

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**METODOLOGIA PARA RE-SINTONIA DE
CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS**

Francisco Guerra Fernandes Júnior

**Natal-RN
Fevereiro de 2006**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Francisco Guerra Fernandes Júnior

METODOLOGIA PARA RE-SINTONIA DE CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. D.Sc. André Laurindo Maitelli

Co-Orientador: Prof. D.Sc. Luiz Affonso H. Guedes de Oliveira

**Natal-RN
Fevereiro de 2006**

Francisco Guerra Fernandes Júnior

METODOLOGIA PARA RE-SINTONIA DE CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovada por:

Prof. D.Sc. André Laurindo Maitelli
DCA/UFRN

Prof. D.Sc. Luiz Affonso H. Guedes de Oliveira
DCA/UFRN

Prof. D.Sc. Otacílio da Mota Almeida
DEE/UFC

Prof. D.Sc. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo
DCA/UFRN

**Natal-RN
Fevereiro de 2006**

Agradecimentos

Ao Deus eterno, nosso pai, ao seu filho Jesus Cristo e ao divino Espírito Santo os quais me guiam e nunca me abandonaram em nenhum momento da minha vida.

Aos meus pais Francisco Guerra Fernandes e Raimunda Ivone Chaves Fernandes aos quais devo tudo o que sou hoje.

Aos meus irmãos Gianno Sávio Guerra Chaves Fernandes, Késsia Karina Guerra Chaves Fernandes e Keliane Guerra Chaves Fernandes pelo bom convívio e incentivo.

Aos professores André Laurindo Maitelli e Luiz Affonso H. Guedes de Oliveira pela orientação, apoio, compreensão e amizade demonstradas durante minha vida acadêmica.

Ao professor Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo e ao colega José Soares Batista Lopes pela ajuda e amizade demonstradas durante minha vida acadêmica.

A todos os colegas, professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica PPgEE/UFRN pela colaboração.

Aos os colegas da BPCAS com os quais convivi e ainda espero continuar convivendo.

A CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

Sumário.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	x
Resumo.....	xi
Abstract.....	xii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Introdução	2
1.2. Automação Industrial	3
1.2.1. Introdução	3
1.2.2. Segmentos da Automação	4
1.2.3. Objetivos da Automação	6
1.2.4. Tecnologias Associadas à Automação	6
1.3. Objetivo e divisão do trabalho.....	9
Capítulo 2 – Controladores PID Industriais.....	10
2.1. Introdução	11
2.2. Controlador PID	11
2.2.1. Ação Proporcional	11
2.2.2. Ação Proporcional - Integral	12
2.2.3. Ação Proporcional - Integral - Derivativa	13
2.3. Métodos Práticos de Sintonia de Controladores P.I.D.	16
2.3.1. Método da Sensibilidade Limite.....	16
2.3.2. Método da Curva de Reação.....	18
2.3.3. Método do Lugar das Raízes	21
2.4. Controladores Lógicos Programáveis (CLPs)	25
2.4.1. Introdução	25
2.4.2. Aplicações de CLPs na Indústria.....	26
2.5. PID no CLP	27
2.5.1. Generalidades	27
2.5.2. Conceito de PID	28
2.5.3. Equação PID	28
2.5.4. Parâmetros da Instrução PID	29
2.5.5. Flags da Instrução PID	34
Capítulo 3 - Identificação de Sistemas	36
3.1. Introdução	37
3.2. Conceito e Etapas da Identificação de Sistemas.....	37
3.3. Método dos Mínimos Quadrados (Least Squares)	39
3.4. Mínimos Quadrados Recursivo (Recursive Least Squares)	41
Capítulo 4 - Proposta	44
4.1. Introdução	45
4.2. O Projeto.....	46

4.3.	Comunicação do Projeto.....	50
4.4.	Descrição das Rotinas do Software	51
Capítulo 5 – Estudo de Caso.....		55
5.1.	Introdução.....	56
5.2.	Modelo da Planta.....	56
5.3.	Resultados Experimentais	58
5.3.1.	Experimento Realizado no Sistema de Primeira Ordem	58
5.3.2.	Experimento Realizado no Sistema de Segunda Ordem	65
Capítulo 6 – Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros.....		72
Referências Bibliográficas.....		73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Integração de um sistema industrial.....	8
Figura 2.1 – Diagrama de blocos da ação proporcional do PID.....	12
Figura 2.2 – Diagrama de blocos da ação proporcional-integral do PID.....	12
Figura 2.3 – Comparação entre a ação proporcional e a ação proporcional-integral.....	13
Figura 2.4 – Diagrama de blocos da ação proporcional-integral-derivativa do PID.....	14
Figura 2.5 – Resposta da planta em malha fechada pelo método da sensibilidade limite....	16
Figura 2.6 – Resposta da planta em malha fechada pelo método da sensibilidade limite modificado.....	17
Figura 2.7 – Resposta da planta em malha aberta pelo método da curva de reação.....	19
Figura 2.8 – Sistema de controle.....	23
Figura 2.9 – Diagrama mostrando a medida de ângulos, num ponto de testes, a partir de pólos e zeros a malha aberta.....	24
Figura 2.10 – Arquitetura Básica de um CLP.....	25
Figura 2.11 Formato da Instrução PID.....	27
Figura 2.12 Exemplo de Controle PID.....	28
Figura 2.13 Endereços Típicos da Instrução.PID.....	30
Figura 2.14 Tela de Introdução dos Dados na instrução PID.....	30
Figura 3.1 - Esquema de um sistema de identificação.....	38
Figura 4.1 - Diagrama de blocos do projeto.....	48
Figura 4.2 - Fluxograma do projeto.....	49
Figura 4.3 - Diagrama do Sistema de Comunicação.....	50
Figura 4.4 – Tela de identificação do sistema.....	51
Figura 4.5 – Tela de visualização do sistema.....	52
Figura 4.6 – Tela de re-sintonia do controlador PID.....	53
Figura 5.1 – Sistema Completo.....	56
Figura 5.2 - Modelo da Planta.....	57
Figura 5.3 - Tela de identificação do sistema de primeira ordem.....	58
Figura 5.4 – Parâmetros obtidos da identificação do sistema de primeira ordem.....	60
Figura 5.5 - Validação da identificação do sistema de primeira ordem.....	60
Figura 5.6 – Resposta do sistema de primeira ordem obtido com a entrada MV, obtida do CLP no ponto de operação, aplicada no modelo em malha aberta.....	61
Figura 5.7 - Tela de re-sintonia do controlador PID para sistemas de primeira ordem.....	62
Figura 5.8 – Root-Locus do sistema de primeira ordem.....	63
Figura 5.9 – Tela do RSLogix do bloco PID implementado no CLP.....	63
Figura 5.10 – Resposta da planta com controlador PID em torno do ponto de operação.....	64
Figura 5.11 – Sinal da MV durante a validação do projeto do controlador PID.....	64
Figura 5.12 - Tela de identificação do sistema de segunda ordem.....	65
Figura 5.13 - Parâmetros obtidos da identificação do sistema de segunda ordem.....	67
Figura 5.14 - Validação da identificação do sistema de segunda ordem.....	67
Figura 5.15 - Resposta do sistema de segunda ordem obtido com a entrada MV, obtida do CLP no ponto de operação, aplicada no modelo em malha aberta.....	68
Figura 5.16 - Tela de re-sintonia do controlador PID para sistemas de segunda ordem.....	69
Figura 5.17 - Root-Locus do sistema de primeira ordem.....	70

Figura 5.18 - Tela do RSLogix do bloco PID implementado no CLP.....	70
Figura 5.19 - Resposta da planta com controlador PID em torno do ponto de operação.....	71
Figura 5.20 - Sinal da MV durante a validação do projeto do controlador PID.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Os efeitos na resposta, do sistema em cadeia fechada, ao adicionar o modo proporcional, integral e derivativo.....	15
Tabela 2.2 - Parâmetros do controlador PID pelo método da sensibilidade limite.....	16
Tabela 2.3 - Parâmetros do controlador PID pelo método da sensibilidade limite modificado.....	18
Tabela 2.4 – Parâmetros do controlador PID pelo método da curva de reação.....	19
Tabela 2.5 – Parâmetros do controlador PID pelo método da curva de reação para sistemas de primeira ordem com atraso.....	20
Tabela 2.6 Constantes de Ganho Padrão (ISA).....	28
Tabela 2.7 Seleção de Limite de Saída CV.....	33
Tabela 5.1 – Descrição dos parâmetros.....	57
Tabela 5.2 – Descrição dos Valores.....	57

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a1 e a2:	Orifícios de saída dos tanques da planta dos tanques;
A1 e A2:	Áreas das bases dos tanques 1 e 2 da planta dos tanques;
CAD/CAM:	Computer Aided Design e Computer Aided Manufacturing;
CLP:	Controlador Lógico Programável;
CV:	Control Variable;
g:	Aceleração da gravidade;
K:	Ganho da planta;
Ki:	Constante Integral do PID;
Kd:	Constante Derivativa do PID;
Km:	Constante da bomba da planta dos tanques;
Kp ou Kc:	Ganho proporcional do PID;
Ln:	Ponto de operação n da planta dos tanques;
L1 e L2:	Níveis dos tanques 1 e 2 da planta dos tanques;
OPC:	Object Linked and embedding for Process Control;
PID:	Proporcional Integral Derivativo;
PI:	Proporcional Integral;
PRBS:	Pseudo Random Binary Signal;
PV:	Process Variable;
RNA:	Redes Neurais Artificiais;
SDCD :	Sistema Digital de Controle Distribuído;
SP:	Set Point;
Td:	Tempo Derivativo do PID;
Ti:	Tempo integral do PID;
Vp:	Tensão aplicada na bomba da planta dos tanques.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um método de projeto e implementação de controladores PID, baseado em instrumentação industrial. Será apresentado um sistema automático de re-sintonia de controladores PID, para sistemas de primeira e segunda ordem.

O software apresentado neste trabalho é aplicado em plantas controladas por controladores PID implementados num CLP. O software é aplicado para fazer a auto-sintonia dos parâmetros do controlador PID de plantas que necessitem desta sintonia. O software apresenta duas etapas, a primeira é a etapa de identificação do sistema utilizando o algoritmo dos mínimos quadrados recursivos e a segunda é a etapa de projeto dos parâmetros do controlador PID utilizando o algoritmo do método do lugar das raízes.

Um fato importante deste trabalho é a utilização de instrumentação industrial para a realização dos experimentos. Os experimentos foram realizados em plantas reais controladas por controladores PID implementados em um CLP. Assim não se tem apenas resultados teóricos obtidos de experimentos feitos com programas computacionais, e sim resultados obtidos de sistemas reais. Os experimentos mostraram bons resultados obtidos com o software desenvolvido.

ABSTRACT

The present work has as objective to present a method of project and implementation of controllers PID, based on industrial instrumentation. An automatic system of auto-tuning of controllers PID will be presented, for systems of first and second order.

The software presented in this work is applied in controlled plants by PID controllers implemented in a CLP. Software is applied to make the auto-tuning of the parameters of controller PID of plants that need this tuning. Software presents two stages, the first one is the stage of identification of the system using the least square recursive algorithm and the second is the stage of project of the parameters of controller PID using the root locus algorithm.

An important fact of this work is the use of industrial instrumentation for the accomplishment of the experiments. The experiments had been carried through in controlled real plants for controllers PID implemented in the CLP. Thus has not only one resulted obtained with theoreticians experiments made with computational programs, and yes resulted obtained of real systems. The experiments had shown good results gotten with developed software.

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Introdução

A necessidade de se controlar sistemas e processos físicos existe desde tempos remotos. O controle manual, primeira forma de controle utilizada pelo homem, e ainda presente em muitos processos, apresenta a necessidade de um operador humano que deve conhecer o sistema e ter razoável experiência e habilidade. Com o crescente aumento no grau de sofisticação das atividades humanas surgiu o interesse e a necessidade de automatizar ou semi-automatizar determinados processos, isso foi possível a partir do desenvolvimento científico e tecnológico, que dentre os diversos conhecimentos nos trouxe as teorias clássicas de controle. Contudo, com o avanço da tecnologia, os sistemas e processos ficaram ainda mais complexos, tornando ineficaz, ou até mesmo impossíveis, a utilização dos controladores convencionais obtidos a partir da teoria clássica. Isso desencadeou uma busca por novos métodos e estratégias de controle tais como: controle multivariável, controle adaptativo, controle preditivo e sistemas de controle inteligente.

Existe um grande número de métodos para a sintonia automática de controladores, os quais requerem informações variadas sobre o processo. Entre os métodos de sintonia automática dos parâmetros de um controlador tem-se: Método da Sensibilidade Limite, Método do Relé, Método da Curva de Reação e Método do Lugar das Raízes.

A utilização de automação nas indústrias tem sido cada vez maior, proporcionando um aumento na qualidade e quantidade da produção e, ao mesmo tempo, oferecendo preços atrativos. Por esses e outros motivos é importante trazer a instrumentação industrial para os protótipos montados em laboratórios, tornando estes ambientes mais próximos da realidade industrial. Passando assim de resultados teóricos obtidos de experimentos feitos com programas computacionais, para resultados obtidos em sistemas reais, utilizando equipamentos utilizados nas indústrias, por exemplo.

1.2. Automação Industrial

1.2.1. Introdução

O crescente avanço tecnológico nas mais diversas áreas do conhecimento humano tem se mostrado, nos últimos anos, surpreendente. A utilização de automação nas indústrias tem sido cada vez maior, proporcionando um aumento na qualidade e quantidade da produção e, ao mesmo tempo, oferecendo preços atrativos. Ou seja, a utilização da automação aumenta a eficiência, tornando as empresas competitivas no mercado. Portanto, trata-se de um caminho “de mão única”. Para se fazer frente à concorrência procura-se aumentar a produtividade (razão entre o volume produzido e os recursos empregados), reduzir custos de produção e aumentar a qualidade dos produtos oferecidos. Ao mesmo tempo, para atender às exigências de diversidade do mercado consumidor e a gradativa redução da vida útil dos produtos, procura-se ampliar a flexibilidade na utilização dos sistemas produtivos, [1].

O avanço da Automação está ligado, em grande parte, ao avanço da microeletrônica que se deu nos últimos anos. Pouco a pouco, a microeletrônica invadiu os setores produtivos das indústrias, propiciando a automação. O processo de automação não atinge apenas a produção em si, substituindo o trabalho braçal por robôs e máquinas computadorizadas, mas permite enormes ganhos de produtividade ao integrar tarefas distintas com a elaboração de projetos, o gerenciamento administrativo e a produção.

A automação industrial pode ser definida como um conjunto de técnicas destinadas a tornar automáticos vários processos na indústria, substituindo o trabalho muscular e mental do homem por equipamentos diversos. O conceito de automação varia com o ambiente e experiência da pessoa envolvida. São exemplos de automação, [1]:

- Para uma dona de casa, a máquina de lavar roupa ou lavar louça.
- Para um empregado da indústria automobilística, pode ser um robô.
- Para uma pessoa comum, pode ser a possibilidade de tirar dinheiro em um caixa eletrônico.

O conceito de automação inclui a idéia de usar a potência elétrica ou mecânica para acionar algum tipo de máquina. Deve acrescentar à máquina algum

tipo de inteligência para que ela execute sua tarefa de modo mais eficiente e com vantagens econômicas e de segurança.

Diversas técnicas para automação industrial podem ser destacadas: o Comando Numérico, os Controladores Lógicos Programáveis, o Controle de Processo, os Sistemas CAD/CAM (Computer Aided Design e Computer Aided Manufacturing) e a Robótica.

