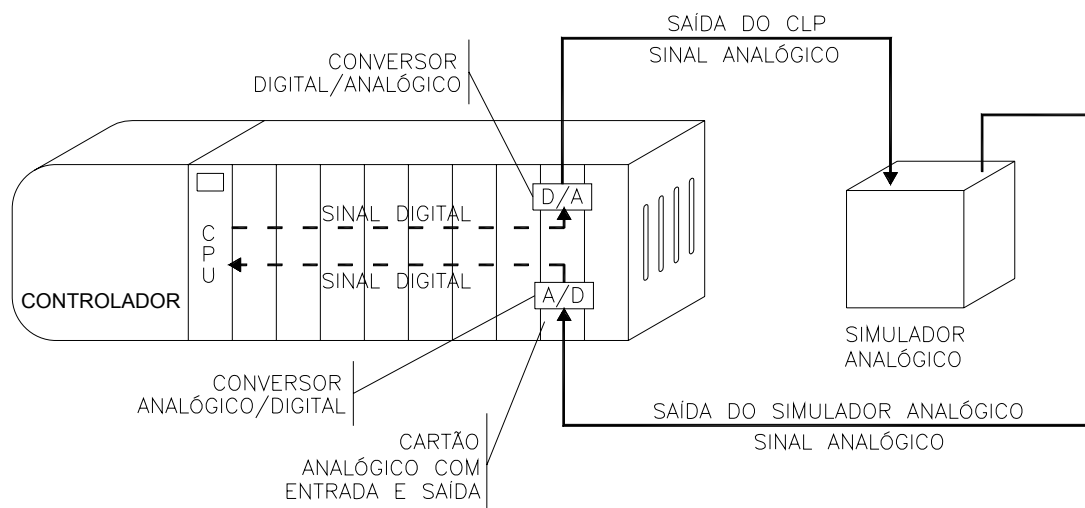


Figura 39 - Diagrama do arranjo experimental.

Antes dos ensaios com o simulador analógico, há a necessidade de testar a linearidade do conversor analógico-digital e digital-analógico. Para tanto, é alimentado o cartão de entrada com sinais de tensão variados e é observado o número convertido no controlador, no cartão de saída é colocado um número no controlador e é observado o nível de tensão no cartão de saída. As curvas resultantes de tensão em função dos números binários do controlador na saída e na entrada devem ser lineares.

Os parâmetros para configuração da instrução PID do controlador são determinados pelo método de Ziegler-Nichols conhecido por Método da Resposta ao Salto aplicado no simulador analógico. A metodologia de ajuste dos parâmetros PID utilizada está no Anexo A.

Na Tabela 1 segue os parâmetros PID calculados pelo método de Ziegler-Nichols para o Simulador Analógico operando em sistema de 2° ordem amortecido. A escala de tempo dos parâmetros  $T_I$  e  $T_D$  é segundos.

Tabela 1 - Parâmetros PID calculados.

$K_P$	133,33
$T_I$	1,95
$T_D$	0,13

A partir destes parâmetros definidos é esperado que se o parâmetro proporcional aumenta a velocidade de atuação do controlador no sistema. Enquanto, se o parâmetro integrativo reduz ou elimina erros estacionários. Em contrapartida, esse benefício geralmente é obtido às custas de uma redução da estabilidade ou do amortecimento do sistema. E enquanto o parâmetro derivativo aumentar o amortecimento e desta forma, melhorar a característica de estabilidade de um sistema. No entanto, torna o controlador sensível à taxa de variação do erro.

A atuação da instrução PID no simulador analógico muda a dinâmica da resposta deste. A comparação entre as respostas para cada tipo de compensador (proporcional, proporcional-integral, proporcional-derivativo e proporcional-integrativo-derivativo) e a resposta em degrau do simulador conforme cada característica descrita conclui o estudo da instrução PID.

A Figura 40 representa a resposta esperada na saída da instrução PID para o teste da Etapa 3, atuando no Simulador Analógico de 2° ordem amortecido.

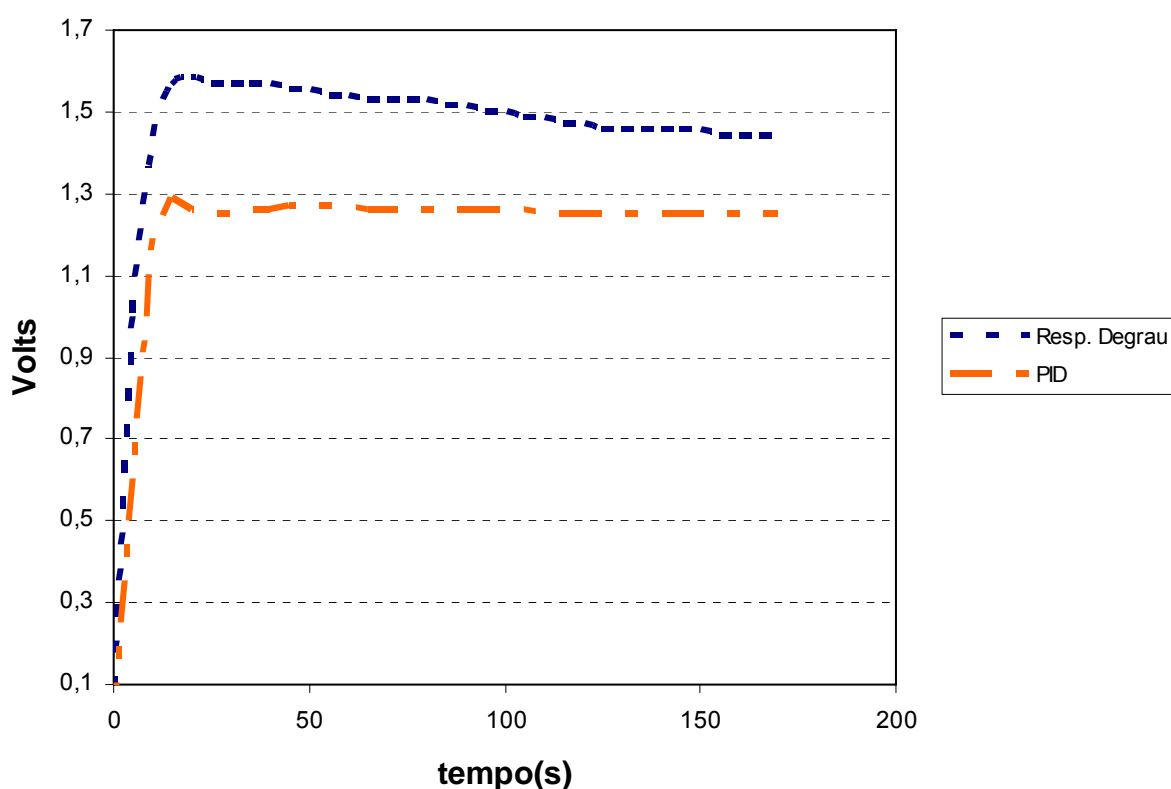


Figura 40 -Resposta esperada da instrução PID na Etapa 3.

Caso o sistema obtenha uma resposta satisfatória do ponto de vista de comportamento dinâmico nesta Etapa de teste, é possível concluir que o controlador funciona conforme especificações. Por outro lado, se alguma Etapa destes testes falharem, faz-se necessário elaborar mais testes para que possa concluir algo.

### 3.4 Conclusões após aplicação da MAFPID

A Etapa 1 de consulta de documentações e referências é fundamental ao engenheiro de automação, pois nela o mesmo pode conhecer e avaliar as principais características do controlador. Uma vez detectada qualquer restrição a aplicação do controlador fica ao critério do engenheiro de automação substituir o controlador.

Uma vez avaliada todas as informações obtidas na Etapa 1, inicia-se a Etapa 2. No caso da teste do parâmetro proporcional não estiver dentro dos resultados esperados, mas existir uma proporção entre os valores obtidos, pode-se determinar um fator de correção para que estes resultados fiquem dentro do esperado, e continua-se a MAFPID. Na impossibilidade deste, deve-se rejeitar o controlador.

Após realização do teste do parâmetro proporcional, inicia-se os teste dos parâmetros integral e derivativo. No caso da teste do parâmetro proporcional não estiver dentro dos resultados esperados, mas existir uma proporção entre os valores obtidos, pode-se determinar um fator de correção para que estes resultados fiquem dentro do esperado, e continua-se a MAFPID. Na impossibilidade da determinação de um fator de correção, sugere-se a realização a Etapa 3 com ressalvas. Sabendo que falhas no teste do parâmetro integral resultará em inconsistência de resultados na Etapa 3, se utilizado a parcela integral da instrução, e falhas no teste do parâmetro derivativo resultará em inconsistência de resultados na Etapa 3, se utilizado a parcela derivativa da instrução

Na continuação da MAFPID, a Etapa 3 verifica-se a dinâmica do controle da instrução PID. Caso o resultado obtido seja fora do esperado, deve-se rejeitar o controlador. Contudo, sugere-se que o engenheiro de automação faça uma nova verificação nas configurações dos parâmetros da instrução PID, tais como tempo e modo de execução, escala dos parâmetros  $T_I$  e  $T_D$ , entre outros.

As Figura 41 e Figura 42 mostram o fluxograma completo da metodologia proposta MAFPID. No capítulo 4 demonstrará a aplicação da MAFPID em dois controladores.