1.2.2. Segmentos da Automação

Existem, basicamente, dois segmentos da automação industrial, segundo a manipulação das variáveis a serem controladas. Quando tais variáveis são do tipo analógica ou de tempo contínuo, presente na maioria dos processos industriais, tem-se um controle de processo do tipo contínuo (Controle de Processos, Controle Regulatório); caso as variáveis sejam do tipo discreta, ou digital, tem-se um Controle do tipo discreto (Controle Discreto), [1].

Indústrias que se caracterizam pelo controle de processo do tipo discreto, são as indústrias manufatureiras, de fabricação por lote, cujo expoente é a indústria automobilística. Indústrias que se caracterizam pelo controle de processos do tipo contínuo são as indústrias de manipulação, cujo maior expoente é a indústria química, além da farmacêutica, petroquímica, entre outras.

O controle do tipo discreto, voltado aos processos digitais, teve seu início marcado pela utilização de dispositivos eletromecânicos do tipo a relés. E até o início da década de 60, esta era praticamente a única opção possível. Com o advento dos dispositivos microprocessados, vieram os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), onde a forma básica de programação é oriunda da lógica de programação dos diagramas elétricos a relés. Próprio para ambientes industriais, os controladores realizam uma rotina cíclica de operação, o que caracteriza seu princípio de funcionamento, e operam apenas variáveis digitais, efetuando controle discreto, portanto. Quando tais equipamentos manipulam variáveis analógicas, são muitas vezes chamados de Controladores Programáveis.

Já o controle do tipo analógico desenvolveu-se, inicialmente, com o surgimento dos amplificadores operacionais, por meio do qual as ações de controle eram implementadas. Controladores de processos contínuos evoluíram juntamente com a microeletrônica e passaram a utilizar circuitos mais complexos, microprocessados, de forma a poderem utilizar poderosos recursos e efetuarem

técnicas de controle dos mais diversos tipos, tais como: Proporcional-Integral-Derivativo-PID, PID adaptativo (não linear), Lógica Fuzzy (lógica nebulosa), Preditivo, entre outros. E com isso surgiram também várias técnicas de sintonia de controladores entre elas tem-se: método da sensibilidade limite, método da curva de reação e método do lugar das raízes, [2].

Surgiram os controladores de processos contínuos de uma única malha de controle em loop, os single loop. Muito utilizados para o controle de temperatura de ambientes ou de processos, para o controle de pressão em líquidos e de vazão em tubulações de gases, os controladores do tipo single loop evoluíram e passaram a controlar várias malhas do processo, originando assim os sistemas multi loops. Além de poder implementar e executar todos os tipos de ações de controle possíveis, de forma simultânea, controlam inúmeros pontos do processo por meio de grandes concentradores de dados chamados de *mainframes*.

Juntamente com o aparecimento das técnicas digitais oriundas da revolução eletrônica em meados do século XX, a técnica de controle distribuída propicia o aparecimento de uma filosofia de controle: o Sistema Digital de Controle Distribuído - SDCCD. A mesma é caracterizada pelos diferentes níveis hierárquicos estabelecidos pela comunicabilidade entre uma máquina de estado (processo propriamente dito) e outra(s), [1].

Tais processos com suas unidades de controle se constituem em verdadeiros "nós", que além de integrar todo sistema de supervisão com interfaces homem-máquina, abre caminho para a intercomunicabilidade e futura padronização de todos os equipamentos de sensoramento, controle e atuação nos mais diferentes níveis.

Um SDCCD pode ser representado por uma sala central, gerenciadora de controle e supervisão global, microprocessada em rede com vários outros controladores de responsabilidade local, caracterizando-se pela transformação de processos automatizados em verdadeiros sistemas de automação supervisionados com a capacidade e rastreamento de todas as etapas do processo produtivo, bem como a flexibilização e aumento da capacidade de integração de seus componentes, prevendo, portanto, um aumento do processo e do nível de automação de forma natural e continuada.

1.2.3. Objetivos da Automação

A automação de um processo industrial ou de apenas uma operação do mesmo pode justificar-se economicamente com base em um ou mais dos critérios abaixo:

- a) Qualidade, isto é, fabricação em faixa de tolerância estreita:
 - pela utilização de controle de qualidade eficiente;
 - pela compensação automática de deficiências do processo;
 - pelo uso de processos de fabricação sofisticados.
- b) Flexibilidade, isto é, capacidade de admitir com facilidade e rapidez, alterações nos parâmetros do processo de fabricação, em função:
 - de inovações freqüentes no produto;
 - do atendimento a especificidades do cliente;
 - da produção de pequenos lotes.
- c) Produtividade, isto é, o uso mais eficiente da matéria-prima, energia, equipamentos e instalações, através da:
 - produção de refugo quase zero, como consequência de uma supervisão da qualidade;
 - redução dos estoques.
- d) Viabilidade Técnica, isto é, permitir a execução de operações impossíveis de realizar por métodos convencionais, em função:
 - de necessitar processamento imediato de grande volume de informações e/ou complexidade;
 - de limitações do homem para executar a operação;
 - de condições desumanas de trabalho.

1.2.4. Tecnologias Associadas à Automação

O CLP para a implementação de controle discreto ainda se configura como o principal equipamento utilizado pelas indústrias, e deve continuar a ser largamente utilizado, pois a cada dia novos recursos lhe são adicionados, tornando-os cada vez mais práticos e eficientes nas tarefas a que se destina. Dentre esses novos recursos, é principalmente em nível de comunicação que se observam as principais inovações. Tanto na comunicação entre os operadores e os sistemas (interfaces

homem-máquina) como na comunicação entre máquinas (redes de campo), as facilidades atuais são inúmeras, com uma grande diversidade de opções de mercado, [1].

Existe uma tendência em definir padrões entre fabricantes, que permitam ao projetista dispor de tecnologias abertas, possuindo alto grau de intercomunicabilidade de vários fabricantes. Neste sentido, algumas experiências vêm se concretizando recentemente, como é o caso do OPC (Object Linked and embedding for Process Control – o mesmo que o OLE do Windows, o qual permite realizar transferências de objetos entre diferentes aplicativos) cujo desenvolvimento foi encabeçado pela Microsoft, e tende a se tornar o padrão de relacionamento entre os diversos módulos de software ou hardware de diferentes fabricantes. Há ainda, no caso específico dos PLCs, a Norma IEC 1131-3 que define padrões para o projeto em nível de programação desses equipamentos, [1].

Qualquer sistema, seja ele comercial ou industrial, gera informações que precisam ser armazenadas, ou alocadas em uma tabela, muitas vezes tratadas matematicamente e/ou visualizadas graficamente. O fato é que qualquer processo industrial necessita processar um grande número de informações num curto período de tempo, gerando, portanto, um enorme banco de dados que acaba se tornando indispensável a outros setores que compõem o sistema da empresa. Desta forma, com o sistema todo informatizado e integrado, pode-se efetivar um planejamento adequado da produção, a curto e médio prazo.

Aspirando também a uma redução de custos, o sistema passou a ter junto aos computadores os CLPs, que são controladores e dispositivos digitais com capacidade de processamento autônomo de uma forma geral, possuindo uma intercomunicabilidade por meio físico adequado, de forma a obter grandes topologias dentro de regras gerais e procedimentos definidos para a transmissão de dados. Cria-se então o sistema de comunicação em rede e os computadores passam a trocar dados entre eles e a compartilhar recursos, [3].

Quando informações de um sistema de controle são tratadas, a partir de dados coletados por meio de dispositivos sensores ou de qualquer dispositivo indicador de estado de um equipamento, por meio do processamento de dados feito por um sistema de supervisão, segundo um grande banco de dados, todos os níveis acima, como o de coordenação, planejamento e gerenciamento, são beneficiados de tal modo a melhor coordenar a programação e o controle de produção, planejando o

processo de fabricação como um todo e estabelecendo uma nova gestão de gerenciamento dos negócios.

Ou seja, ao estabelecer a integração dos dados digitalmente por meio de uma rede de computadores entre os mais diferentes níveis hierárquicos dentro de uma indústria, reduz-se o custo de fabricação, pela eficiência da manipulação do produto, aumenta-se a produtividade e se estabelece um novo conceito em automação industrial, a integrabilidade de seus componentes nos mais diferentes níveis. A figura 1.1 mostra a integração dos diferentes níveis hierárquicos de um sistema industrial, desde os sensores até a gerência.

As grandes decisões dentro de um sistema organizacional de produção passam a ser tomadas dentro do mais alto grau do conceito da qualidade, baseado em dados concretos e atuais, que se originam nas mais diferentes unidades de controle do chão de fábrica. Informações precisas, envolvendo o processamento de um grande número de variáveis, são agentes sincronizadores do processo de fabricação, fazendo com que haja um planejamento global mais adequado, sustentado pelas limitações operacionais diante da capacidade de produção, regulando o nível de estoque, definindo e projetando produtos, estabelecendo estratégias e procedimentos de gerenciamento e diagnósticos. Não obstante, não é difícil verificar na prática, a importância de um sistema de comunicação integrado, estabelecido nos mais diferentes níveis de controle dentro da estrutura de recursos oferecidos por uma rede de processamento digital.

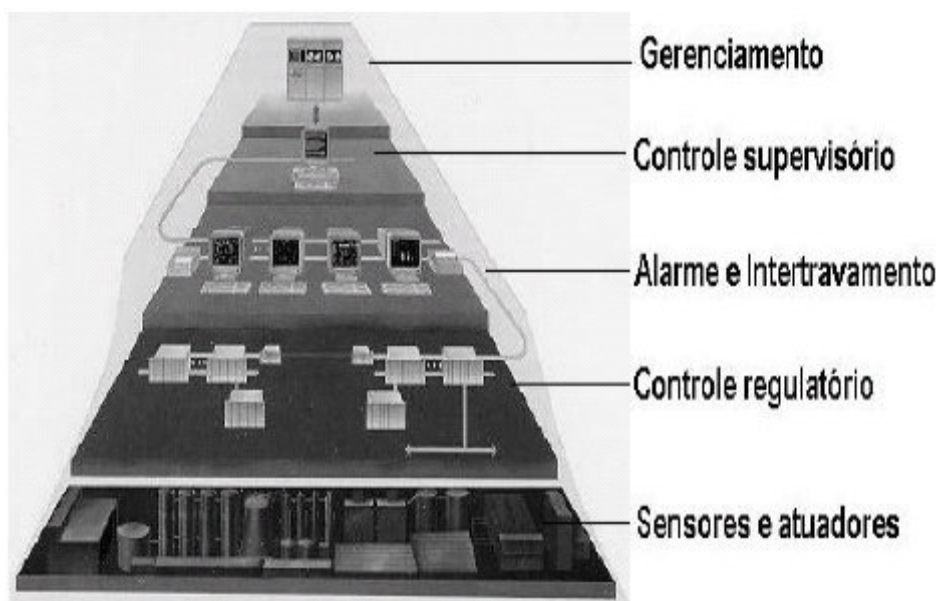


Figura 1.1 - Integração de um sistema industrial

Vários programas de computador foram criados com a tentativa de obter maior produtividade, qualidade e competitividade. Dentro desta visão de integração entre o chão da fábrica e o ambiente corporativo, funcionam como instrumentos sofisticados de automação integrada, desenvolvendo técnicas e estabelecendo novas filosofias de gerenciamento e controle tanto operacional quanto administrativo. Surge uma nova visão integrada por computador.

1.3. Objetivo e divisão do trabalho

O objetivo deste trabalho é apresentar o método de projeto e implementação de controladores PID, baseado em instrumentação industrial. O software que será apresentado é aplicado em plantas de primeira e segunda ordem controladas por controladores PID implementados num CLP. O software fará a auto-sintonia dos parâmetros do controlador PID de plantas que necessitem desta sintonia.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

Neste capítulo foi apresentado conceitos de automação industrial. O capítulo 2 apresenta os conceitos e métodos de sintonia de controladores PID, conceitos de Controladores Lógicos Programáveis (CLP) e utilização de controladores PID no CLP. O capítulo 3 trata de identificação de sistemas, mais especificamente o método dos mínimos quadrados. O capítulo 4 apresenta a proposta da dissertação de mestrado, mostrando a arquitetura do projeto que trata a parte de hardware, o diagrama de blocos do sistema e funcionalidades do software. O capítulo 5 apresenta o estudo de caso mostrando aplicações do projeto em plantas de nível de primeira e segunda ordem. O capítulo 6 apresenta as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros. E por fim, as referências bibliográficas.

Capítulo 2 – Controladores PID Industriais

2.1. Introdução

Nos métodos práticos de sintonia o primeiro passo na utilização dos controladores P, PI, PD, PID deve ser a da escolha dos modos a utilizar (proporcional, derivativo, integral, ou uma combinação destes). Uma vez tomada a decisão, procede-se ao ajuste dos parâmetros do controlador. O ajuste, calibração ou sintonia do controlador consiste em deduzir, partindo da resposta do sistema, quando este é sujeito a entradas específicas, determinados valores que vão permitir o cálculo dos referidos parâmetros, [4].

A vantagem deste procedimento é não existir necessidade de conhecer o modelo do sistema (por vezes muito difícil de determinar). Pode-se assim concluir que se deverá recorrer a este procedimento somente quando o custo de calibração do controlador for inferior ao custo associado à análise do sistema e projeto do controlador adequado.

Sempre que a função de transferência do sistema for conhecida, pode-se utilizar o método analítico. Este método consiste em sintonizar os modos PID para uma aplicação específica de modo a que determinados critérios de desempenho sejam verificados.

Finalmente, é importante realçar que não é obrigatório que se utilize apenas um destes métodos, na medida em que, na maior parte das vezes, os projetos resultam da sua combinação.

Antes de proceder à apresentação propriamente dita dos dois procedimentos referidos anteriormente, será conveniente analisar algumas das ações básicas de controle utilizadas na indústria e a sua contribuição para a resposta de um sistema.

2.2. Controlador PID

2.2.1. Ação Proporcional

Neste tipo de controlador a relação entre a sua saída e o sinal de erro, $e(t)$, é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) \xrightarrow{L} U(s) = K_p E(s) \quad (2.1)$$

em que K_p é designado por ganho proporcional, [5].

Um controlador proporcional consiste essencialmente num amplificador com ganho ajustável (figura 2.1).

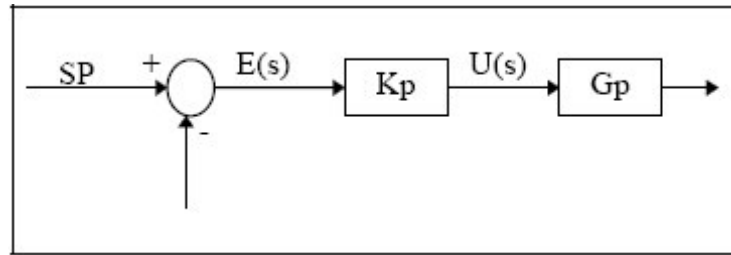


Figura 2.1 – Diagrama de blocos da ação proporcional do PID

Uma característica importante desta ação de controle é a existência de um erro residual permanente quando o sistema não possui um integrador. O erro estacionário que é dependente de K_p e da planta, pode ser minimizado por um aumento de K_p . No entanto deve-se notar que o aumento deste parâmetro conduz a um aumento do tempo de estabelecimento e eventualmente pode conduzir à instabilidade, [4].

Conclui-se assim que este tipo de controlador só pode ser usado, quando o ganho proporcional for suficientemente elevado para reduzir o erro estacionário a um nível aceitável.

2.2.2. Ação Proporcional - Integral

Considerando a saída do controlador como função do erro e da integral do erro, tem-se um controlador proporcional – integral conforme apresentado na equação 2.2 e a figura 2.2 apresenta o diagrama de blocos da ação proporcional-integral do PID, [5].

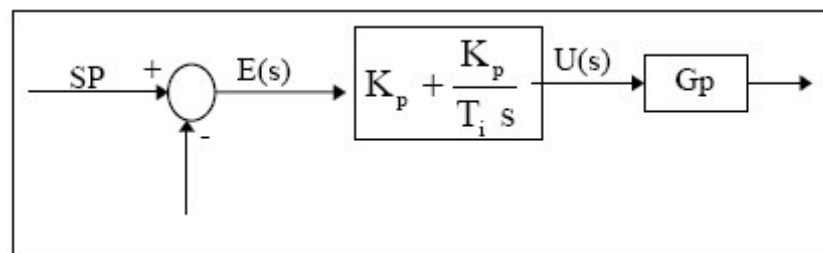


Figura 2.2 – Diagrama de blocos da ação proporcional-integral do PID

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \xrightarrow{L} U(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})E(s) \quad (2.2)$$

em que T_i (tempo integral) pode ser interpretado como o tempo necessário para que a contribuição da ação integral iguale a da ação proporcional, é expresso em segundos ou minutos (por repetição).

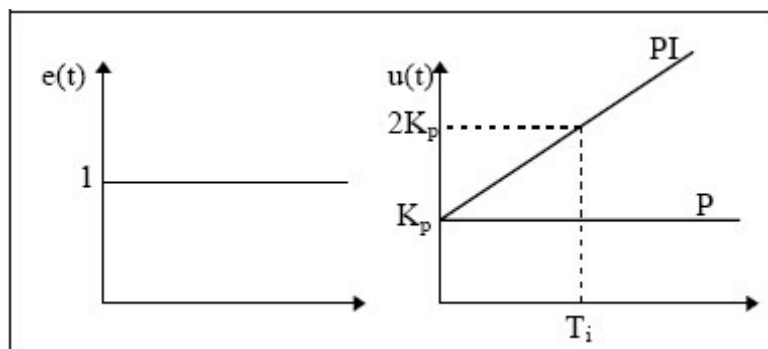


Figura 2.3 – Comparação entre a ação proporcional e a ação proporcional-integral

A componente integral, ao adicionar um pólo na origem da função de transferência do controlador, elimina o erro estacionário de posição, desde de que o sistema em malha fechada seja estável. Se, por um lado, como já referido anteriormente, a ação integral elimina o erro estacionário, por outro, aumenta o tempo de estabelecimento e piora a estabilidade relativa, o que usualmente é indesejável, [4].

Como consequência, o ganho da ação proporcional deve ser reduzido, sempre que esta esteja combinada com a ação integral, ver figura 2.3. O PI é utilizado em sistemas com frequentes alterações de carga, sempre que o controlador P, por si só, não seja capaz de reduzir o erro estacionário a um nível aceitável. Contudo o sistema deve ter alterações de carga relativamente lentas, para evitar oscilações induzidas pela ação integral.

2.2.3. Ação Proporcional - Integral - Derivativa

Este modo resulta da combinação dos modos proporcional, integral e derivativo. Pode-se afirmar que resulta numa combinação das vantagens de um PI e as vantagens de um PD, [4]. A saída do controlador é dada pela equação 2.3 e a figura 2.4 apresenta o diagrama de blocos da ação proporcional-integral-derivativa do PID.

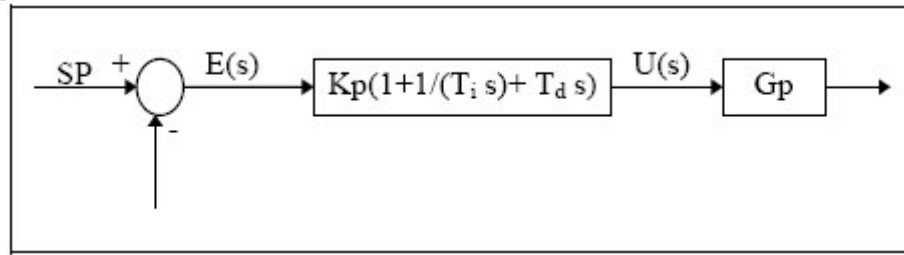


Figura 2.4 – Diagrama de blocos da ação proporcional-integral-derivativa do PID

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \xrightarrow{L} U(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)E(s) \quad (2.3)$$

Neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações, o que conduz a uma velocidade de resposta superior quando comparado com P e PI.

No entanto, estas propriedades assumem um caráter geral, já que podem existir exceções em determinados sistemas.

Geralmente, para uma função de transferência em malha aberta com a seguinte forma:

$$\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.4)$$

um K_p elevado tem o efeito de reduzir o tempo de subida e o erro estacionário (sem nunca o eliminar). O controle integral terá como efeitos, por um lado, eliminar o erro estacionário e por outro piorar a resposta transitória, isto é, torná-la mais oscilatória. Sempre que se utilize controle integral, deve-se sempre testar inicialmente com um K_p reduzido. A utilização do controle derivativo tem como principal consequência uma melhoria da estabilidade do sistema, reduzindo a sobrelevação e melhorando a resposta transitória, [6].

Os efeitos na resposta, do sistema em malha fechada, ao adicionar o modo proporcional, integral e derivativo são listados na tabela 2.1.

Note que estas correlações não são exatas, uma vez que, se alterar um dos parâmetros do controlador pode-se estar alterando o efeito das outras ações. Por esta razão, a tabela 2.1 só deve ser usada como referência quando se está a determinar os parâmetros do controlador.

Resposta MF	Tempo de Subida	Sobreelevação	Tempo de Estabilização	Erro Estacionário
Proporcional	Diminuição	Aumento	Sem alteração	Diminuição
Integral	Diminuição	Aumento	Aumento	Elimina
Derivativo	Sem alteração	Diminuição	Diminuição	Sem alteração

Tabela 2.1 - Os efeitos na resposta, do sistema em cadeia fechada, ao adicionar o modo proporcional, integral e derivativo.

Quanto à decisão do tipo de controlador a usar numa determinada aplicação, não é possível obter uma resposta definitiva. Idealmente, o controlador mais simples que satisfaça a “resposta desejada” é o que deve ser escolhido, infelizmente esta é uma escolha que geralmente só se pode fazer quando a aplicação é simples ou quando existe alguma informação relativa a aplicações semelhantes.

A seleção do controlador deve depender das condições operacionais do sistema e de especificações de desempenho tais como, o erro estacionário máximo, a sobrelevação máxima e tempo de estabelecimento permitido. Se o erro estacionário não é tolerado, então o modo integral deve ser incluído no controlador, uma vez que esta é a única ação que o permite eliminar ou reduzir. A necessidade da ação derivativa pode ser ditada por uma sobrelevação máxima e/ou tempo de estabelecimento. Se um reduzido erro estacionário não é crítico para as condições operacionais do sistema, então é possível omitir o modo integral e o uso do modo derivativo depende entre outros fatores da necessidade ou não de adicionar ganho suplementar ao modo proporcional, [6].

Como regra geral, pode-se afirmar que se adiciona o modo proporcional para obter um determinado tempo de subida, que se adiciona o modo derivativo para obter uma determinada sobrelevação e que o modo integral só deve ser introduzido para eliminar o erro estacionário.

A questão que se coloca agora é como selecionar os parâmetros dos controladores de modo a poder obter uma resposta “satisfatória”, quando se controla um determinado sistema, perante um quase completo desconhecimento da sua dinâmica (1º Procedimento).

Assim, torna-se necessário recorrer a métodos empíricos para resolver este problema. A seguir serão expostos dois métodos inicialmente propostos por Ziegler e Nichols (1942) e que resultam de testes experimentais realizados em vários sistemas.

2.3. Métodos Práticos de Sintonia de Controladores PID

Há vários métodos de sintonia de controladores PID. Aqui iremos descrever alguns desses métodos: método da sensibilidade limite, método da curva de reação e método do lugar das raízes.

2.3.1. Método da Sensibilidade Limite

Este método, baseado no ajuste de uma malha fechada até se obter oscilações com amplitude constante, utiliza um conjunto de fórmulas para determinar os parâmetros do controlador, as quais requerem duas medidas do sistema: o Ganho crítico (G_u : o ganho mínimo que torna o processo criticamente estável), e o período de oscilação correspondente, P_u , [4].

Procedimento para a Calibração dos Parâmetros do Controlador:

1. Reduzir as ações integral e derivativa ao seu efeito mínimo;
2. Iniciar o processo com ganho reduzido;
3. Aumentar o ganho até que a variável controlada (saída do sistema) entre em oscilações com amplitude constante, enquanto se provocam pequenas perturbações no sistema. Anotar o ganho, G_u , e o período de oscilação P_u (figura 2.5), [9];

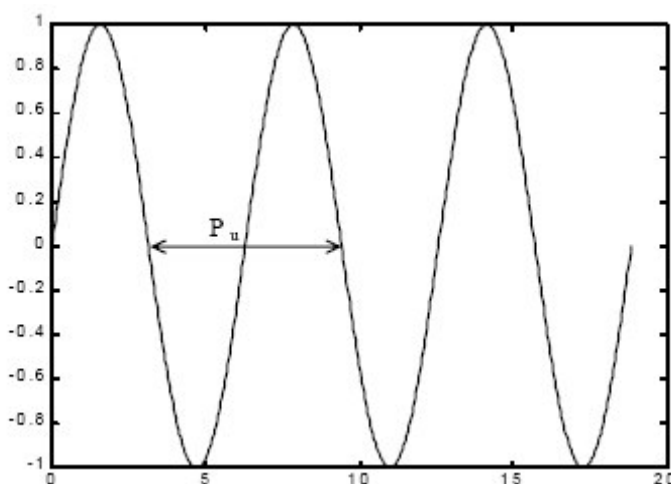


Figura 2.5 – Resposta da planta em malha fechada pelo método da sensibilidade limite

Com a obtenção destes valores, pode-se calcular os parâmetros do controlador como mostrado na tabela 2.2.

Controlador	Fórmulas		
P	$K_P = 0.5G_u$		
PI	$K_P = 0.45G_u$	$T_i = P_u/1.2$	
PID	$K_P = 0.6G_u$	$T_i = P_u/2.0$	$T_d = P_u/8$

Tabela 2.2 - Parâmetros do controlador PID pelo método da sensibilidade limite

Após uma análise da tabela 2.2 verifica-se que:

- O ganho proporcional é reduzido em 10% quando o modo integral é introduzido, uma vez que este torna o sistema menos estável.
- Quando o modo derivativo é adicionado, verifica-se um aumento de P e uma redução de T_i devido ao efeito estabilizador do derivador.
- Os valores de 0.6 G_u e 0.125 P_u são muito conservadores quando não existe ação integral, uma vez que a ausência desta última torna os sistemas mais estáveis, permitindo um aumento do ganho.

No entanto, este método de sintonia apresenta as seguintes desvantagens:

1. As fórmulas acima descritas não garantem uma resposta ótima;
2. Nem todos os sistemas podem entrar em oscilação, ou não é desejável que entrem.

Foi assim desenvolvido um outro método, para fazer face ao primeiro problema referido, designado por Método da Sensibilidade Limite Modificado. Neste método o ganho é ajustado através de um procedimento tentativa e erro até que uma determinada “resposta desejada” seja atingida. A “resposta desejada” mais comum é o “Amortecimento do Quarto de Amplitude”, em que o ganho é ajustado para que a amplitude de cada pico seja um quarto da do pico anterior (figura 2.6).

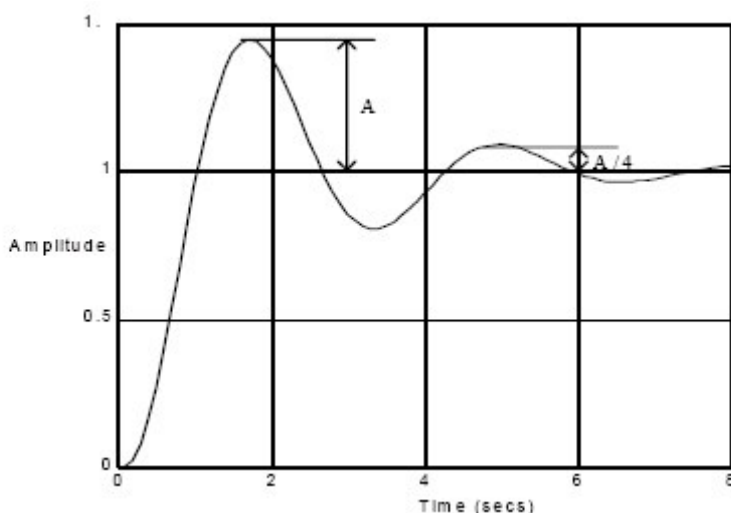


Figura 2.6 – Resposta da planta em malha fechada pelo método da sensibilidade limite modificado

O método modificado apenas necessita da medida do período último, P_u , que é utilizado para o cálculo de T_i e T_d . Uma vez estes parâmetros ajustados, o processo é perturbado com uma pequena alteração na entrada de referência (degrau), sendo a saída observada e o ganho ajustado, sequência que será repetida

até que a resposta verifique o critério do Amortecimento do Quarto de Amplitude. Este método é bastante viável e pode ser aplicado em vários tipos de processos.

Partindo do período, os ajustes dos parâmetros são feitos de acordo com a tabela 2.3.

Controlador	Regras	Fórmulas	
P	Ajustar o ganho até que o critério do quarto de Amplitude seja verificado, quando o sistema é sujeito a uma alteração salto na sua entrada de referência.		
PI	Ajustar o ganho até que o critério do quarto de Amplitude seja verificado, quando o sistema é sujeito a uma alteração salto na sua entrada de referência.	$T_i = P_u$	
PID	Ajustar o ganho até que o critério do quarto de Amplitude seja verificado, quando o sistema é sujeito a uma alteração salto na sua entrada de referência.	$T_i = P_u/1.5$	$T_d = P_u/6$

Tabela 2.3 - Parâmetros do controlador PID pelo método da sensibilidade limite modificado

Na prática, a existência de sobrelevação pode não ser tolerada, uma vez que a alteração da dinâmica do sistema pode conduzir o sistema à instabilidade.

2.3.2. Método da Curva de Reação

O procedimento normal para o ajuste dos parâmetros por este método, consiste na abertura da malha para que não haja realimentação e na obtenção da sua resposta a uma entrada degrau (amplitude M) na entrada de referência (SP). A resposta deverá ter uma forma em S (em situação contrária o método não é aplicável) como ilustrado na figura 2.7, [9].

A curva em S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T , sendo estas determinadas se for passada uma tangente pelo ponto de inflexão da curva. Nos pontos onde a tangente intercepta o eixo das abscissas e a linha horizontal com ordenada K , obtêm L e T , respectivamente, [9].

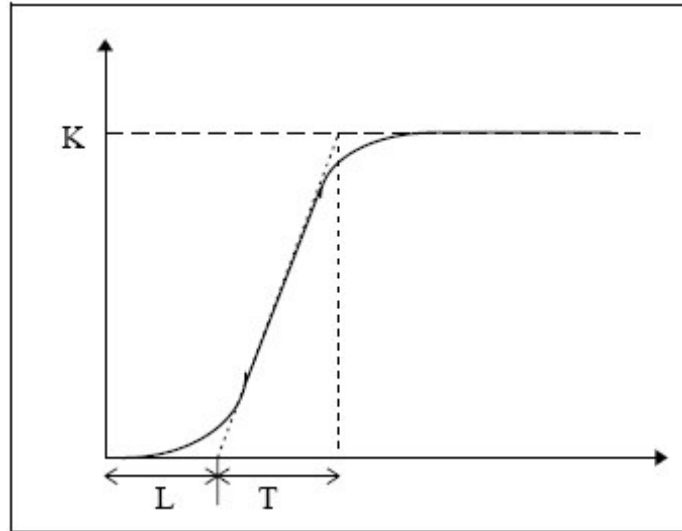


Figura 2.7 – Resposta da planta em malha aberta pelo método da curva de reação

Uma vez obtidos experimentalmente L , T e N (declive máximo = K/T), pode-se recorrer à tabela 2.4 para determinar os valores dos parâmetros dos controladores.