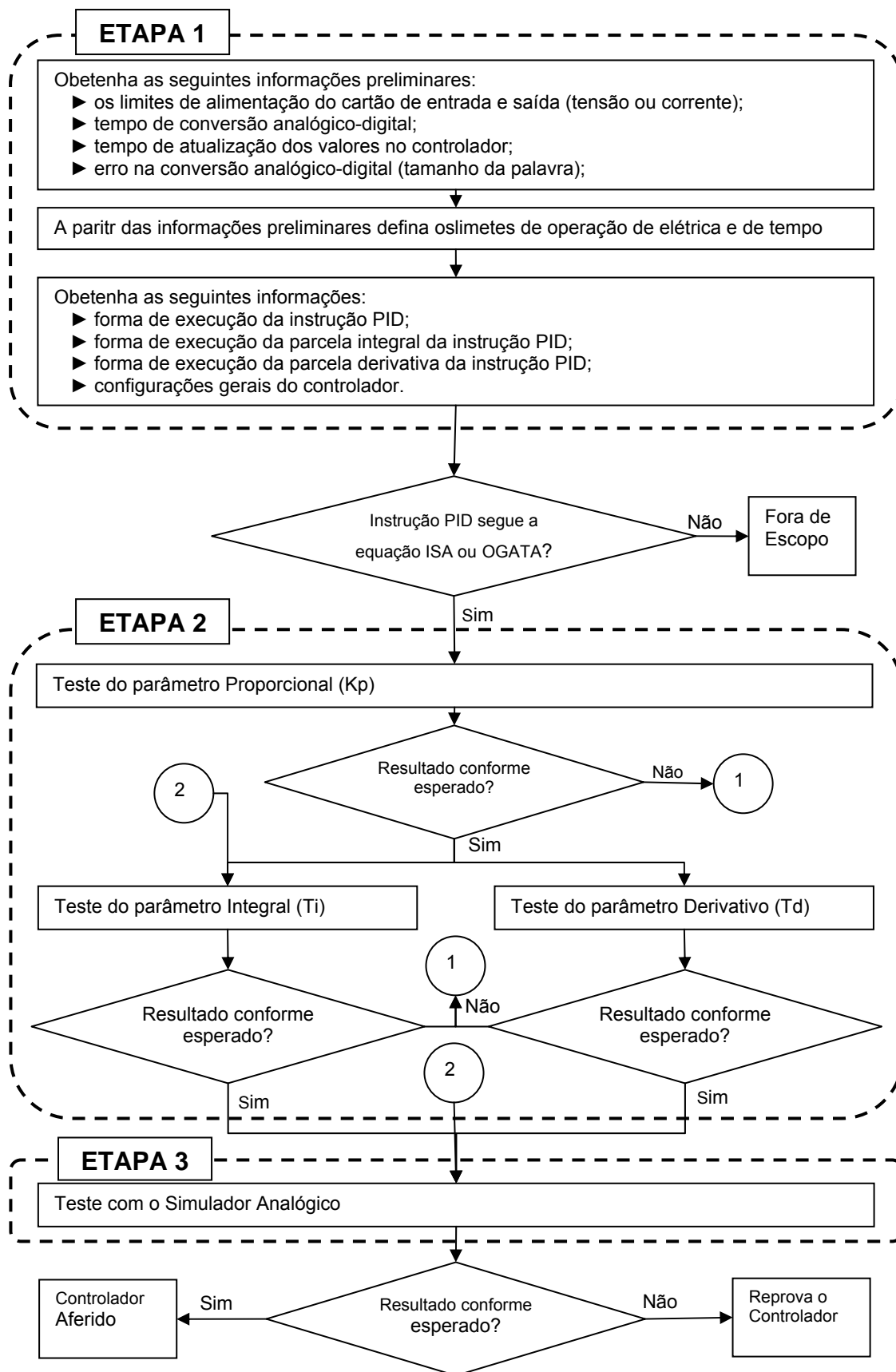


Figura 41 - Fluxograma completo da MAFPID.

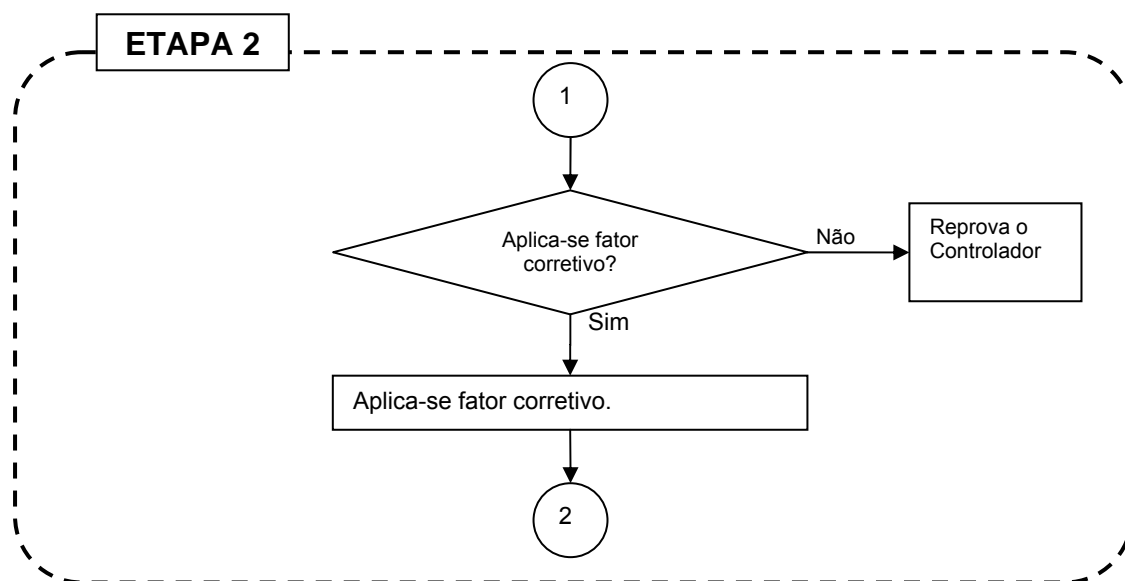


Figura 42 - Continuação do Fluxograma completo do MAFPID.



## 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA “MAFPID” EM CONTROLADORES INDUSTRIAIS COMERCIAIS

A título de validação da metodologia “MAFPID”, a mesma foi aplicada em dois modelos de controladores industriais de fabricação da Rockwell Automation. Estes controladores industriais pertencem gerações de controladores diferentes. Nota-se que, em controladores de mesmo porte, a complexidade, quantidade de parâmetros e variáveis de ajuste para a instrução PID aumenta de forma significativa quanto mais moderno for o controlador. Para tanto, aferiu-se dois controladores de gerações diferentes para verificar a acurácia e a confiabilidade da MAFPID.

### 4.1 Estudo de Caso I

Para a primeira aplicação da metodologia MAFPID utilizou-se o CLP<sup>®</sup> modelo SLC-500<sup>®</sup> de fabricação da Rockwell Automation. Este controlador foi a primeira opção de implementação da MAFPID devido este já estar disponível no Laboratório de Automação Industrial do Departamento de Engenharia Elétrica de Energia e Automação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O CLP<sup>®</sup> modelo SLC-500<sup>®</sup> é um controlador industrial largamente empregado no mercado de automação industrial. O SLC-500<sup>®</sup> é facilmente encontrada nas mais diversos segmentos industriais espalhados pelo país. Este apresenta uma tecnologia menos moderna, mas já apresenta instrução PID para controle de processos contínuos.

Nos capítulos 4.1.1 a 4.1.4 é apresentada a execução da metodologia MAFPID no controlador CLP<sup>®</sup> modelo SLC-500<sup>®</sup>.

#### 4.1.1 Etapa 1 - Documentação e Referências

Dando início da MAFPID, consultou-se o manual do usuário do controlador industrial CLP<sup>®</sup> modelo SLC-500<sup>®</sup>. Os dados do equipamento obtidos pela consulta dos manuais e especificações do fabricante são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados do SLC-500<sup>®</sup> fornecidos pelo fabricante.

Limites de Tensão	± 10,0 V
Tempo de Atualização	512 µs
Tempo de Conversão A/D e D/A	10 ms
Tamanho da Palavra	16 bits
Erro na Conversão	≈ 0,3 mV/bit

Assim, os sinais não devem exceder o limite de -10 a 10 volts. Os tempos de conversão e atualização do sistema do CLP<sup>®</sup> são menores que o tempo de variação do sistema (aproximadamente 1 segundo).

A instrução PID deste controlador possui aproximadamente 20 parâmetros de ajuste, tais como configuração de tempo de atualização da saída, escala do *set-point* e saída, entre outros.

O CLP<sup>®</sup> SLC-500 utiliza a expressão ilustrada na Equação 15 na instrução PID. Pode-se observar que neste CLP<sup>®</sup> a parte derivativa da instrução PID da expressão não é dependente do erro entre SP e PV, e sim apenas da variação de PV. Este fato é justificado pela operação do sistema, já que modificação no SP realizada pelo operador, resultaria em um pulso no erro, e este pulso se propagaria para a parcela derivativa, e por fim, também resultaria em um pulso na saída do controlador. Uma vez utilizando a derivada sobre o sinal PV, qualquer modificação de SP não afetará diretamente a parcela derivativa e isso evitaria este pulso. Um pulso na saída do controlador poderia resultar em danos nos equipamentos e atuadores de campo, por exemplo, uma válvula ao detectar este pulso geraria uma pancada no cabeçote desta válvula.

$$CV = K \times \left[ (E) + \frac{1}{T_i} \int (E) dt + T_d \frac{d(PV)}{dt} \right]$$

$$\text{onde : } E = SP - PV$$

Equação 15 - Equação PID utilizada pelo SLC-500.