Controlador	Fórmulas		
P	$K_P = M/(NL)$		
PI	$K_P = 0.9M/(NL)$	$T_i = 3.3L$	
PID	$K_P = 1.2 M/(NL)$	$T_i = 2L$	$T_d = L/2$

Tabela 2.4 – Parâmetros do controlador PID pelo método da curva de reação

Como a resposta em S é característica de sistemas de 1ª ordem com atraso, isto é, com função de transferência:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K_c e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (2.5)$$

Cohen e Coon recorreram a esta relação para determinar os valores teóricos dos parâmetros dos controladores. Estes dependem das constantes da função de transferência K_c , L e T , que podem ser medidas na curva de resposta. L é o tempo de atraso, K_c é o ganho estacionário, isto é, $K_c = K/M$, e T , que é a constante de

tempo do sistema, é diretamente proporcional ao valor final da resposta e inversamente proporcional a N , isto é, $T = K_c/N$, [7].

Para verificar se a aproximação a um sistema de primeira ordem com atraso é válida, deve ser determinado o intervalo de tempo que mede entre L e $0.632 \cdot K$, o qual deve ser aproximadamente igual a T , com um erro máximo de 15%. Se a aproximação não se verificar, é porque a tangente no ponto de inflexão não foi desenhada corretamente ou porque existem não-linearidades no sistema. Nesta última situação a aproximação não será válida.

O ajuste dos parâmetros é feito com base na tabela 2.5 em que R , razão de atraso, é definida como, [7]:

$$R = \frac{L}{T} = \frac{NL}{K} \quad (2.6)$$

Controlador	Fórmulas		
P	$K_p = \frac{M}{NL} \left(1 + \frac{R}{3}\right)$		
PI	$K_p = \frac{M}{NL} \left(\frac{10}{9} + \frac{R}{12}\right)$	$T_i = L \left(\frac{30 + 3R}{9 + 20R}\right)$	
PD	$K_p = \frac{M}{NL} \left(\frac{5}{4} + \frac{R}{6}\right)$		$T_d = L \left(\frac{6 - 2R}{22 + 3R}\right)$
PID	$K_p = \frac{M}{NL} \left(\frac{4}{3} + \frac{R}{4}\right)$	$T_i = L \left(\frac{32 + 6R}{13 + 8R}\right)$	$T_d = L \left(\frac{4}{11 + 2R}\right)$

Tabela 2.5 – Parâmetros do controlador PID pelo método da curva de reação para sistemas de primeira ordem com atraso

A principal vantagem deste método (Curva de Reação), relativamente ao anterior deve-se ao fato de, uma vez determinada a curva de reação do sistema, os parâmetros podem ser ajustados imediatamente. Esta vantagem é particularmente útil em processos muito lentos, em que pode passar muito tempo até que o sistema atinja a estabilidade crítica.

A sua principal desvantagem decorre de grande parte dos sistemas serem mais complexos do que simples sistemas de primeira ordem com atraso, o que significa que é ainda necessário um último ajuste no ganho antes de se poder considerar que a resposta do sistema é “aceitável”.

Existem diversas variações aos métodos anteriormente expostos. Note-se como exemplo o fato de grande parte dos fabricantes fornecerem instruções variadas relativas à sintonia dos seus controladores.

É importante realçar que não existem conclusões gerais relativas à exatidão ou aptidão destes métodos empíricos. A única inferência possível é que estes métodos conduzem a primeiras aproximações dos parâmetros dos controladores, que se podem considerar “razoáveis”, e que os valores obtidos podem necessitar de posteriores ajustes para fazer face à especificidade de cada sistema, até que desempenhos satisfatórios sejam atingidos.

Na seção que se segue é apresentado um dos vários métodos existentes para o cálculo dos parâmetros dos controladores PID, assumindo que a função de transferência de malha aberta é conhecida (2º Procedimento).

2.3.3. Método do Lugar das Raízes

A idéia básica que fundamenta o método do lugar das raízes é a de que os valores de s (variável complexa do plano de Laplace) que fazem a função de transferência de malha ser igual a -1 devem satisfazer a equação característica do sistema, [6].

O lugar das raízes da equação característica do sistema a malha fechada, quando o ganho varia de zero a infinito, dá ao método o seu nome. O gráfico correspondente mostra claramente as contribuições de cada pólo ou cada zero de malha aberta nas localizações dos pólos a malha fechada.

No projeto de um sistema de controle linear verifica-se que o método do lugar das raízes se torna muito útil, uma vez que indica a maneira pela qual os pólos e zeros de malha aberta devem ser modificados para que a resposta satisfaça as especificações de desempenho do sistema. Este método é particularmente conveniente para que se obtenham resultados aproximados de modo muito rápido.

Alguns sistemas de controle podem envolver o ajuste de mais de um parâmetro. O diagrama do lugar das raízes para um sistema que tem múltiplos parâmetros pode ser construído variando-se um parâmetro de cada vez. Os lugares das raízes para um tal caso recebem a denominação de contorno das raízes.

O método do lugar das raízes é uma técnica gráfica poderosa para investigar os efeitos do valor de um parâmetro do sistema sobre a localização dos pólos de malha fechada. Na maioria dos casos, o parâmetro considerado é o ganho de malha aberta K , embora possa ser qualquer outro parâmetro variável do sistema. Se o projetista seguir as regras gerais de construção do lugar das raízes, o esboço destes lugares se torna, na realidade, algo muito simples.

Através do método do lugar das raízes, é possível determinar o valor do ganho de malha K que produza o coeficiente de amortecimento prescrito para os pólos dominantes a malha fechada. Se a localização de um pólo ou de um zero for a variável do sistema, o método do lugar das raízes sugere a forma de escolher a localização do pólo ou do zero de malha aberta.

Diagrama de Lugar das Raízes

Condições de ângulo e módulo. Considere-se o sistema mostrado na figura 2.8. A função de transferência à malha fechada é:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.7)$$

Onde

$$G(s) = G_c(s)G_p(s) \quad (2.8)$$

e

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.9)$$

em que, $G_p(s)$ é a função de transferência da planta, $K_i = K_p/T_i$ e $K_d = K_p \cdot T_d$, este método analítico para o cálculo dos parâmetros dos controladores PID tem por objetivo a escolha de K_p , K_i e K_d .

A equação característica para este sistema à malha fechada é obtida igualando-se a zero o denominador da fração do segundo membro da equação 2.7. Isto é,

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (2.10)$$

ou

$$G(s)H(s) = -1 \quad (2.11)$$

Admite-se que $G(s)H(s)$ é uma razão de polinômios em s . Uma vez que $G(s)H(s)$ é uma variável complexa, a equação 2.11 deve ser desmembrada em duas equações a fim de se igualarem os ângulos e os módulos de ambos os membros da equação, respectivamente, para obter:

Condição angular:

$$\angle G(s)H(s) = \pm 180^\circ(2k + 1) \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

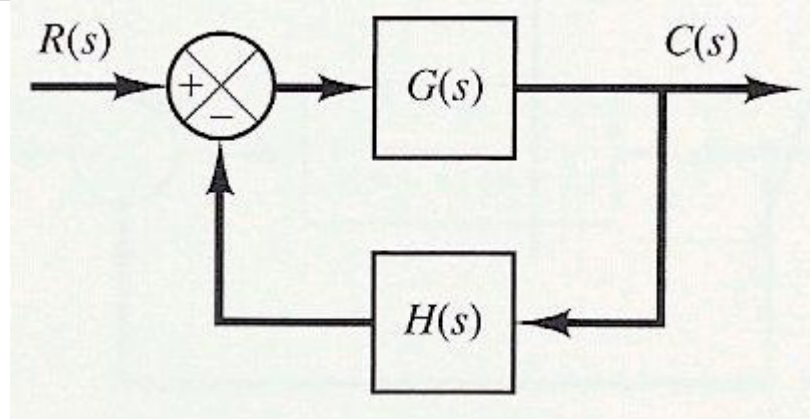


Figura 2.8 – Sistema de controle

Condição de módulo:

$$|G(s)H(s)| = 1 \quad (2.12)$$

Os valores de s que satisfazem simultaneamente as condições de ângulo e de módulo são raízes da equação característica, ou os pólos a malha fechada. O gráfico dos pontos do plano complexo que satisfazem apenas a condição angular é o lugar das raízes. As raízes da equação característica (os pólos a malha fechada) correspondentes a um dado valor do ganho podem ser determinadas a partir da condição de módulo, [6].

Em muitos casos, $G(s)H(s)$ envolve um parâmetro de ganho K e a equação característica pode ser escrita como:

$$1 + \frac{K(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)} = 0 \quad (2.13)$$

Então os lugares das raízes para o sistema são os lugares dos pólos a malha fechada quando o ganho K é variado de zero a infinito.

Note-se que para começar o esboço do lugar das raízes de um sistema pelo método do lugar das raízes, deve-se saber a localização dos pólos e zeros de $G(s)H(s)$. Deve-se lembrar que os ângulos das grandezas complexas que se originam dos pólos a malha aberta e dos zeros de malha aberta para o ponto de teste s são medidos no sentido anti-horário. Por exemplo, se $G(s)H(s)$ for dado por:

$$G(s)H(s) = \frac{K(s + z_1)}{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s + p_4)} \quad (2.14)$$

onde $-p_2$ e $-p_3$ são pólos complexos-conjugados, então o ângulo de $G(s)H(s)$ é

$$\angle G(s)H(s) = \phi_1 - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \quad (2.15)$$

onde ϕ_1 , θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 são medidos no sentido anti-horário conforme mostrado na figura 6.9. O módulo de $G(s)H(s)$ para este sistema é

$$|G(s)H(s)| = \frac{KB_1}{A_1 A_2 A_3 A_4} \quad (2.16)$$

onde A_1, A_2, A_3, A_4 e B_1 são os módulos das grandezas complexas $s + p_1, s + p_2, s + p_3, s + p_4$ e $s + z_1$, respectivamente, conforme mostrado na figura 2.9.

O valor de K correspondente a qualquer ponto s sobre um lugar das raízes pode ser obtido usando a condição de módulo, ou

$$K = \frac{\text{produto das distâncias do ponto } s \text{ aos pólos}}{\text{produto das distâncias do ponto } s \text{ aos zeros}} \quad (2.17)$$

Note-se que, devido ao fato de os pólos e zeros complexos-conjugados a malha aberta, se os houver, estarem sempre localizados simetricamente em torno do eixo real, os lugares das raízes são sempre simétricos em relação a este eixo. Portanto, necessita-se apenas construir a metade superior dos lugares das raízes e desenhar a imagem especular da metade superior na metade inferior do plano s .

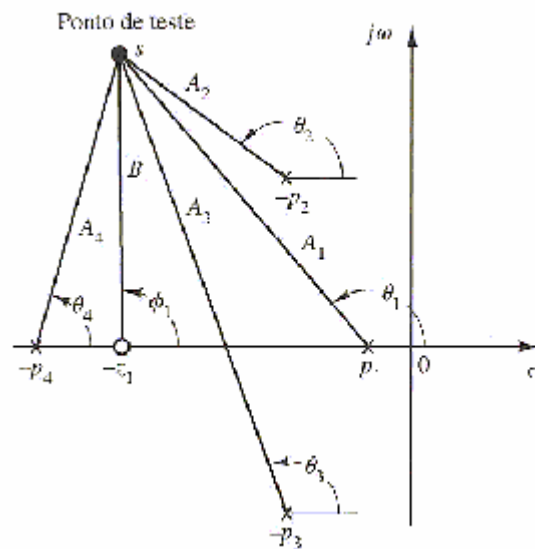


Figura 2.9 – Diagrama mostrando a medida de ângulos, num ponto de testes, a partir de pólos e zeros a malha aberta.

Projeto PI Discreto

Considere o PI contínuo:

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2.18)$$

Utilizando a aproximação *backward* $\left(s = \frac{z-1}{T}\right)$, tem-se:

$$G_c(z) = \frac{K_p(z - \beta)}{z - 1}, \text{ onde } \beta = 1 - \frac{K_i T}{K_p} \quad (2.19)$$

O projeto via root locus obtêm-se os valores K_p e β . Como $K_i = (1-\beta)K_p/T$ então o projeto do controlador PI estará concluído com os valores K_p e K_i obtidos.

2.4. Controladores Lógicos Programáveis (CLPs)

2.4.1. Introdução

Um CLP é um equipamento digital que usa memória programável para armazenar instruções que implementam funções como: lógica, sequenciamento, temporização, contagem e operações aritméticas, para controlar através de módulos de entrada e saída (digital e analógica) diversos tipos de máquinas e processos, [1].

A figura 2.10 apresenta a arquitetura básica de um CLP que são sistemas modulares compostos basicamente de: fonte de alimentação, CPU, memória, módulos de entradas e saídas, linguagens de programação, dispositivos de programação, módulos de comunicação e módulos especiais (opcionais).

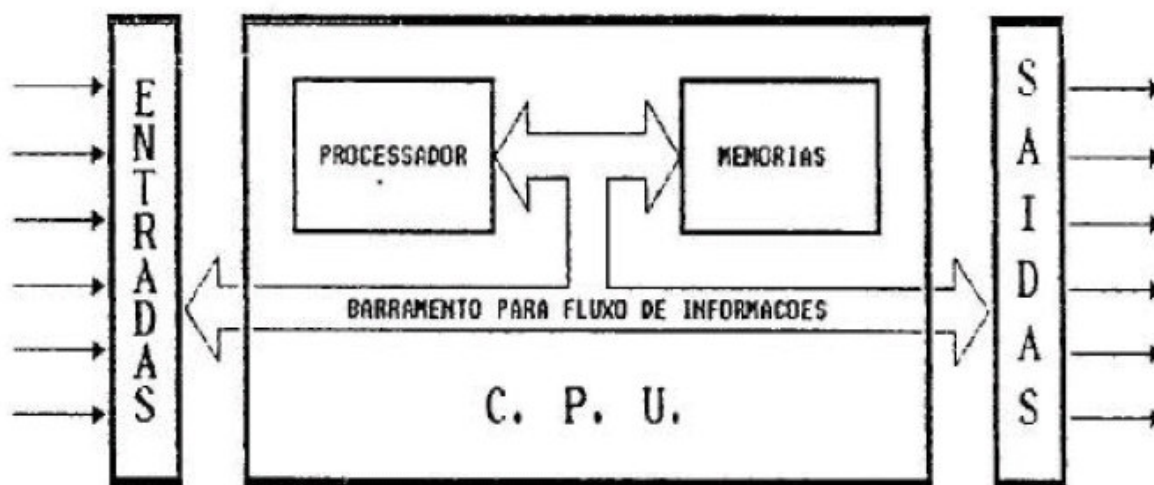


Figura 2.10 – Arquitetura Básica de um CLP

A primeira experiência com o uso de um controle lógico que permitisse a programação por software foi realizada em 1968 na divisão de Hidráulicos da General Motors Corporation. O controlador proposto utilizava dispositivos periféricos, capazes de realizar operações de entrada/saída e um minicomputador, [1].

Esta primeira geração de CLPs recebeu sensíveis melhorias com o advento dos microprocessadores ocorrida na década de 70. Assim, além de dispensarem o uso de computadores de grande porte, tornando-a uma unidade isolada, foram adicionados ainda recursos importantes, tais como: interfaces de operação e programação facilitadas ao usuário, instruções de aritmética e manipulação de dados poderosas e recursos de comunicação em redes de CLPs.

Assim, os técnicos em automação passaram a contar com um dispositivo capaz de:

- a) Permitir fácil diagnóstico de funcionamento ainda em fase de projeto do sistema e/ou reparos que venham a ocorrer em sua operação
- b) Ser instalado em cabines reduzidas devido ao pequeno espaço físico exigido
- c) Operar com reduzido grau de proteção, pelo fato de não serem geradores de faiscamentos
- d) Ser facilmente reprogramado sem a necessidade de interromper o processo produtivo (programação on-line)
- e) Possibilitar a criação de um banco de armazenamento de programas que podem ser reutilizados a qualquer momento
- f) Manter a documentação sempre atualizada com o processo em execução
- g) Apresentar baixo consumo de energia
- h) Manter o funcionamento da planta de produção com uma reduzida equipe de manutenção
- i) Garantir maior confiabilidade pela menor incidência de defeitos
- j) Emitir menores níveis de ruídos eletrostáticos
- k) Ter a flexibilidade da expansão do número de entradas e saídas a serem controladas
- l) Ter a capacidade de se comunicar com diversos outros equipamentos
- m) Torna possível a implementação de estratégias mais sofisticadas de controle

Em suma, o CLP apresenta como vantagens: maior confiabilidade, flexibilidade, velocidade, permitir funções avançadas, permitir comunicações e diagnóstico.

2.4.2. Aplicações de CLPs na Indústria

Atualmente, encontra-se CLPs utilizados na implementação de painéis seqüenciais de intertravamento, controle de malhas, servo-posicionamento, sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*), sistemas de controle estatístico de processo, sistema de controle de estações, sistemas de controle de células de manufatura, etc. Os CLPs são encontrados em processos de: empacotamento, engarrafamento, enlatamento, transporte e manuseio de materiais, usinagem, geração de energia; em sistemas de controle predial de ar condicionado, sistemas de segurança, montagem automatizada, linhas de pintura e sistemas de tratamento

de água, existentes em indústrias de alimentos, bebidas, automotiva, química, têxtil, plásticos, papel e celulose, farmacêutica e siderúrgica/metalúrgica.

De uma maneira geral, os CLPs têm aplicação na automação de processos discretos (controle ON-OFF) e na automação de processos contínuos (controle de malhas).

2.5. PID no CLP

De uma maneira geral, os CLPs têm aplicação na automação de processos discretos (controle ON-OFF) e na automação de processos contínuos (controle de malhas). Alguns CLPs possuem controladores PID e nas sub-seções seguintes serão descritos suas características e o seu funcionamento.

2.5.1. Generalidades

A instrução PID é utilizada em alguns CLPs, como os de Estrutura Modular SLC-5/02; 5/03; 5/04 e 5/05 e o seu formato está ilustrado na figura 2.11, [8].

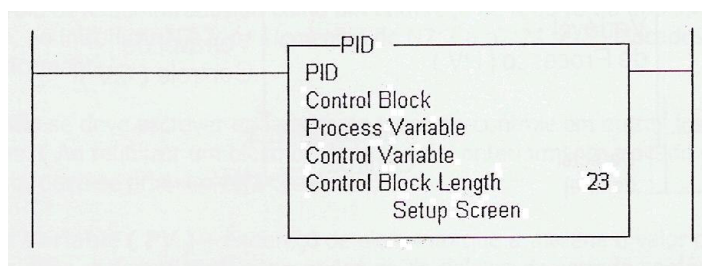


Figura 2.11 Formato da Instrução PID

Esta instrução de saída controla propriedades físicas, tais como temperatura, pressão, nível ou fluxo.

A instrução PID (Proporcional, Integral e Derivativa), normalmente controla uma malha fechada utilizando as entradas de um módulo de entrada analógica e fornecendo uma saída para um módulo de saída analógica. Para controle de temperatura, pode-se converter a saída analógica em uma saída ON/OFF proporcional ao tempo para acionar um aquecedor ou resfriador.

A instrução PID pode ser operada no modo temporizado (Timed Mode) ou no modo STI. No modo temporizado, a instrução atualiza a sua saída periodicamente em um intervalo de tempo selecionado pelo usuário. No modo STI, a instrução deverá ser colocada dentro de uma sub-rotina de interrupção STI. A saída será, então, atualizada sempre que a sub-rotina STI for ativada dentro do ciclo de varredura do CLP. O tempo de atualização deve ser igual à velocidade em que a

linha PID é executada. Uma diferença entre a velocidade de execução da instrução PID e o tempo entre as amostras degradará a precisão dos cálculos PID.

2.5.2. Conceito de PID

O controle PID em malha fechada mantém a variável de processo em um valor de referência (*setpoint*) desejado. A figura 2.12 apresenta um exemplo de velocidade de fluxo/nível de fluido.

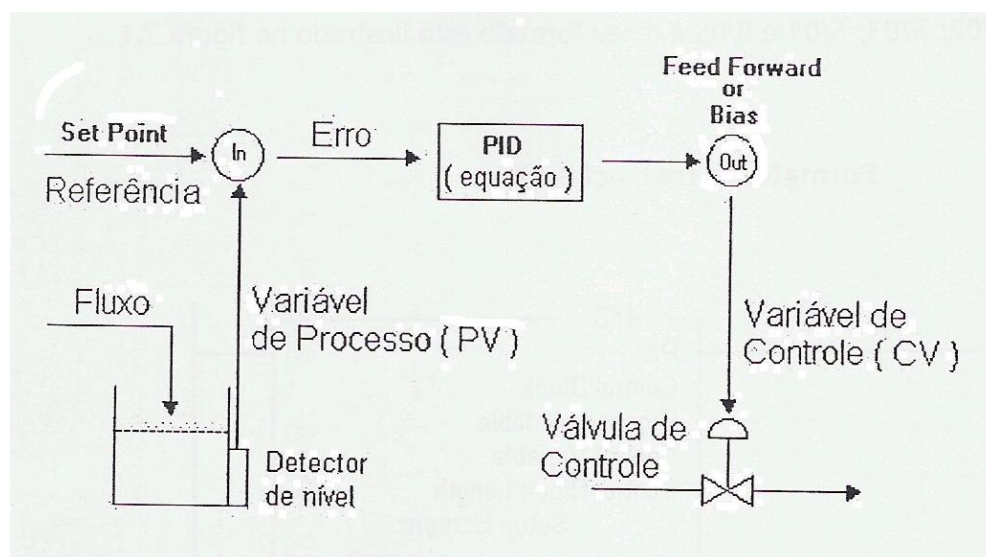


Figura 2.12 Exemplo de Controle PID

A equação PID controla o processo, enviando um sinal de saída à válvula de controle. Quanto maior for o erro entre a referência e a variável de processo, maior é o sinal de saída e vice-versa. Se necessário, pode-se somar um valor à saída de controle, representando um desvio (*feedforward ou bias*). Assim, o cálculo PID direciona a variável de processo para que alcance um valor em torno do valor de referência (valor desejado).

2.5.3. Equação PID

A instrução PID utiliza a seguinte equação:

$$\text{Saída} = K_c [E(t) + (1/T_i) \cdot \int E(t) \cdot dt + T_d \cdot dE(t)/dt]$$

As constantes de ganho padrão estão apresentadas na tabela abaixo.

Termo	Faixa (Baixa para Alta)	Referência
Ganho do controlador (K_c)	0,1 a 25,5 (sem unidade)	Proporcional
Rearme (T_i)	25,5 a 0,1 (minutos por repetição)	Integral
Taxa (T_d)	0,01 a 2,55 (minutos)	Derivativo

Tabela 2.6 Constantes de Ganho Padrão (ISA)

O termo derivativo (velocidade) suaviza a resposta através da utilização de um filtro Passa Baixa. A frequência de corte do filtro é 16 vezes maior que a frequência de canto (*corner frequency*) do termo derivativo.

2.5.4. Parâmetros da Instrução PID

A instrução PID é normalmente posicionada em uma linha sempre verdadeira. Quando a linha é falsa, a saída permanece no seu último valor, [8].

Durante a programação, deve-se introduzir os endereços do Bloco de Controle e Variável de Processo depois de colocar a instrução PID em uma linha:

Control Block - arquivo que armazena os dados necessários para operar a instrução. O comprimento do arquivo do Bloco de Controle é fixo em 23 palavras. O endereço do Bloco de Controle deve ser introduzido como um endereço de arquivo do tipo inteiro N[]. Por exemplo, ao introduzir N7:2, os elementos de N7:2 a N7:24 serão alocados automaticamente.

Não se deve escrever endereços do bloco de controle em outras instruções do programa. (Ao reutilizar um bloco de dado que foi anteriormente alocado para algum outro uso, deve-se primeiro zerar os dados).

Process Variable (PV) - endereço de elemento que armazena o valor da entrada do processo. Este endereço pode ser o endereço da palavra da entrada analógica onde o valor da entrada A/D está armazenado. Este valor pode ser também um valor inteiro quando se deseja trabalhar com o valor de entrada em escala na faixa de 0 a 16383.

Control Variable (CV) - endereço de elemento que armazena a saída da instrução PID. A faixa do valor de saída é de 0 a 16383, sendo que 16383 é 100% do valor. Este é normalmente um valor inteiro, de forma que pode-se colocar em escala a faixa de saída PID para a faixa analógica específica, necessária na aplicação.

A figura 2.13 ilustra a instrução PID com endereços típicos para os seus parâmetros:

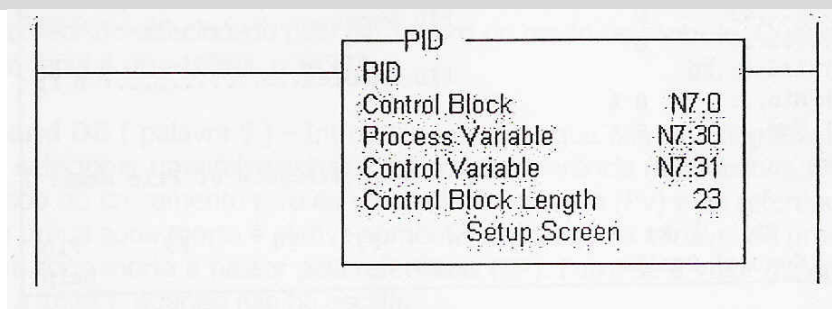


Figura 2.13 Endereços Típicos da Instrução PID

Após a introdução dos endereços do Bloco de Controle, Variável do Processo e Variável de Controle, o software RSLogix 500, exibe a seguinte janela de setup (figura 2.14).

Figura 2.14 Tela de Introdução dos Dados na instrução PID

Parâmetros da instrução PID que devem ser introduzidos:

.Controller Gain Kc (palavra 3) - Este é o ganho proporcional (0,1 a 25,5). Normalmente este ganho deve ser ajustado na metade do valor necessário para fazer com que a saída oscile quando os termos dos parâmetros Reset e Rate estão ajustados em zero. Faixa introduzida: 1-255.

.Reset Ti (palavra 4) - Este é o ganho integral (0,1 a 25,5 minutos por repetição). Normalmente, o tempo de rearme é ajustado igual ao período natural medido na calibração do ganho. Faixa introduzida de 255-1.

Obs: O valor 255 será adicionado ao termo integral mínimo possível na equação PID.

.Rate Td (palavra 5) - Este é o termo derivativo. A faixa de ajuste é 0,01 a 2,55 minutos. Normalmente, este valor é ajustado para 1/8 do tempo do ganho integral. Faixa introduzida: 1-255.

.Loop Update (palavra 13) - Este é o intervalo de tempo entre os cálculos PID. A entrada é realizada em intervalo de 0,01 segundos. Normalmente, deve-se introduzir um tempo de atualização de malha cinco ou dez vezes mais rápido do que o período natural da carga (determinado pelo ajuste dos parâmetros de Reset e Rate em zero e, a seguir, aumentando o ganho até que a saída comece a oscilar). Quando no modo STI, este valor deve ser igual ao valor do intervalo de tempo 5:11. Faixa introduzida de 1-255.

.Control Mode (palavra O, bit 2) - permite selecionar a ação de controle ($E = SP - PV$) ou ($E = PV - SP$). A ação direta ($E = PV - SP$) fará com que a saída CV aumente quando a entrada PV for maior do que a referência SP (por exemplo, uma aplicação de resfriamento). A ação reversa ($E = SP - PV$) fará com que a saída CV aumente quando a entrada PV for menor que a referência SP (por exemplo, uma aplicação de aquecimento).

.PID Control (palavra 0, bit 1) - permite selecionar entre os modos automático ou manual. AUTO indica que a instrução PID está controlando a saída e MANUAL indica que o usuário, através de uma estação de Controle manual ou de programa de aplicação, está controlando o valor da saída. Quando do ajuste, recomenda-se que as alterações sejam feitas no modo MANUAL, passando, a seguir ao modo AUTO. O limite de Saída é aplicado no modo MANUAL.

.Time Mode (palavra O, bit O) - permite selecionar entre os modos TIMED ou STI. O modo TIMED indica que a instrução PID atualiza a sua saída no intervalo de tempo especificado no parâmetro de atualização da malha. O modo STI indica que a instrução PID atualiza a sua saída todas as vezes que ela é varrida. Ao selecionar o modo STI, a instrução PID deverá ser programada em uma subrotina de interrupção STI e essa sub-rotina deverá Ter um intervalo de tempo igual ao ajuste do parâmetro de atualização de malha (loop update) da instrução PID. Ajuste o período STI na

palavra S:11. Por exemplo, se o tempo de atualização da malha contém o valor 10 (100 ms), então o intervalo de tempo STI também deverá ser igual a 100 ms.

.Limit Output CV (palavra 0, bit 3) - permite selecionar entre YES ou NO.

Ao selecionar YES, a saída é limitada pelos valores mínimo e máximo (tabela 2.7).

.Deadband DB (palavra 9) - Introduzir um valor que não seja negativo. A zona morta permite selecionar uma faixa acima e abaixo da referência (SP). A zona morta é introduzida no cruzamento zero da variável de processo (PV) e de referência (SP). Isto significa que a zona morta é efetiva somente depois que a variável de processo (PV) entrar na zona morta e passar pela referência (SP). Faixa de 0 ao valor máximo em escala: ou de 0 a 16383, quando não há escala.

.Setpoint SP (palavra 2) - Este é o ponto de controle desejado da variável de processo. Deve-se introduzir o valor desejado e pressionar a tecla (ENTER). Pode-se alterar este valor através de instruções do programa de aplicação ou através de um supervisor. Deve-se escrever o valor na terceira palavra do bloco de controle (por exemplo, escrever o valor em N7:4 se o bloco de controle for N7:2).

Sem escala, a faixa desse valor é de 0 a 16383. Caso contrário, a faixa é de escala mínima (palavra 8) à escala máxima (palavra 7).

.Setpoint MAX (Smax) (palavra 7) - Se o valor de referência é usado em unidades de engenharia, então este parâmetro corresponde ao valor da referência em unidades de engenharia quando a entrada de controle é 16383. Faixa de 0-16383.

. Setpoint MIN (Smin) (palavra 8) - Se o valor de referência é usado em unidades de engenharia, então este valor corresponde ao valor de referência em unidades de engenharia quando a entrada de controle é zero. Faixa 0-16383 (ver nota abaixo).

Nota: A escala Smin - Smax permite introduzir a referência em unidades de engenharia. A zona morta e o erro também serão exibidos em unidades de engenharia. A variável de Processo PV ainda será esperada dentro da faixa de 0-16383, ou seja, Smin-Smax permite um cálculo, PID com resolução máxima.