Destaca-se que no manual do referido controlador, existe uma observação sobre a existência de filtro passa-baixo na parcela derivativa da instrução. Esta instrução apenas permite mudar a escala do ganho deste filtro passa-baixo, sendo que não existe modo de configuração do parâmetro deste filtro.

Um fato importante da instrução PID implementada neste controlador é o tipo de variáveis que a instrução está locada na memória. Esta se localiza em uma variável que possui 16 palavras (256 bits), e esta apenas aceita números inteiros. Ou seja, nas Etapas posteriores é fundamental considerar este fato para não resultar discrepâncias de resultados.

Também constatou-se que este controlador possui dois modos de execução da instrução PID. Um modo de execução síncrona às outras instruções do controlador e outro modo execução assíncrona às outras instruções do controlador.

#### *4.1.2 Etapa 2 - Teste do Controlador Isolado*

Inicialmente os resultados obtidos na Etapa 1 estão dentro do esperado, pois os parâmetros verificados no manual estão em conforme as premissas estabelecidas. Assim, inicia-se a Etapa 2.

No ambiente de programação do CLP<sup>®</sup> é desenvolvido um programa Ladder que gere as funções matemáticas especificadas na MAFPID. Configura-se a instrução com o tempo de atualização da saída por volta de 0,01 segundos e modo de execução da instrução assíncrona.

Para efeito de verificação de resultados, o modelo de CLP<sup>®</sup> SLC-500 permite verificar as variáveis na sua memória. Assim os testes dos parâmetros é ilustrado nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45.

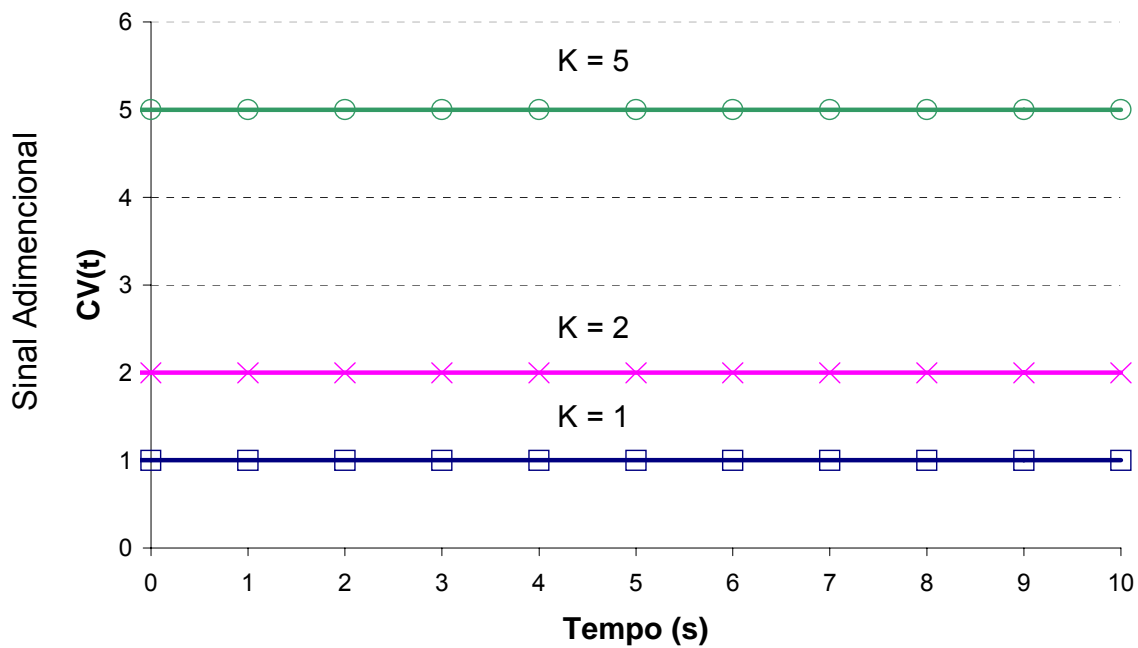


Figura 43 - Resposta da instrução PID para o parâmetro proporcional

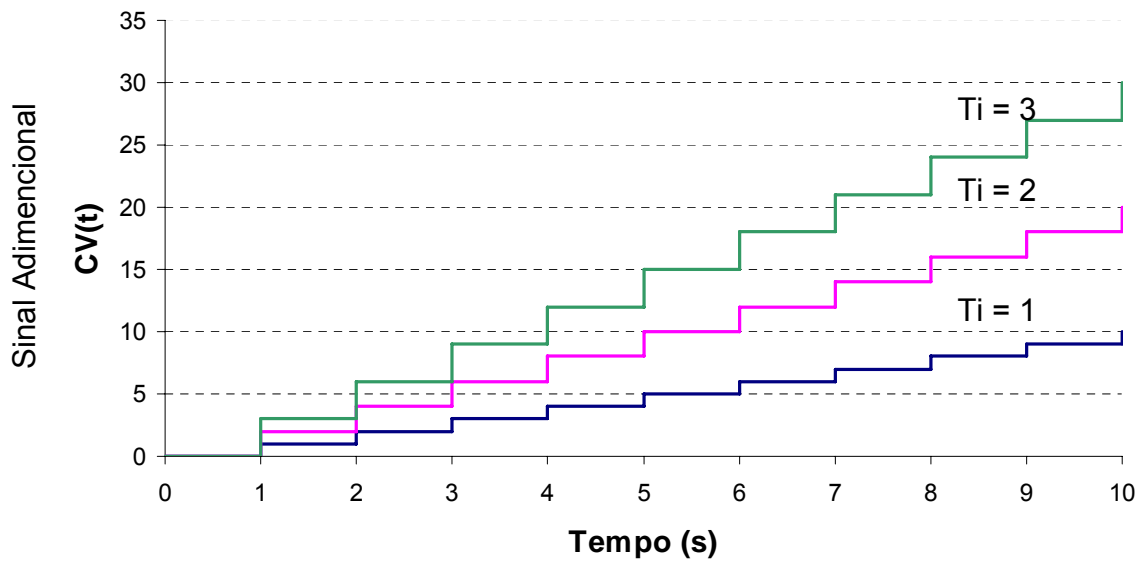


Figura 44 - Resposta da instrução PID para o parâmetro integral.

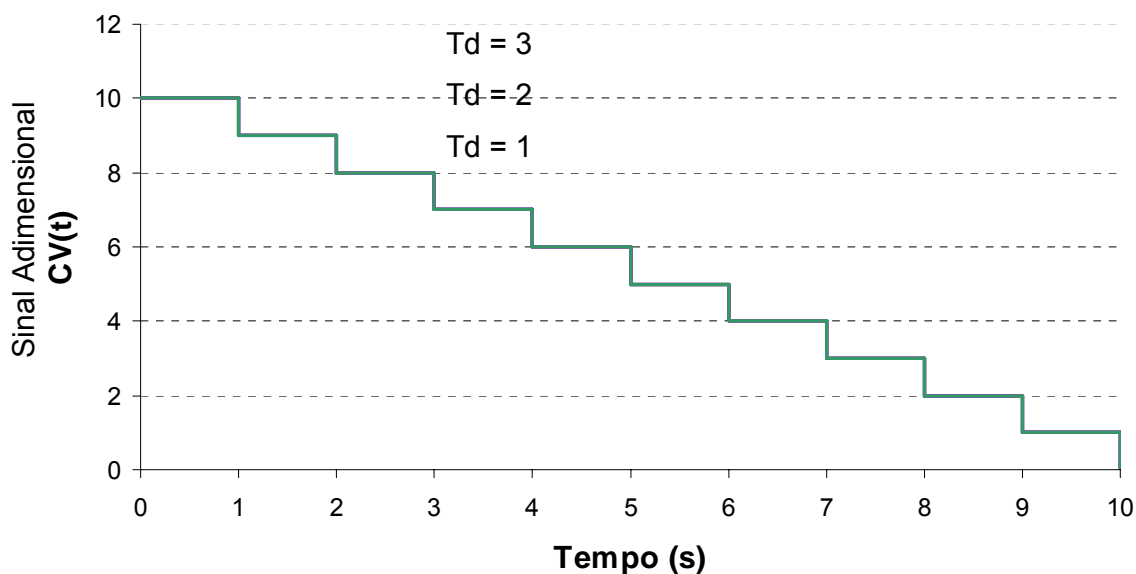


Figura 45 - Resposta da instrução PID para o parâmetro derivativo.

Analisando as respostas do CLP<sup>®</sup> para os parâmetros proporcional e integral, é observado que a instrução respondeu conforme o esperado. Contudo, a resposta deste CLP<sup>®</sup> durante os ensaios dos parâmetros derivativo não ocorreu conforme o esperado uma vez que não houve variação da saída CV para diferentes valores de  $T_D$ .