.Process Variable PV (palavra 14) - somente para exibição e monitoração. Este é o valor da variável de processo em escala (entrada analógica). Sem escala, a faixa deste valor é de 0 a 16383. Caso contrário, a faixa está entre a escala mínima (palavra 8) e a escala máxima (palavra 7).

.Control Output CV (palavra 16) - Este é o valor de saída calculado pelo algoritmo PID. Ao selecionar o modo AUTO, este parâmetro será só para exibição. Porém, ao

selecionar o modo MANUAL, deve-se introduzir a porcentagem de saída desejada. Faixa de 0 a 100%.

Obs.: Escrever neste valor com uma instrução do usuário não tem efeito.

.Scaled Error SE (palavra 15) - Somente para exibição e monitoração. Este é o erro em escala, conforme selecionado pelo parâmetro de modo de controle. Quando não existe escala, a faixa é de -16383 a 16383.

Saída CV	YES (1) Limite de Saída CV Selecionado	NO (0) Limite de Saída CV Não selecionado
Mínimo	<p>O valor introduzido será a porcentagem de saída mínima que a variável de controle (CV) irá obter.</p> <p>Se CV cair abaixo deste valor mínimo, ocorrerá o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CV será ajustado de acordo com o valor introduzido, e - o bit de limite inferior do alarme de saída será energizado. 	<p>O valor introduzido irá determinar quando o alarme de saída, bit de limite inferior, é energizado.</p> <p>Se CV cair abaixo deste valor mínimo, ocorrerá o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> - o bit de limite inferior do alarme de saída será energizado.
Máximo	<p>O valor introduzido será a porcentagem de saída máxima que a variável de controle (CV) irá obter.</p> <p>Se o CV exceder este valor máximo, ocorrerá o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CV será ajustado de acordo com o valor introduzido, e - o bit de limite superior do alarme de saída será energizado. 	<p>O valor introduzido irá determinar quando o alarme de saída, bit de limite superior, é energizado.</p> <p>Se CV cair abaixo deste valor máximo, ocorrerá o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> - o bit de limite superior do alarme de saída será energizado.

Tabela 2.7 Seleção de Limite de Saída CV

2.5.5. Flags da Instrução PID

.time mode bit TM (palavra 0, bit 0) - Este bit especifica o modo de operação da instrução PID. É energizado quando o modo TIMED está sendo utilizado. Quando desenergizado, indica que o modo STI está sendo utilizado. Este bit pode ser energizado ou desenergizado através de instruções do programa de aplicação, ou através de um sistema supervisorio.

.auto / manual bit AM (palavra 0, bit 1) - Este bit especifica a operação automática quando está desenergizado e a operação manual quando energizado. Pode ser energizado ou desenergizado através de instruções do programa de aplicação ou através de um sistema supervisorio.

.control mode bit CM (palavra 0, bit 2) - Este bit é desenergizado se o controle for reverso ($E = SP - PV$) e é energizado se o controle for direto ($E = PV - SP$). Este bit pode ser energizado ou desenergizado através de instruções do programa de aplicação ou através de um sistema supervisorio.

.output limiting enabled bit OL (palavra 0, bit 3) - Este bit é energizado quando for selecionada a característica para limitar a variável de controle CV. Este bit pode ser energizado ou desenergizado através de instruções do programa de aplicação ou através de um sistema supervisorio.

.scale setpoint flag SC (palavra 0, bit 5) - Este bit é desenergizado quando for especificado o valor da escala de referência. '

.loop update time too fast TF (palavra 0, bit 6) - Este bit é energizado pelo algoritmo PID se o tempo de atualização da malha especificado não puder ser alcançado pelo programa fornecido (devido a limitações do tempo de varredura). Se este bit for energizado, deve-se tentar corrigir o problema através da atualização da malha PID em uma velocidade mais lenta ou programando a instrução PID em uma rotina de interrupção STI. Os ganhos de Reset e Rate estarão errados se a instrução operar com este bit energizado.

.DB, set when error is in DB (palavra 0, bit 8) - Este bit é energizado quando a variável de Processo está dentro da faixa de zona morta (deadband).

. output alélrn, upper limit UL (palavra 0, bit 9) - Este bit é energizado quando a saída de controle 01 calculada exceder o limite superior de CV.

. output alarm, lower limit LL (palavra 0, bit 10) - Este bit é energizado quando a saída de controle 01 calculada for menor que o limite inferior de CV.

- . **setpoint out of range SP** (palavra 0, bit 11) - Este bit é energizado quando a referência (SP) exceder o valor máximo da escala ou for inferior ao valor mínimo da escala.
- . **process var out of range PV** (palavra 0, bit 12) - Este bit é energizado quando a variável de processo sem escala exceder 16383 ou for inferior a zero.
- . **PID done DN** (palavra 0, bit 13) - Este bit é energizado durante as varreduras onde o algoritmo PID é computado. (É computado na velocidade de atualização da malha).
- . **PID enabled EN** (palavra 0, bit 15) - Este bit é energizado enquanto a linha da instrução PID estiver habilitada.

Capítulo 3 - Identificação de Sistemas

3.1. Introdução

As técnicas de identificação de sistemas são técnicas para obtenção do modelo matemático de um sistema baseado em ensaios de entrada e saída. Essas técnicas são muito úteis quando a tarefa de modelar o sistema, devido a sua complexidade, é inviável. Algumas técnicas de identificação, por permitirem um ajuste dos parâmetros da planta, são amplamente utilizadas em controladores adaptativos, [10].

A determinação do modelo matemático de um sistema, representando os seus aspectos essenciais de forma adequada, tem diversas utilizações, entre elas estão: diagnóstico, supervisão, otimização e controle.

O modelo de um sistema é uma equação matemática utilizada para responder a questões sobre o sistema sem a realização de experimentações (através de um modelo pode-se calcular ou decidir como o sistema comporta-se sob determinadas condições operacionais). A utilização do modelo para simulação do sistema constitui-se um procedimento de baixo custo e seguro para experimentar o sistema. Entretanto, a validade (adequação) dos resultados de simulação depende completamente da qualidade do modelo matemático do sistema.

3.2. Conceito e Etapas da Identificação de Sistemas

Modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais. Um dos tipos de modelagem mais conhecidos é a modelagem tipo caixa branca, ou seja, o tipo onde se faz necessário um profundo conhecimento do sistema que se deseja modelar. Nos casos em que não há um conhecimento tão profundo do sistema em questão é mais indicado utilizar-se das técnicas de identificação, [10].

Identificação de sistemas é tratada, muitas vezes, como um problema de otimização que envolve algumas medidas para adequação de modelos candidatos a representar um sistema real. A seleção de modelos matemáticos e o ajuste dos parâmetros são influenciados por diversos fatores, entre os quais: conhecimento a priori do sistema (linearidade, grau de não-linearidade, atraso de transporte); propriedades do modelo do sistema identificado (complexidade); seleção da medida do erro a ser minimizado; presença de ruídos.

Podemos dividir a identificação em quatro etapas, a saber: planejamento experimental; seleção da estrutura do modelo; estimação dos parâmetros e validação.

O planejamento experimental consiste em escolher adequadamente o sinal excitante da planta. O sinal deve excitar todos os modos do sistema. Na etapa de escolha da estrutura do modelo devemos escolher o modelo que melhor se adeque à dinâmica da planta.

Estimar os parâmetros é uma das etapas mais importante da fase de identificação. É nesse ponto onde devemos escolher um método eficiente, para que se tenha fidelidade na representação do sistema. Os métodos de estimação estabelecem um critério baseado no erro de estimação e tentam minimizar esse erro. A validação do modelo identificado consiste em verificar se o modelo encontrado descreve fielmente a dinâmica do sistema. A figura 3.1 mostra um esquema simples de identificação.

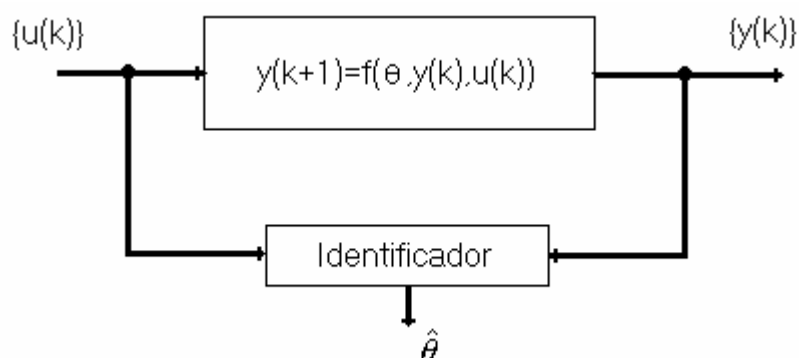


Figura 3.2 - Esquema de um sistema de identificação

Os métodos de identificação ainda podem ser divididos em métodos *on-line* e métodos *off-line*. Os métodos *on-line* são aqueles que são aplicados com a planta em operação e os métodos *off-line* são aplicados com a planta fora de operação.

Na identificação *off-line* com o auxílio de sinais de teste apropriados de entrada (ruído branco, seqüência binária pseudo-aleatória), excita-se o processo e armazenam-se as medidas de entrada e saída para aplicação e avaliação posterior dos algoritmos de estimação não-recursivos. Para isso é necessário que a estrutura do modelo seja disponível, ou seja, é preciso selecionar a ordem do modelo, o número de pólos e zeros e, eventualmente, o valor do atraso de transporte ou tempo morto. Todo o cálculo dos parâmetros é feito em um momento e o tempo de avaliação é diferente daquele em que se realiza o ensaio. Por isso se diz que a

estimação é feita *off-line*. Para este tipo de abordagem, utilizam-se na prática modelos discretos para os processos. Isso se justifica pelo fato de que os algoritmos de identificação trabalham com os valores de amostras dos sinais de entrada e saída.

A identificação *on-line* é um procedimento iterativo via computador. A identificação *off-line* tem uma desvantagem de implementação. Muita quantidade de memória pode ser necessária para armazenar os valores digitalizados de todas as amostras de entrada e saída do sistema obtidas de ensaio. Nesse sentido, muitas vezes precisa-se de métodos recursivos que utilizem pouca memória e que sejam capazes de atualizar a estimação dos parâmetros do modelo a cada período de amostragem. Diversos algoritmos estão disponíveis na literatura para realizar a estimação *on-line*. O mais conhecido é o algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivo – MQR. Em muitas aplicações, as medidas do processo são obtidas seqüencialmente (capturadas a cada período de amostragem) e processadas *on-line* em algoritmos de estimação recursivos. A aplicação em tempo real dos algoritmos de identificação é interessante para vários propósitos, entre os quais estão: rastreamento de parâmetros variantes no tempo, detecção, diagnóstico, filtragem e controle adaptativo/preditivo.

3.3. Método dos Mínimos Quadrados (Least Squares)

O método dos mínimos quadrados é um dos métodos mais empregados na estimação de parâmetros de sistemas. Isso acontece pela eficiência e simplicidade do método. A técnica consiste em realizar N medições na planta como é mostrado em (3.1), [10].

$$\begin{aligned} &\{u(0), u(1), \dots, u(N)\} \\ &\{y(0), y(1), \dots, y(N)\} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Definindo as matrizes:

$$y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}; \quad \theta = [a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_n \quad \vdots \quad b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_m]^T; \quad (3.2)$$

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} -y(0) & \cdots & -y(1-n) & \vdots & u(0) & \cdots & u(1-m) \\ -y(1) & \cdots & -y(2-n) & \vdots & u(1) & \cdots & u(2-m) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -y(N-1) & \cdots & -y(N-n) & \vdots & u(N-1) & \cdots & u(N-m) \end{bmatrix}$$

Podemos afirmar que:

$$y = x\theta + e \quad (3.3)$$

O problema da identificação consiste em achar um $\hat{\theta}$ de modo que, com $\hat{y} = x\hat{\theta}$ possamos minimizar a função abaixo:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (e_k)^2 \quad (3.4)$$

em que $e_k = y_k - \hat{y}_k$.

Reescrevendo (3.4) na forma matricial em função de θ teremos:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^T e = \frac{1}{2} (y - x\theta)^T (y - x\theta) \quad (3.5)$$

A solução analítica que minimiza $J(\theta)$ é obtida calculando o gradiente de J em relação a θ e igualando a zero.

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = 0 \quad (3.6)$$

Como:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} [y^T y - y^T x\theta - \theta^T x^T y + \theta^T x^T x\theta] \right) = 0 \quad (3.7)$$

e sabendo-se que:

$$\theta^T x^T y = y^T x \theta \quad (3.8)$$

pelo fato de $y^T x \theta$ ser um escalar.

Desse modo:

$$\frac{1}{2}(-2x^T y + 2x^T x \theta) = 0 \quad (3.9)$$

o que resulta em:

$$\theta = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (3.10)$$

A desvantagem deste método é que o tamanho da matriz x cresce com o número de observações.

3.4. Mínimos Quadrados Recursivo (*Recursive Least Squares*)

O método dos mínimos quadrados recursivo é ideal para aplicações on-line. Sua formulação é similar ao método não recursivo mostrado na seção anterior. A seguir apresentaremos o exemplo de um sistema de primeira ordem com parâmetros a e b e com N amostras o qual é mostrado em (3.11), [10].

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \\ \dots \\ y(N+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(0) & u(0) \\ -y(1) & u(1) \\ \vdots & \vdots \\ -y(N-1) & u(N-1) \\ \dots & \dots \\ -y(N) & u(N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(N) \\ \dots \\ e(N+1) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Desse modo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} Y(N) \\ \dots \\ y(N+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(N) \\ \dots \\ x^T(N+1) \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} E(N) \\ \dots \\ e(N+1) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Da equação dos mínimos quadrados não-recursivos mostrada em (3.10) para $N+1$ amostras, sendo para simplificação de notação $y(N) = y_N$.

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{N+1} &= (X_{N+1}^T X_{N+1})^{-1} X_{N+1}^T \begin{bmatrix} Y_N \\ \vdots \\ y_{N+1} \end{bmatrix} \\ \hat{\theta}_{N+1} &= \left(\begin{bmatrix} X_N^T & \vdots & x_{N+1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_N \\ \vdots \\ x_{N+1}^T \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} X_N^T & \vdots & x_{N+1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_N \\ \vdots \\ y_{N+1} \end{bmatrix} \\ \hat{\theta}_{N+1} &= (X_N^T X_N + x_{N+1} x_{N+1}^T)^{-1} [X_N^T Y_N + x_{N+1} y_{N+1}] \end{aligned} \quad (3.13)$$

Fazendo $P_{N+1} = (X_N^T X_N + x_{N+1} x_{N+1}^T)^{-1}$ e usando o lema de inversão de matrizes tem-se:

$$\begin{aligned}P_{N+1} &= (X_N^T X_N)^{-1} - [1 + x_{N+1}^T P_N x_{N+1}]^{-1} (X_N^T X_N)^{-1} x_{N+1} x_{N+1}^T (X_N^T X_N)^{-1} \\ P_{N+1} &= [I - (1 + x_{N+1}^T P_N x_{N+1})^{-1} P_N x_{N+1} x_{N+1}^T] P_N \end{aligned} \quad (3.14)$$

Substituindo P_{N+1} encontrado em (3.14) na equação (3.13) obtém-se as expressões recursivas mostradas a seguir, que correspondem ao algoritmo dos mínimos quadrados recursivo.