Ao analisar com mais cuidado o arranjo de teste para o parâmetro derivativo, confirma-se na memória do CLP<sup>®</sup> a invariância da saída CV do controlador perante o incremento de valores no parâmetro derivativo. Assim foi configurado um valor máximo do valor  $T_d$  e em seguida foi monitorada a saída física (cartão analógico) do controlador. O resultado destes monitoramento é ilustrado na Figura 46. Observa-se o efeito do filtro passa-baixo nos picos negativos conforme já descrito na Figura 30, e também ilustrados na Figura 46.

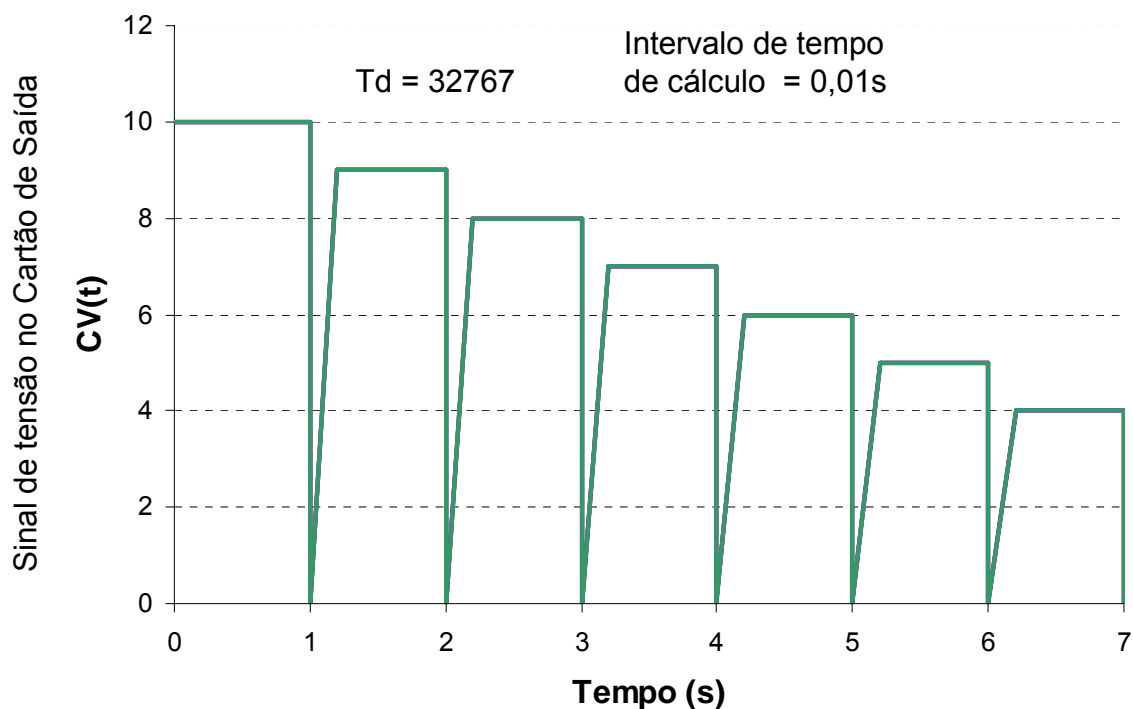


Figura 46 - Saída CLP® no cartão analógico quando executado o teste do parâmetro derivativo.

A explicação para este resultado está na forma como se calcula derivadas em tempo discreto. Esta é realizada partir da diferença de valores consecutivos do sinal de entrada discretizado ou uma média entre três ou mais valores. Como a instrução PID implementada neste controlador se localiza em uma variável que apenas aceita números inteiros, os valores destinados para o cálculo da derivada foram truncados em valores inteiros, resultando um sinal de entrada um conjunto de degraus. Quando o cálculo da derivada é realizado nos patamares deste sinal o valor resultando é nulo. Porém, quando este mesmo cálculo é executado utilizando valores de patamares diferentes, o resultado é um pulso, conforme ilustrado na Figura 47.

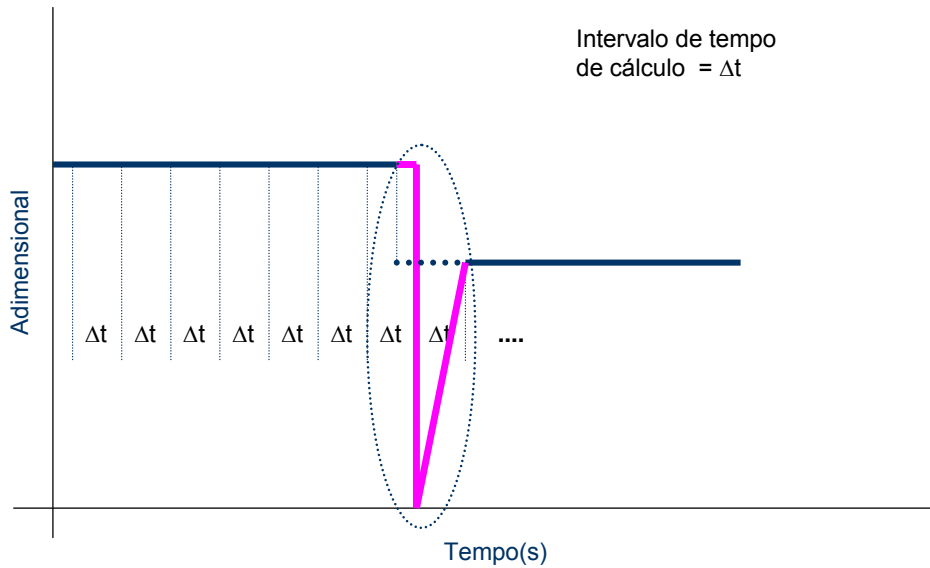


Figura 47 - Efeito do cálculo da derivada para entrada com conjunto de degraus.

Para corrigir esta inconsistência no resultado do teste do parâmetro derivativo, aumentou-se em 100 vezes a escala da função linear proposta na MAFFPID. Ou seja, ao invés do sinal de entrada apresentar o valor 1,01, a instrução PID recebeu o valor 101. Assim realizou-se novamente o teste do parâmetro derivativo. A Figura 48 é mostrado o resultado do teste do parâmetro derivativo depois da modificação da escala de entrada da instrução PID.

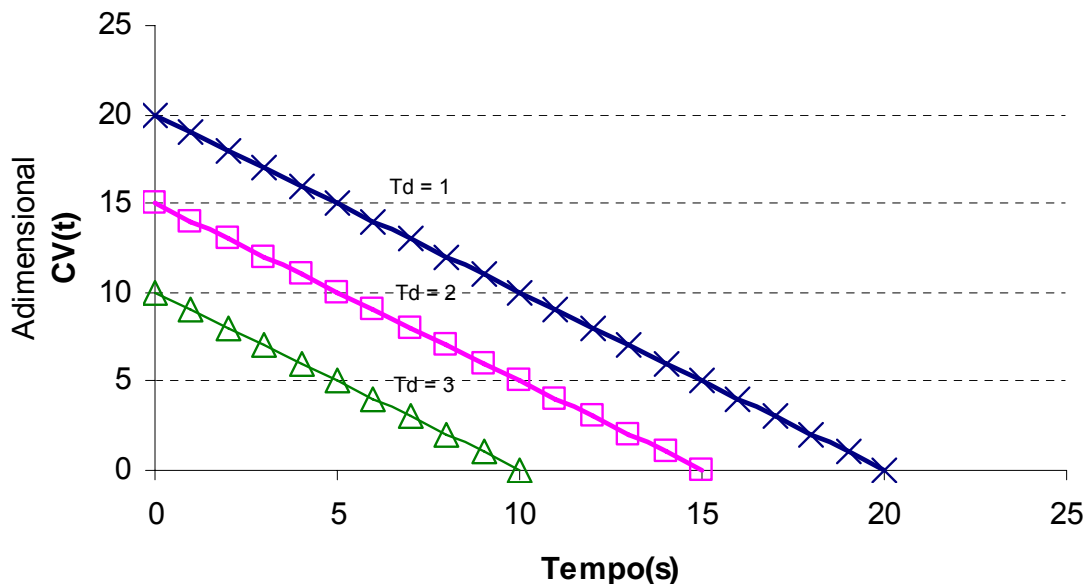


Figura 48 - Resposta da instrução PID para o parâmetro derivativo, após modificação na entrada da instrução.

#### 4.1.3 Etapa 3 - Teste de Aferição com Simulador Analógico

Para assegurar uma resposta confiável, realizou-se o teste de linearidade do cartão analógico, previsto na Etapa 3. Conforme ilustrado na Figura 49, o cartão obteve comportamento dentro das especificações.

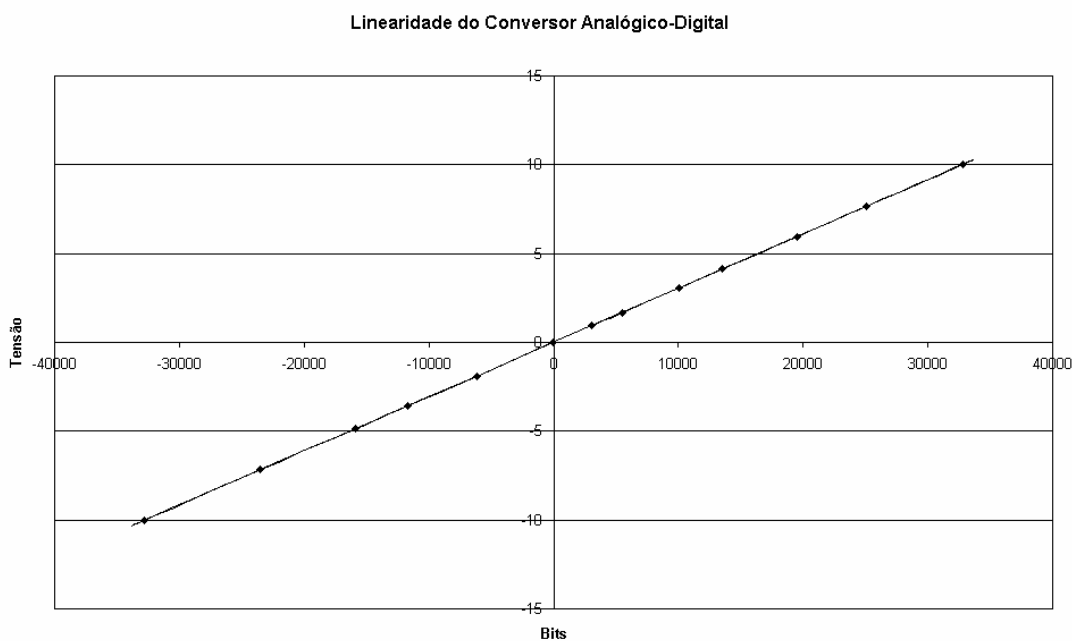


Figura 49 - Resultado do teste de linearidade do cartão analógico.

Para a continuidade da Etapa 3, conectou-se o Simulador Analógico conforme descrito na MAFPID. Para efeito de validação do teste, foi apenas utilizado o Simulador Analógico operando em uma função de 2° ordem amortecida. A Figura 50 ilustra o resultado obtido na Etapa 3.



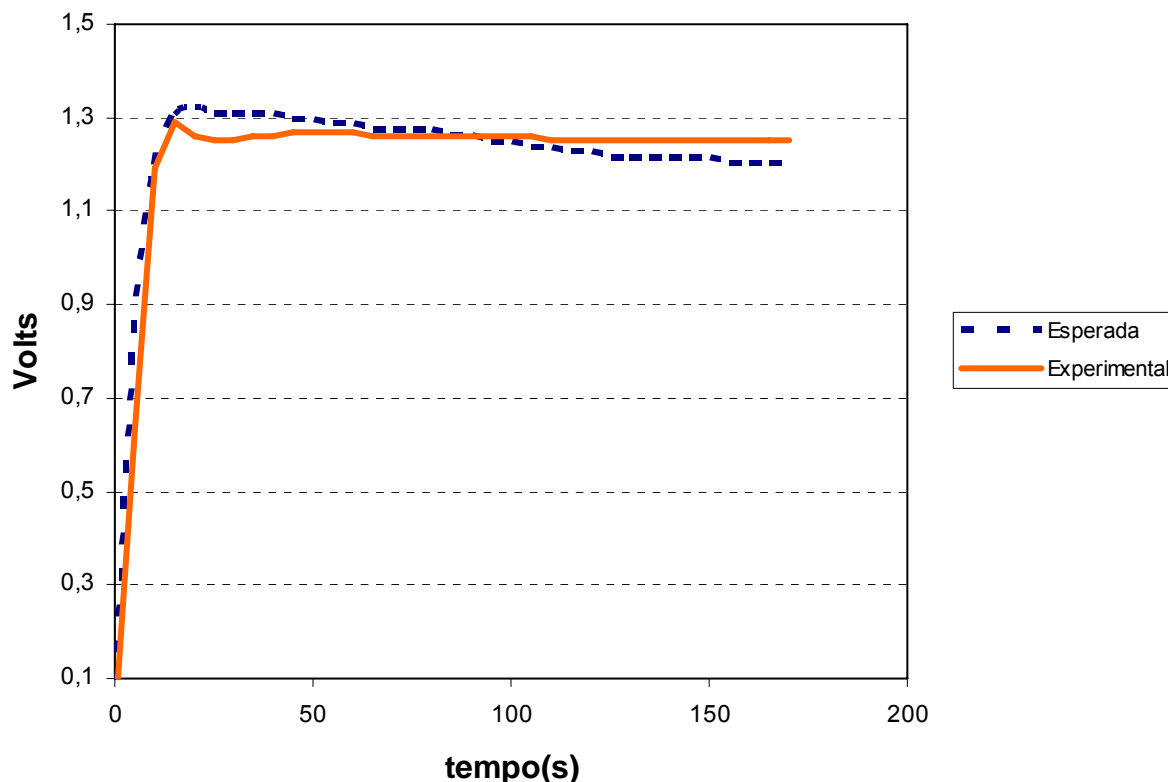


Figura 50 - Resultado da Etapa 3 utilizando o Simulador Analógico.

O resultado obtido na Etapa 3 está dentro do esperado. Assim finaliza-se o metodologia MAFPID. No capítulo 4.1.4. é descrita a conclusão da metodologia aplicada no controlador CLP<sup>®</sup> modelo SLC-500<sup>®</sup>.

#### 4.1.4 Conclusão

Com a finalização da MAFPID, conclui-se que o controlador CLP<sup>®</sup> modelo SLC-500<sup>®</sup> está dentro das especificações citadas pelo fabricante. Assim, este controlador pode ser empregado para controle de processos industriais que necessitem controle PID. Porém, ressalta-se que o engenheiro de automação industrial poderá ter dificuldades em ajustar os parâmetros PID devido ao fato do controlador executar os cálculos da instrução PID com variáveis inteiras, conforme descrito neste trabalho.

## 4.2 Estudo de Caso II

O segundo estudo de caso é a aplicação da metodologia MAFPID no controlador industrial de fabricação da Rockwell Automation modelo ControlLogix<sup>®</sup>. Este controlador industrial é o modelo mais moderno fornecido por este fabricante. Apresenta, em sua instrução PID, em torno de 40 parâmetros de configuração. Este é utilizado nas mais diversas aplicações industriais, desde aplicações de controle de nível até controle de reações químicas.

Nos capítulos 4.2.1 a 4.2.4 é apresentado a execução da metodologia MAFPID no controlador CLP<sup>®</sup> modelo ControlLogix<sup>®</sup>.

### 4.2.1 Etapa 1 - - Documentação e Referências

Dando início da MAFPID, consultou-se o manual do usuário do controlador industrial CLP<sup>®</sup> modelo ControlLogix<sup>®</sup>. Os dados do equipamento obtidos pela consulta dos manuais e especificações do fabricante são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do ControlLogix<sup>®</sup> fornecidos pelo fabricante.

Limites de Tensão	$\pm 10,0$ V
Tempo de Atualização	100 $\mu$ s
Tempo de Conversão A/D e D/A	12 ms
Tamanho da Palavra	16 bits
Erro na Conversão	$\approx 0,3$ mV/bit

Assim, os sinais não devem exceder o limite de -10 a 10 volts. Os tempos de conversão e atualização do sistema do CLP<sup>®</sup> são menores que o tempo de variação do sistema (aproximadamente 1 segundo).

O CLP<sup>®</sup> ControlLogix possibilita ao engenheiro de automação optar por qual expressão será utilizada na instrução PID. As Equação 16 e Equação 17 ilustram as equações que a instrução pode utilizar.

$$CV = K \times \left[ (E) + \frac{1}{T_i} \int (E)dt + T_d \frac{d(PV)}{dt} \right]$$

$$\text{onde : } E = SP - PV$$

Equação 16 - Primeiro modo de operação da instrução PID utilizada pelo ControlLogix®.

A Equação 16 realiza os cálculos da parcela derivativa a partir do valor PV e não do valor do erro (SP-PV). Conforme já descrito neste trabalho, isso ocorre para evitar mudanças bruscas na saída do controlador, evitando assim danos nos equipamentos atuadores da planta industrial.

Caso o engenheiro de automação precisar que a instrução PID execute conforme padrões usuais, pode-se utilizar a Equação 17.

$$CV = K \times \left[ (E) + \frac{1}{T_i} \int (E)dt + T_d \frac{d(E)}{dt} \right]$$

$$\text{onde : } E = SP - PV$$

Equação 17 - Segundo modo de operação da instrução PID utilizada pelo ControlLogix®.

O manual do referido controlador descreve que o mesmo possui filtro passa-baixo na entrada, função de suavização na saída do controlador, entre outros recursos que não são relevantes a MAFPID.

Um fato importante da instrução PID implementada neste controlador é o tipo de variáveis que a instrução está locada na memória. Ao contrário do CLP® modelo SLC-500® referido anteriormente, esta se localiza em uma variável do tipo ponto flutuante. Assim, a instrução não deverá apresentar problemas de derivação conforme visto na aferição do controlador CLP® modelo SLC-500®.

#### 4.2.2 Etapa 2 - Teste do Controlador Isolado

Inicialmente os resultados obtidos na Etapa 1 estão dentro do esperado, pois os parâmetros verificados no manual estão em conforme as premissas estabelecidas. Assim, é iniciada a Etapa 1. No ambiente de programação do CLP<sup>®</sup> é desenvolvido um programa Ladder que gere as funções matemáticas especificadas na metodologia.