ALGORITMO MQR

Inicializar $P(0), \theta(0)$

Em que:

$P(0)$ é a matriz de covariância em $N = 0$. Deve ser inicializada com alta covariância;

Calcular a Matriz de Ganho

$$K_N = (1 + x_{N+1}^T P_N x_{N+1})^{-1} P_N x_{N+1}$$

Calcular o vetor de parâmetros atual

$$\hat{\theta}_{N+1} = \hat{\theta}_N + K_N (y_{N+1} - x_{N+1}^T \hat{\theta}_N)$$

Calcular a nova matriz de covariância

$$P_{N+1} = [I - (1 + x_{N+1}^T P_N x_{N+1})^{-1} P_N x_{N+1} x_{N+1}^T] P_N$$

Em que:

$x_{N+1}^T = [-y(N) \quad \cdots \quad -y(N-n+1) \quad \vdots \quad u(N) \quad \cdots \quad u(N-m+1)]$
é o vetor regressor.

É importante lembrar que o sinal aplicado à planta para a leitura deve ser persistentemente excitante. Geralmente usa-se um sinal tipo PRBS (*Pseudo Random Binary Signal*). Tal sinal pode ser gerado a partir de um sinal com distribuição uniforme entre -1 e $+1$. Caso o valor aleatório seja maior que zero usa-se o sinal $+1$, caso contrário usa-se -1 , de modo que a probabilidade de ocorrer qualquer um dos níveis de sinal seja igual. Outra alternativa é a aplicação de um sinal ruidoso com distribuição gaussiana de média zero e variância σ^2 .

Capítulo 4 - Proposta

4.1. Introdução

O conceito de sistema (processo ou planta) pode ser definido de diferentes formas. Em controle de processos, denota-se como um objeto ou uma coleção de objetos que realiza um certo objetivo e cujas propriedades pretende-se estudar. Alguns exemplos são: sistema de fabricação de automóveis, sistema solar, circuito elétrico, sistemas de níveis de tanques, coluna de destilação, entre outros, [2].

O objetivo deste trabalho é apresentar o método de projeto e implementação de controladores PID, baseado em instrumentação industrial, para sistemas de primeira e segunda ordem. O software desenvolvido apresenta apenas o projeto e implementação de controladores PI, pois as plantas utilizadas nos experimentos apresentaram bom desempenho somente com o Proporcional Integral. Mas com as técnicas de identificação de sistemas e métodos de sintonia de controladores PID apresentados nos capítulos anteriores, é possível fazer a re-sintonia de controladores PID em sistemas de primeira e segunda ordem, utilizando esta mesma estrutura que será descrita nas próximas seções.

No capítulo anterior apresentou-se uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de uma das etapas deste trabalho, o algoritmo dos mínimos quadrados recursivos. Com este algoritmo é possível fazer a identificação on-line do sistema. Com esta aplicação em tempo real do algoritmo de identificação é possível projetarmos os parâmetros do controlador PID.

A identificação, de modo geral, consiste em três etapas: determinação da estrutura, estimação dos parâmetros e validação do modelo.

A realização do experimento proporciona a aquisição das medidas do processo (dados experimentais). Assim, com o conjunto de entradas e saídas no sistema tem-se a *determinação da estrutura*. No passo seguinte é feita a *estimação dos parâmetros do modelo* utilizando técnicas de estimação. E por último é feita a *validação do modelo* matemático que é efetuada pela comparação do modelo obtido com as medidas, em um conjunto de dados que não foi utilizado na estimação do modelo matemático (generalização do modelo).

A fase da *estimação dos parâmetros* é realizada a partir de um conjunto de modelos candidatos, baseado em algum conhecimento a priori sobre o sistema a ser identificado e nas informações necessárias para a seleção do conjunto de

regressores para a aplicação da técnica de identificação adotada, seja do tipo paramétrica ou não-paramétrica, linear ou não-linear.

4.2. O Projeto

Aqui será apresentado o método de implementação de controladores PID, baseado em instrumentação industrial, para plantas de primeira e segunda ordem.

O software que será apresentado é aplicado em plantas de primeira e segunda ordem controladas por controladores PI implementados num CLP. O software é aplicado para fazer a auto-sintonia dos parâmetros do controlador PI de plantas que necessitem desta sintonia.

Este método possui as seguintes etapas:

- 1) Sintonizar um PI (no CLP) que funciona controlando a planta;
- 2) Levar para um ponto de operação e esperar estabilizar;
- 3) Executar o software;
- 4) Preencher em uma tela os parâmetros: período de amostragem, tempo de identificação, valores mínimo e máximo da variável do processo (PV) e variável manipulada (MV) e porcentagem de variação da MV para geração do PRBS;
- 5) Aplicar o PRBS na planta e coletar os dados;
- 6) Identificar a planta (modelo discreto) utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo;
- 7) Validar a identificação;
- 8) Projetar o controlador discreto (solicitar o desempenho desejado);
- 9) Converter o controlador para contínuo;
- 10) Enviar os novos parâmetros do PI para o CLP (*bumpless*);
- 11) Validar o controlador (verificando a saturação de u);
- 12) Comparar o PI atual com o anterior na planta;
- 13) Finalizar o software ou voltar para o passo 2.

Antes de iniciar todo o processo é necessário conectar o computador, que contenha o software, ao CLP da planta. Depois de conectado são então feitas as configurações necessárias do CLP e do software. Após isso é então iniciada a primeira das etapas acima descritas.

Inicialmente é aplicado um conjunto de parâmetros no PI que faça o controle da planta, ou pode-se também utilizar os parâmetros que já estão em funcionamento

na planta. O passo seguinte é levar o sistema para um ponto de operação e esperar a sua estabilização. Inicializa-se então o software e uma tela será aberta, nesta tela serão solicitadas alguns dados da planta.

O dados da planta solicitados são:

- Período de amostragem do sistema;
- Tempo necessário para fazer a identificação do sistema;
- Valor mínimo da PV;
- Valor máximo da PV;
- Valor mínimo da MV;
- Valor máximo da MV;
- Valor da porcentagem de variação da MV para a geração do PRBS.

Os dados da tela são enviados e o software inicializa a etapa de identificação do sistema aplicando o PRBS (gerado) na planta e ao mesmo tempo coletando sua resposta gerada em reação a entrada PRBS. A identificação da planta é feita utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo obtendo-se assim o modelo discreto da planta. Este modelo entrará então num processo de validação, caso o mesmo não seja validado o software volta para o passo 2 do processo e caso contrário segue para o passo 8.

No passo 8 é inicializado a etapa de projeto do controlador, sendo necessário o envio dos dados para o desempenho desejado do controlador. Os dados solicitados são: a porcentagem de *overshoot* e tempo de estabilização. O controlador discreto é projetado, faz-se sua devida validação, converte-se o controlador discreto em contínuo e seus parâmetros são enviados pra o PI do CLP. Em seguida é feita uma outra validação do novo PI comparando-se o desempenho do PI anterior com o atual. Caso o PI atual não seja validado volta-se para o passo 8, caso contrário o processo é finalizado com sucesso e tem como uma opção a reinicialização de todo o procedimento.

Para uma prévia identificação existem diversas técnicas que podem ser utilizadas, dentre elas estão: método pelo teste da resposta ao degrau, método pelo teste da resposta em frequência, identificação *off-line* (vista no capítulo anterior). E para o projeto do controlador PI inicial pode-se utilizar várias técnicas, dentre as quais tem-se: método da sensibilidade limite e método da curva de reação.

O passo 6 consiste na Identificação *on-line* do sistema. A técnica de identificação utilizada é a dos mínimos quadrados recursivos. Depois é feita a

implementação do controlador PI. Para esta implementação podem ser utilizadas muitas técnicas, entre elas estão: método Root-Locus, Método Preditivo e Método Fuzzy. Neste trabalho foi utilizado o método Root-Locus para o projeto do controlador.

A ultima etapa conclui a auto-sintonia do controlador PI. O sistema estará habilitado para que de tempo em tempo (pré-determinado) o processo seja reinicializado a partir do passo 2. Assim tem-se um processo automático de auto-sintonia de controlador PI industrial (PI implementado em um CLP) aplicados em sistemas de primeira e segunda ordem. O algoritmo para a realização de todo esse processo está implementado em Matlab.

As figuras 4.1 e 4.2 apresentam o diagrama de blocos e o fluxograma do projeto, respectivamente, para que se tenha uma melhor visualização de todo o processo.

Neste projeto é importante que se tenha um prévio conhecimento do sistema, para que sejam informados dados essenciais para a obtenção de um modelo matemático (*estimação do modelo*) e projeto do controlador PI que resultem em um bom projeto para o sistema.

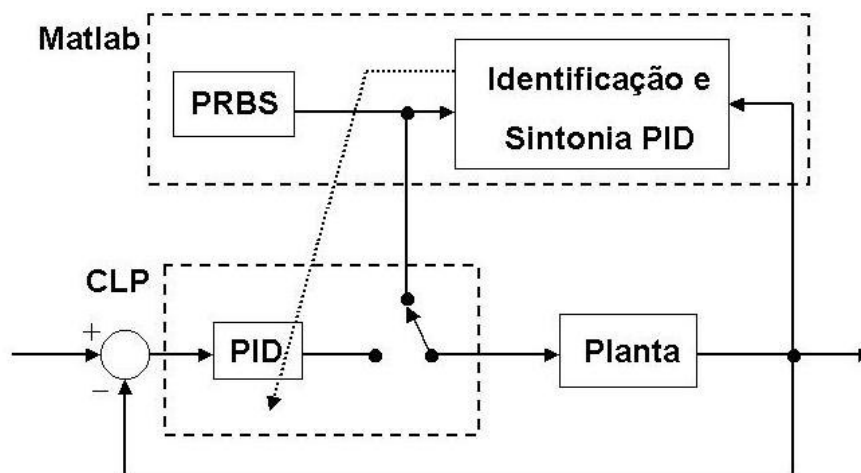


Figura 4.1 - Diagrama de blocos do projeto

Um fato importante deste trabalho é a utilização de instrumentação industrial para a realização dos experimentos. Assim não se tem apenas resultados teóricos obtidos de experimentos feitos com programas computacionais, e sim resultados obtidos de sistemas reais. No item 4.3 será apresentada a comunicação utilizada no projeto.

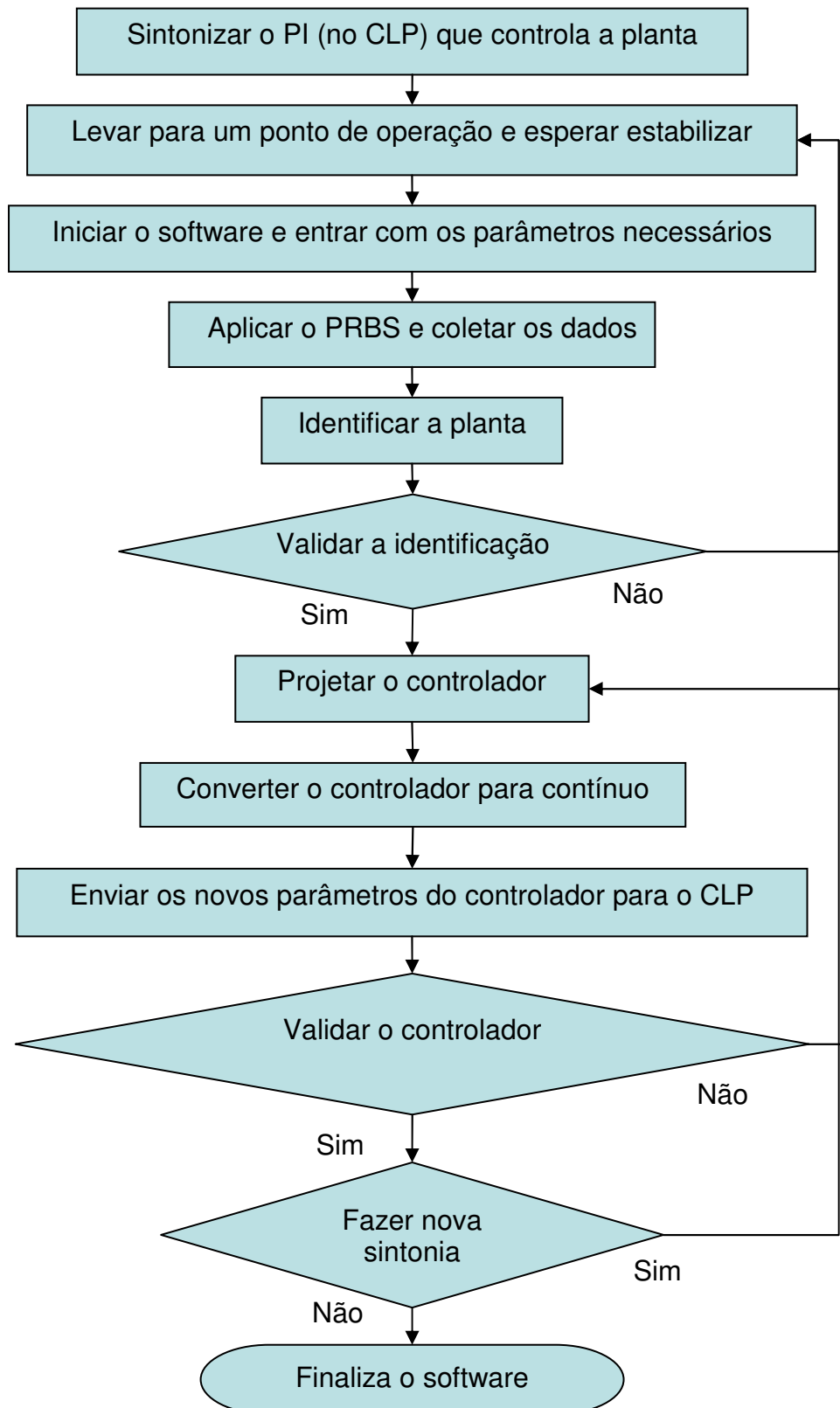


Figura 4.2 - Fluxograma do projeto

4.3. Comunicação do Projeto

A comunicação utiliza a infra-estrutura do “Projeto Controle Avançado Aplicado a Processos Industriais de Petróleo e Gás”, aprovado no Edital CTPETRO/CNPq 01/2003. Os softwares necessários para desenvolvimento deste trabalho são o Matlab e o RSLinx junto com o RSLogix da Rockwell. O Controlador Lógico Programável - CLP utilizado é o SLC 5/03 da Allen Bradley com dois cartões digitais e três analógicos para a comunicação com a planta.

O Diagrama da Figura 4.3 apresenta um esquema da comunicação entre o Matlab, o CLP e a Planta para a simulação do processo. O planta se comunica com o CLP através de rotinas de programação em modo diferencial de tensões.

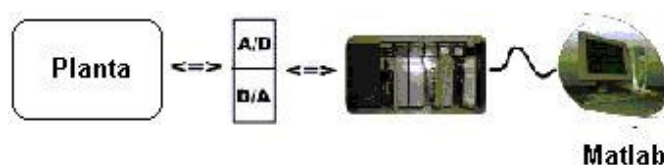


Figura 4.3 - Diagrama do Sistema de Comunicação.

A planta, que será descrita no próximo capítulo, se comunica com o CLP SLC 5/03 da Allen Bradley, através da placa de aquisição de dados (DAQ PCI-6024E) AD/DA da National Instruments, [11]. No CLP foi implementado o controlador PID que envia o sinal de controle para controlar a planta. A planta envia para o CLP o valor da(s) sua(s) variável(eis) para que se tenha os dados necessários para o processo do projeto do controlador, dentre eles o cálculo do erro entre a referência e o valor do parâmetro a ser controlado na planta.

O RSLogix foi utilizado para a programação na linguagem Ladder do CLP.

O Matlab, instalado em um computador, se comunica com o CLP através do padrão de comunicação serial RS-232 e dele obtém os valores da(s) variável(eis) da planta. E ao mesmo tempo o Matlab envia dados da referência (Set Point) e dos parâmetros do PI para o CLP. Os parâmetros do PI são calculados pelos métodos descritos no capítulo 2.