No ambiente de programação do CLP<sup>®</sup> é desenvolvido um programa Ladder que gere as funções matemáticas especificadas na MAFPID. Configura-se a instrução com o tempo de atualização da saída por volta de 0,01 segundos e desabilita-se os modos de suavização e filtros.

Para efeito de verificação de resultados, o modelo de CLP<sup>®</sup> ControlLogix<sup>®</sup> permite verificar as variáveis na sua memória. Assim os testes dos parâmetros é ilustrado nas Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

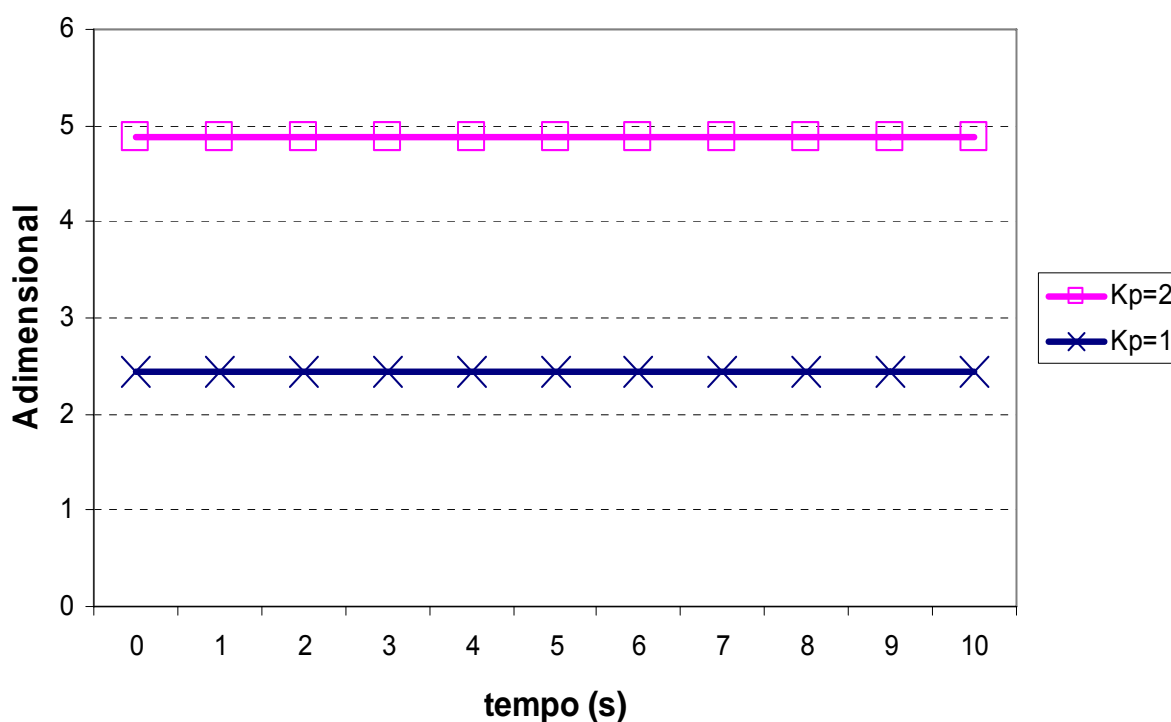


Figura 51 - Resposta da instrução PID para o parâmetro proporcional

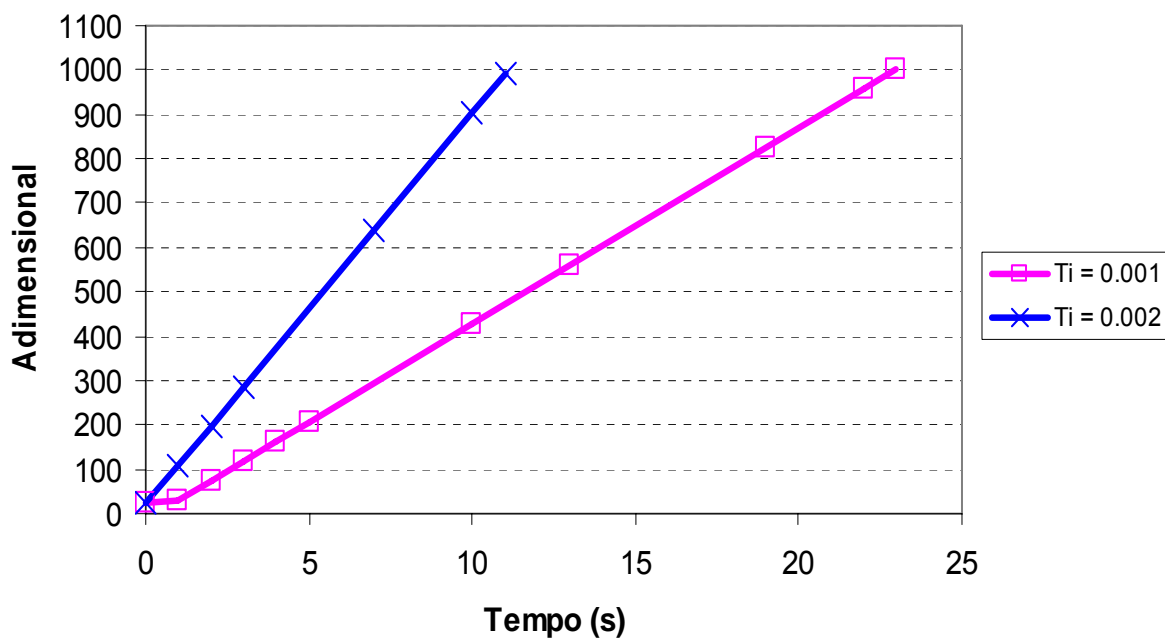


Figura 52 - Resposta da instrução PID para o parâmetro integral.

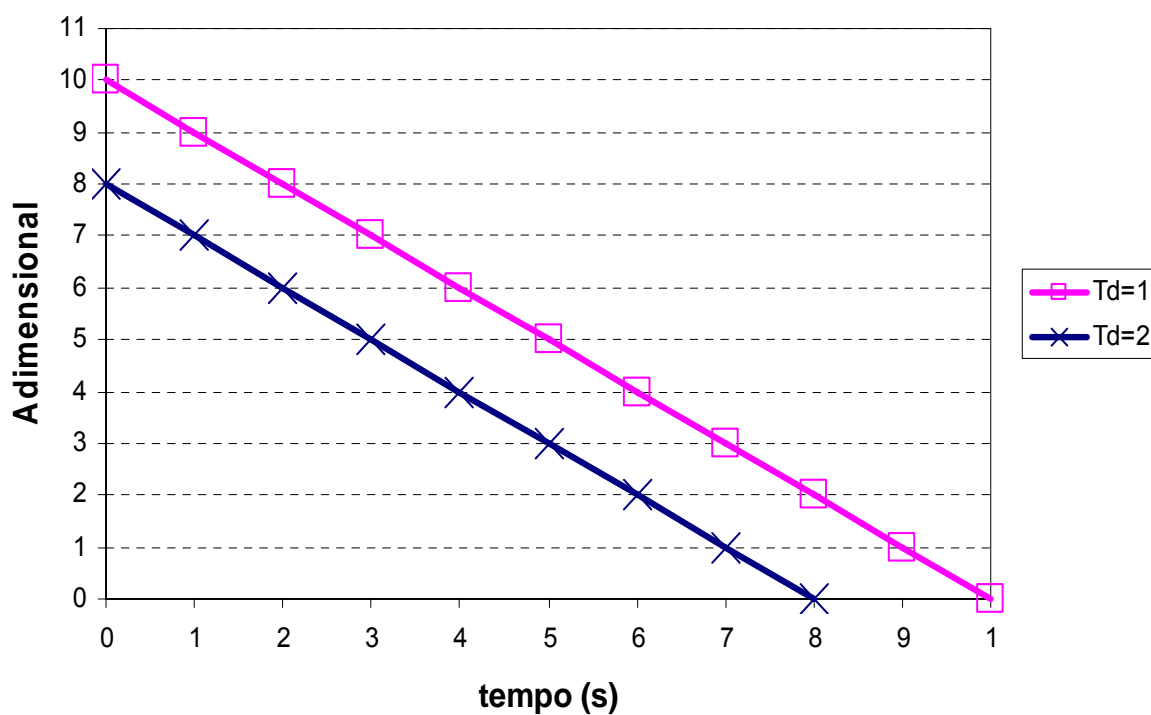


Figura 53 - Resposta da instrução PID para o parâmetro derivativo.

Analisando as respostas do CLP<sup>®</sup> para os parâmetros proporcional, integral e derivativo, é observado que a instrução respondeu conforme o esperado. Assim, é possível dar continuidade ao MAFPID.

### 4.2.3 Etapa 3

Para assegurar uma resposta confiável, foi realizado teste de linearidade do cartão analógico, previsto na Etapa 3. Conforme ilustrado na Figura 54, o cartão obteve comportamento dentro das especificações.

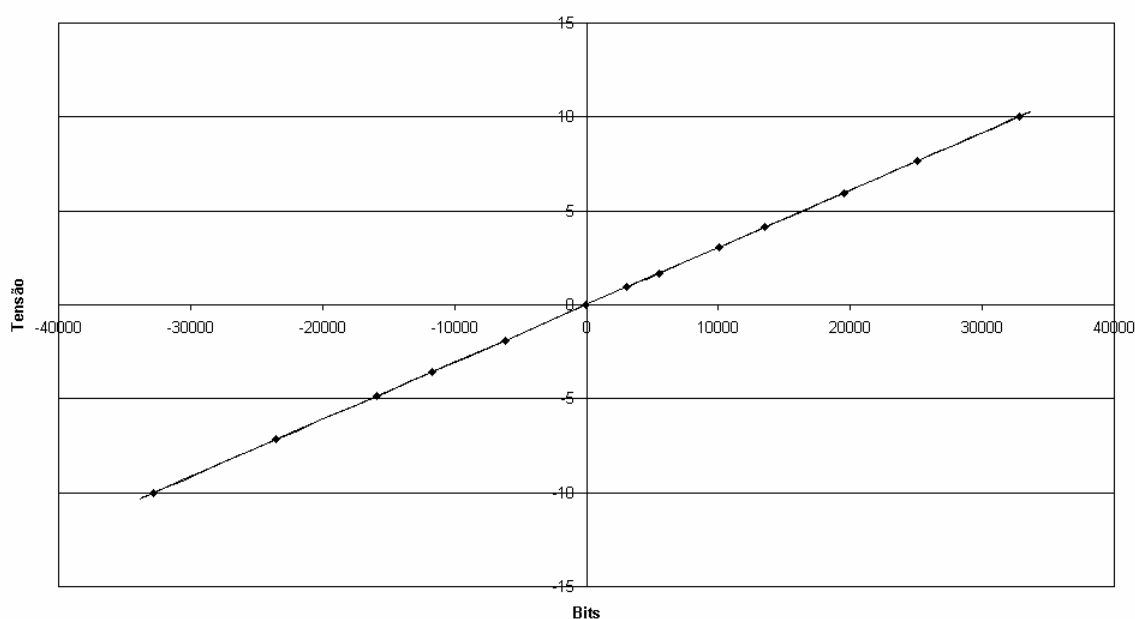


Figura 54 - Resultado do teste de linearidade do cartão analógico.

Para a continuidade da Etapa 3, conectou-se o Simulador Analógico conforme descrito na MAFPID. Para efeito de validação do teste, foi apenas utilizado o Simulador Analógico operando em uma função de 2<sup>o</sup> ordem amortecida. A Figura 55 ilustra o resultado obtido na Etapa 3.

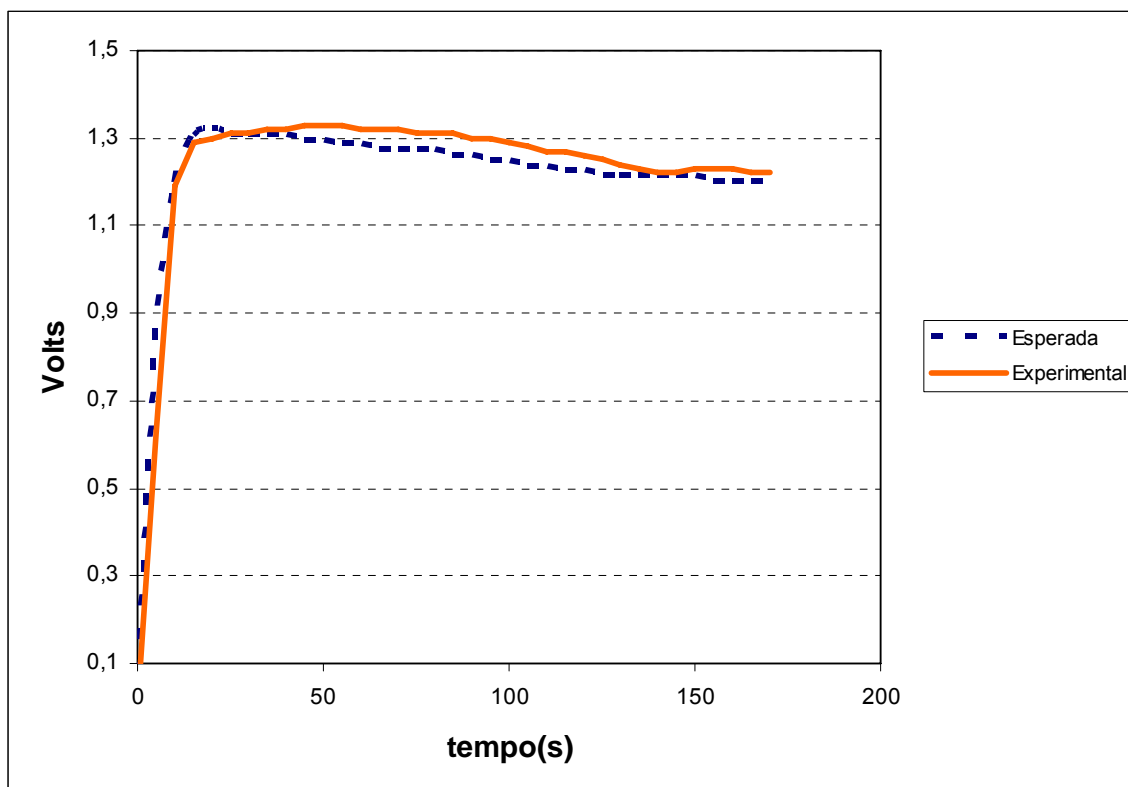


Figura 55 - Teste com simulador analógico - Resposta a Degrau do Sistema Amortecido

O resultado obtido na Etapa 3 está dentro do esperado. Assim finaliza-se o metodologia MAFPID. No capítulo 4.2.4. é descrita a conclusão da metodologia aplicada no controlador CLP<sup>®</sup> modelo ControlLogix<sup>®</sup>.

#### 4.2.4 Conclusão

Com a finalização da MAFPID, conclui-se que o controlador CLP<sup>®</sup> modelo ControlLogix<sup>®</sup> está dentro das especificações citadas pelo fabricante. Assim, este controlador pode ser empregado para controle de processos industriais que necessitem controle PID, sendo que a MAFPID não detectou restrições.

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos dos dois ensaios dos controladores industriais analisados comprovam que a metodologia “MAFPID” permite a aplicação e visualização prática da teoria de controle em sistemas automatizados que empregam controladores industriais. Assim sendo, a metodologia MAFPID provou ser uma poderosa ferramenta de engenharia para o estudo e análise da instrução PID implementada em controladores industriais.

A MAFPID possibilita ao engenheiro de automação adotar uma série de procedimentos dirigidos para conhecer e determinar os limites de operação da instrução PID. Ao final da aplicação da MAFPID, o engenheiro de automação industrial é capaz de concluir se o controlador está de acordo com a documentação analisada e também se o este mesmo controlador atende as especificações para controlar um determinado processo.

A MAFPID permite na maioria dos casos determinar como a instrução PID implementada em controlador industriais opera. Assim sendo, a mesma permite também quando necessário determinar parâmetros de ajustes e de calibração dos controladores industriais. Portanto a mesma é uma poderosa ferramenta de engenharia porque na maioria dos casos, que é aplicada, permite ao engenheiro de automação industrial realmente conhecer como opera a instrução PID, não tendo mais que operar com o controlador industrial como se o mesmo fosse uma caixa preta (AGUIERRA, 2004).

Entretanto, poderão ocorrer algumas situações em que a sistemática operacional e a aferição dos parâmetros internos de uma particular instrução PID implementado em alguns controladores industriais não será possível. Ainda assim, nestes casos a MAFPID será uma ferramenta útil pois a mesma servirá para constatar que a documentação fornecida pelo fabricante não está refletindo a operacionalidade do controlador aferido. E portanto, a MAFPID evitará que sejam despendidas horas de esforço de engenharia na tentativa de correlacionar os cálculos teóricos com a realidade prática funcional do controlador aferido. Nestes casos, a decisão de continuar a utilizar o controlador ou até mesmo o ajuste de forma absolutamente empírica da instrução PID ficará a critério do engenheiro de automação.



Observe-se também que a MAFPID não dispensa do engenheiro de automação o emprego de técnicas de ajuste de parâmetros PID e de teoria de controle nos esforço de otimizar e controlar as plantas industriais.

### 5.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Com a evolução da teoria de controle clássico, nota-se que controladores industriais modernos possuem instruções PID fora do padrão da equação ISA ou da equação demonstrada na literatura acadêmica científica. Existem controladores que a documentação do fabricante descreve que a parcela derivativa da instrução não realiza a derivada ou a diferença do sinal de erro ou PV. Ainda existem controladores industriais que utilizam lógica Fuzzy para controle de processo em substituição ou complemento a instrução PID.

Sabendo-se desta lacuna, uma sugestão para trabalhos futuros é o aperfeiçoamento da metodologia MAFPID para a aferição de instruções PID fora dos padrões ISA ou dos padrões acadêmicos.

Como sugestão de continuidade, também pode ser propor que a MAFPID incorpore Etapas de auxílio para a parametrização de instrução PID em controladores industriais, no sentido da mesma também tornar-se uma ferramenta de engenharia para

## 6. ANEXO A - MÉTODOS DE ZIEGLER-NICHOLS

Os métodos de ajuste de parâmetros da equação PID denominados métodos de Ziegler-Nichols foram introduzidos em 1942. Estes foram desenvolvidos a partir de testes empíricos realizados por J. G. Ziegler e N. B. Nichol e atualmente são considerados métodos clássicos. Estes métodos são largamente aplicados até hoje, mesmo em sua forma original, mas existem formas modificadas que asseguram resultados mais satisfatórios no que se refere ao desempenho do controle. Basicamente existem dois métodos de ajuste de Ziegler-Nichols que visam obter uma mesma resposta pré-especificada para o sistema, e diferem no que diz respeito à natureza da informação sobre a dinâmica do processo que é exigida por cada um deles.

Neste trabalho de pesquisa será utilizado o método denominado Resposta ao Salto, ou método do Domínio do Tempo, requer o conhecimento de duas grandezas que caracterizam a resposta ao salto de um processo que é detalhada posteriormente. Uma vez obtidas estas informações, basta recorrer a fórmulas extremamente simples para calcular os parâmetros PID do controlador. Estas fórmulas foram determinadas de maneira empírica por meio de ensaios de processos industriais típicos. As fórmulas originalmente propostas por Ziegler e Nichols fornecem uma resposta que foi posteriormente considerada insatisfatória. Diferentes fórmulas foram então propostas com base nos mesmos ensaios, obtendo-se melhor desempenho.

## 6.1 Método da Resposta ao Salto

A resposta típica de um processo industrial a um salto unitário na sua entrada é apresentada na Figura 56.

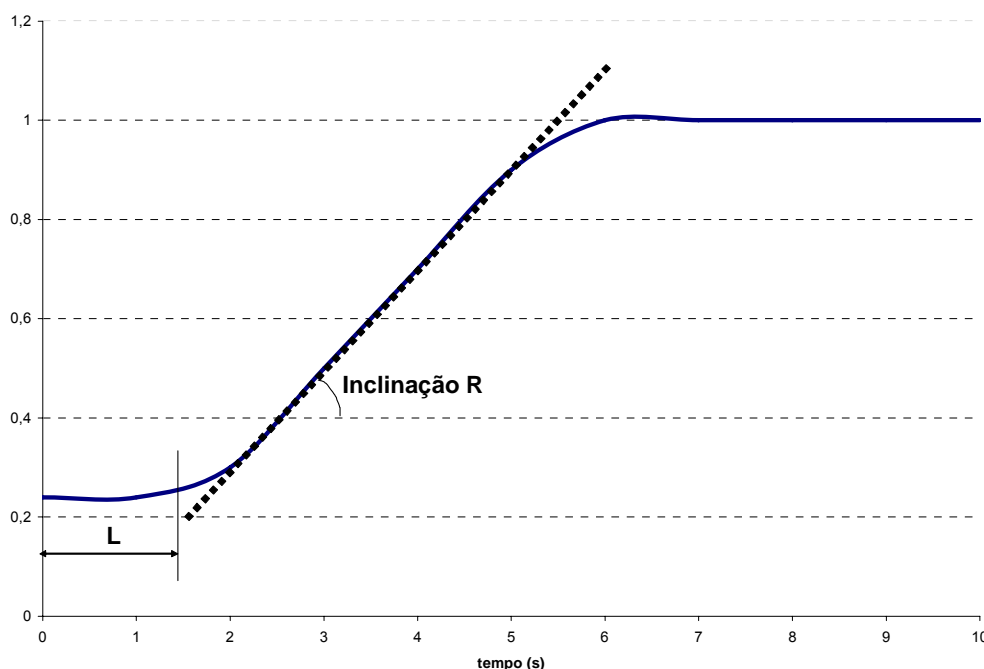


Figura 56 - Características da resposta ao salto do processo relevantes para o ajuste de Ziegler-Nichols.

Esta resposta pode ser caracterizada por dois parâmetros: o atraso aparente indicado no gráfico por  $L$  e o ganho integral equivalente indicado no gráfico por  $R$ . Estes parâmetros são obtidos traçando uma reta tangente à curva de resposta no seu ponto de inflexão, ou seja, o ponto em que a taxa de variação da resposta é máxima. Os parâmetros são dados então pela interseção desta reta com os eixos coordenados, conforme indicado na Figura 56. Um salto de amplitude diferente da unidade pode ser usado, sendo neste caso necessário normalizar o ganho equivalente dividindo-o pela amplitude deste salto.

Ziegler e Nichols propuseram as seguintes fórmulas para cálculo dos parâmetros do controlador a partir dos parâmetros  $R$  e  $L$ , conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de Ziegler e Nichols pelo Método da Resposta ao Salto.

<b>Tipo de Controle</b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>T_i</math></b>	<b><math>T_d</math></b>
<b>P</b>	$1/RL$	-	-
<b>PI</b>	$0,9/RL$	$3L$	-
<b>PID</b>	$1,2/RL$	$2L$	$0,5L$

Os valores nesta Tabela foram determinados de forma empírica de forma a obter uma resposta com amortecimento de 1/4 na resposta ao valor de referência para processos industriais típicos. Enquanto a rejeição a perturbações muitas vezes apresenta um comportamento satisfatório, este amortecimento usualmente não é satisfatório na resposta à referência, causando em muitos casos um sobressinal excessivo e baixa tolerância a variações na dinâmica do processo. Em função destas características, outras fórmulas foram propostas e diversas modificações sobre o método são utilizadas.

## 6.2 Técnicas de Ajuste Manual de PID

Os modelos utilizados para o projeto nem sempre são suficientemente completos e os métodos, por se pretenderem de alicação genérica, muitas vezes fornecem ajustes que podem ser melhorados. Por esta razão, por vezes é conveniente, após ter obtido um ajuste para o PID por meio de um dos métodos apresentados, efetuar manualmente um ajuste fino dos parâmetros do controlador tendo em conta o desempenho observado do sistema. Para tanto é preciso ter em mente o efeito de cada uma das ações de controle sobre o desempenho do processo. A partir daqueles princípios podem ser estabelecidas regras para guiar este ajuste fino. Em alguns casos em que os requisitos de desempenho são mínimos, engenheiros de automação com grande experiência pode fazer o ajuste exclusivamente manual a partir de regras deste tipo. A Tabela 5 abaixo apresenta um sumário que pode servir de guia ao operador efetuando o ajuste manual, sempre tendo em mente que este ajuste manual tem por objetivo unicamente refinar o ajuste já feito do controlador e portanto as variações efetuadas nos parâmetros devem ser pequenas.

Tabela 5 - Tabela sumário de ajuste manual de parâmetros PID.

<b>Problema</b>	<b>Medida de ajuste</b>
Resposta muito lenta	aumentar
Resposta excessivamente oscilatória	ganho proporcional
Sobrepassagem excessiva	aumentar tempo derivativo
Resposta inicialmente rápida e em seguida muito lenta	reduzir taxa integral
	aumentar taxa integral

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A., **Introdução à Identificação de Sistemas**, Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais, Editora UFMG, ed. 2, 2004

ÅSTRÖM, K. J. e HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**, Instrument Society of America, 2ª ed., 1995.

ÅSTRÖM, K. e WITTENMARK, B. **Computer-Controlled Systems**. Theory and Design, Prentice Hal, ed. 3, 1997.

BAZANELLA, A. S. e SILVA JR., J. M. G. **Ajuste de Controladores PID**. Apostila do Curso de Extensão, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRS, 1999.

CASSANDRAS, C., **Discrete Event Systems**, Irwin Professional, ed. 1, 1993.

CORRIPIO, A. B. **Tuning of Industrial Control Systems**, Research Triangle Park: ISA, ed. 2, 2001.

DIANESE, A., **Computação e Simulação Analógica e Híbrida**, Guanabara Dois, ed. 2, Rio de Janeiro 1984

DUARTE, F., **Arquitetura e Tecnologias de Informação - Da Revolução Industrial À Revolução Digital**, FAPESP: Annablume, ed.1, 1999.

GRAEBE, S. F. e AHLÉN, A. **Bumpless Transfer**. In: **LEVINE, W. S., The Control Handbook**,. Boca Raton: CRC, ed. 2, 1996.

Manual de Controlador Lógico Programável Modelo SLC-500<sup>®</sup>, catalogo número 1747-RM001E-EN-P, 2006

Manual de Controlador Lógico Programável Modelo ControlLogix<sup>®</sup>, catalogo número 1756-RM003-EN-P, 2005

MIYAGI, P. E., **Controle Programável**, Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discreto, Editora Edgard Blücher Ltda., ed. 1, 1996

MONTEIRO, L. H. A., **Sistemas Dinâmicos**, Editora Livraria da Física, ed.1, São Paulo, 2002.

MORAES, C. C. e CASTRUCCI P. L., **Engenharia de Automação Industrial**, LTC, ed. 1, 2001

MOORE, C. F., **Control Modes - Closed-Loop Response**, Instrument Engineers' Handbook: Process Control. 3<sup>a</sup> ed.,1999.

OGATA, K., **Discrete Time Control Systems**, Prentice-Hall, ed. 2, 1995

OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**, LTC, ed. 3, 1995

SHIRAHIGE, A. B. E PEREIRA, S. L., **Metodologia para Aferição da Ação de Controle Proporcional Integral Derivativa Implementada em Controladores Industriais**, ISA, CD-ROM, 2005.

ZIEGLER, J. G. e NICHOLS, N. B., **Optimm Settings for Automatic Controllers**, ASME Trans., 64, p. 759-768, 1942