4.4. Descrição das Rotinas do Software

Foram feitos dois softwares para este trabalho. Um para sistemas de primeira ordem e outro para sistemas de segunda ordem.

Os softwares apresentam as rotinas descritas nos itens anteriores deste capítulo. As telas dos sistemas de segunda ordem são idênticas aos de primeira ordem, por isso serão apresentadas somente as telas para sistemas de primeira ordem. A figura 4.4 apresenta a tela inicial do programa para um sistema de primeira ordem. Nesta tela são solicitados alguns dados da planta necessários para ser feita a identificação do sistema de primeira ordem.

A imagem mostra uma janela de software intitulada "Untitled". O cabeçalho da janela contém o texto: "UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE", "PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA" e "PROGRAMA DE RE-SINTONIA DE CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM". Abaixo disso, há uma barra de título com o texto "TELA DOS PARAMETROS NECESSARIOS PARA A IDENTIFICACAO DO SISTEMA". O corpo da janela contém vários campos de entrada de texto com rótulos à esquerda: "Periodo de amostragem:" com o valor "1"; "Tempo de identificação:" com o valor "300"; "Valores do PV:" com sub-rotulados "Minimo:" (valor "0") e "Maximo:" (valor "30"); "Valores do MV:" com sub-rotulados "Minimo:" (valor "-3") e "Maximo:" (valor "3"); e "Variação do MV para a geracao do PRBS (%):" com o valor "10". Na base da janela, há dois botões: "Enviar" e "Limpar".

Figura 4.4 – Tela de identificação do sistema

Nesta tela são solicitados os seguintes dados do sistema:

- Período de amostragem do sistema;
- Tempo necessário para fazer a identificação do sistema;
- Valor mínimo da PV;
- Valor máximo da PV;
- Valor mínimo da MV;

- Valor máximo da MV;
- Valor da porcentagem de variação da MV para a geração do PRBS.

A etapa de identificação inicia-se levando o sistema para o ponto de operação desejado para sua identificação. Depois se inserem os dados solicitados, e em seguida os mesmos são enviados para o algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivo, descrito no capítulo 3, para ser feita a identificação do sistema.

Durante a identificação uma tela mostrará os valores SP, PV e MV em porcentagem para o acompanhamento do sistema durante a identificação. A figura 4.5 mostra a tela de visualização do sistema durante um experimento que foi realizado.

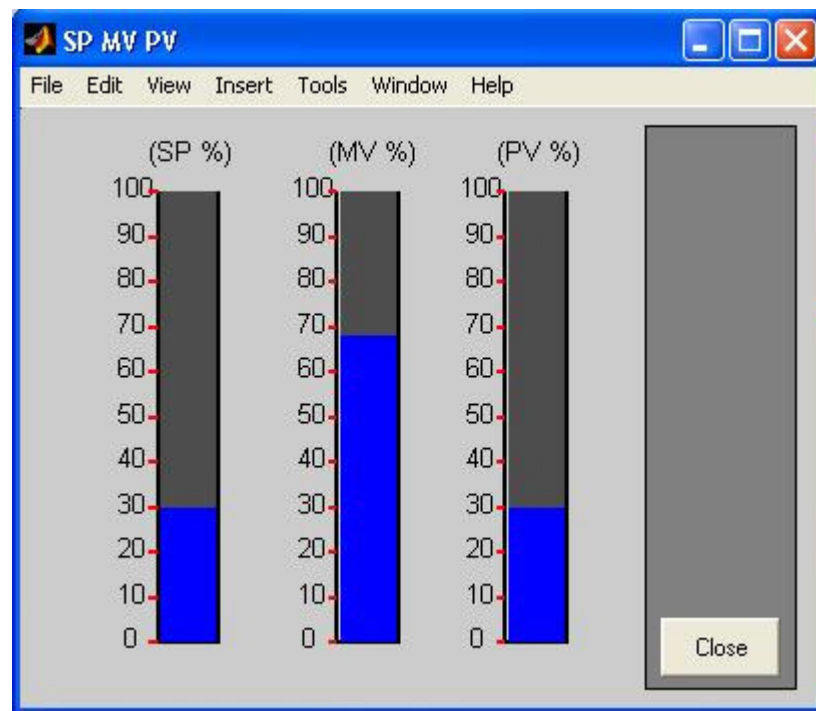


Figura 4.5 – Tela de visualização do sistema

Após a conclusão da identificação do sistema são apresentados três gráficos e a tela de re-sintonia do controlador PI. O primeiro gráfico contém os parâmetros obtidos da planta, o segundo a validação da identificação e o terceiro a saída da planta (modelo obtido), em malha aberta, utilizando o valor da MV que estava sendo aplicado no sistema antes da identificação do sistema, ou seja, no ponto de operação. A tela de re-sintonia do PI só deverá ser utilizada após a conclusão da etapa de identificação do sistema.

Se o sistema não foi validado então inicia-se a etapa de identificação novamente, caso contrário a etapa de identificação está concluída e passa-se para a etapa de re-sintonia do controlador PI.

A figura 4.6 apresenta a tela que dará início a etapa de re-sintonia do controlador PI.

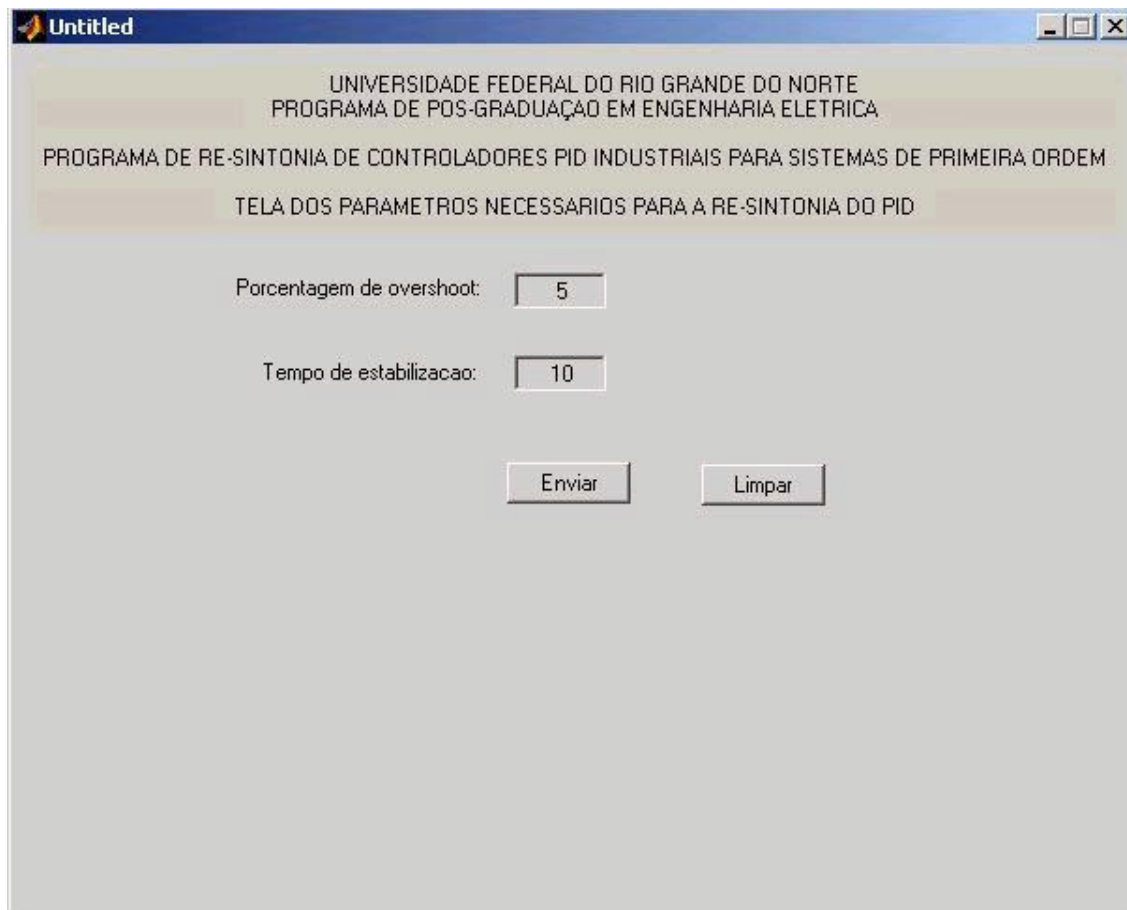


Figura 4.6 – Tela de re-sintonia do controlador PI

Nesta tela da figura 4.6 são solicitados dois dados da planta necessários para ser feita a re-sintonia do controlador PI, que são: a porcentagem de overshoot e o tempo de estabilização desejado do sistema. Os dados são então enviados para o algoritmo do Método do Lugar das Raízes, descrito no capítulo 2, para ser feito o projeto dos parâmetros do controlador PI.

Após o término do projeto do controlador PI, os parâmetros obtidos são enviados para o controlador PI do CLP e o gráfico do root locus do sistema discreto obtido é apresentado numa tela. E a partir daí é feito o início da validação do projeto do PI. O sistema é levado durante um certo período para 10% abaixo do ponto de operação e em seguida é levado 10% acima do ponto de operação. Em seguida, são apresentados dois gráficos. O primeiro apresenta os valores MV durante o processo

de validação e o segundo apresenta os valores PV durante o mesmo período para verificar se o overshoot e o tempo de estabilização satisfazem os desejados.

Caso o controlador PI projetado não seja validado, reinicia-se então a etapa de re-sintonia de controlador PI, caso contrário o projeto é concluído e o sistema estará com seu controlador PI do CLP re-sintonizado.

As figuras com os gráficos dos resultados obtidos serão ilustrados no capítulo seguinte, onde serão apresentados resultados obtidos numa planta de nível.

Os algoritmos de identificação de sistemas e de sintonia dos controladores PI, e as telas de entradas de dados e dos resultados foram implementados no MATLAB. Foi feita a comunicação do MATLAB com o RSLogix da Rockwell para a interação dos algoritmos implementados no MATLAB com a planta controlada pelo CLP, como descrito no subitem 4.3.

Capítulo 5 – Estudo de Caso

5.1. Introdução

Os experimentos descritos neste capítulo foram realizados no LECA (Laboratório de Engenharia de Computação e Automação) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, utilizando a estrutura de comunicação descrita na seção 4.3 junto com o modelo da planta descrita na seção 5.2. A figura 5.1 apresenta os três componentes básicos utilizados nos experimentos: computador, CLP e a planta.

5.2. Modelo da Planta

A planta utilizada é um sistema de tanques acoplados. Os dois tanques são ligados em cascata, ou seja, o tanque 1 recebe água de uma bomba e o tanque 2 recebe a água do tanque 1. O objetivo deste trabalho é controlar o nível do tanque 2 através de um controlador PI utilizando os métodos de sintonia de controladores PID descritos nas seções anteriores.

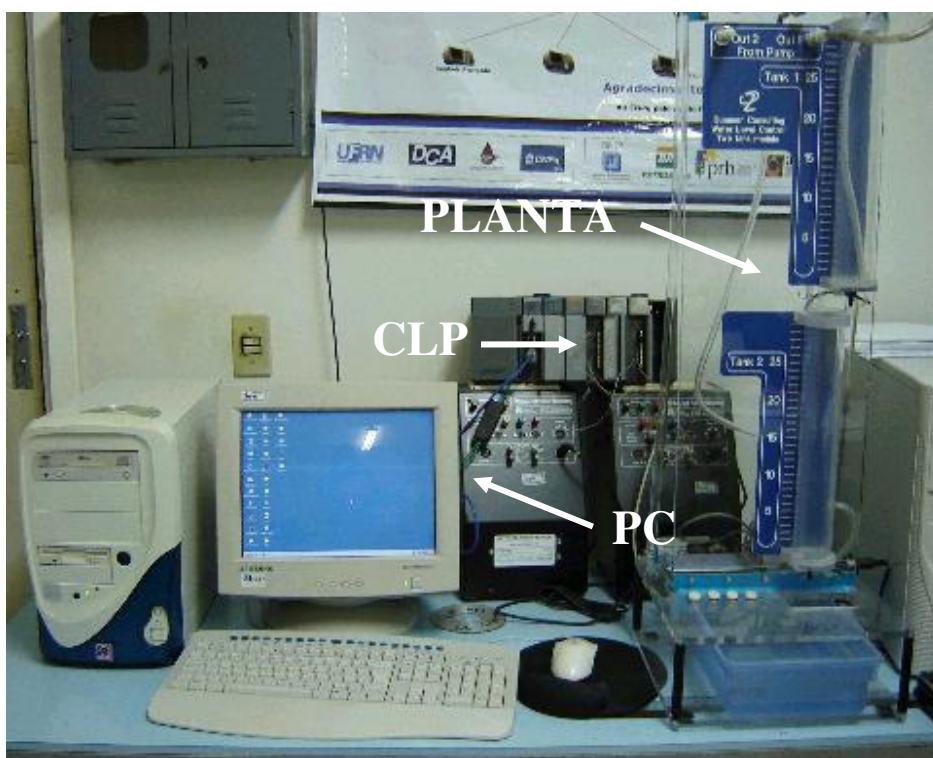
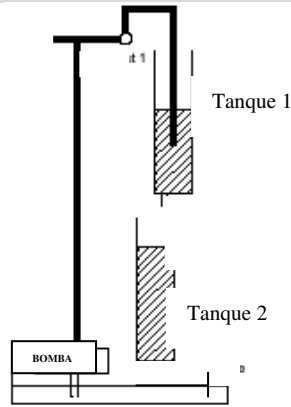


Figura 5.1 – Sistema Completo

A figura 5.1 apresenta o sistema completo utilizado para a realização dos experimentos deste trabalho. A planta utilizada foi esta, mas o sistema descrito na seção 3.1 pode ser facilmente adaptado e aplicado em outras plantas.

**Figura 5.2 - Modelo da Planta**

Esta planta trata-se de um sistema de segunda ordem já que cada tanque em separado é um sistema de primeira ordem. O modelo da planta não linear é descrito pelo modelo matemático a seguir, [12]:

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gL_1} + \frac{K_m}{A_1} V_p \quad (5.1)$$

$$\dot{L}_2 = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gL_2} + \frac{a_1}{A_2} \sqrt{2gL_1} \quad (5.2)$$

Na tabela a seguir identificamos cada parâmetro acima:

Tabela 5.1 – Descrição dos parâmetros

Parâmetros	Descrição
L_1 e L_2	Nível dos tanques 1 e 2
A_1 e A_2	Áreas das bases dos tanques 1 e 2
a_1 e a_2	Orifícios de saída dos tanques;
L_{10} e L_{20}	Pontos de operação para linearização do modelo
K_m	Constante da bomba;
V_p	Tensão aplicada na bomba
g	Aceleração da gravidade

Para obtenção do modelo matemático pode-se utilizar os valores descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Descrição dos Valores

Parâmetros	Valores
$A_1 = A_2$	15,518 cm ²
$a_1 = a_2$	0,178 cm ²
L_{10} e L_{20}	15cm e 10 cm
K_m	4,6 cm ³ /s.V
g	9,81 m/s ²

O modelo matemático linearizado para o sistema descrito na Figura 5.2 é o seguinte, [12]:

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 + \frac{K_m}{A_1} V_p \quad (5.3)$$

$$\dot{L}_2 = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} L_2 + \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 \quad (5.4)$$

5.3. Resultados Experimentais

Os experimentos foram realizados na planta descrita no subitem anterior. Primeiro será apresentado o experimento feito no sistema de primeira ordem utilizando apenas o tanque 1 e depois o experimento feito no sistema de segunda ordem utilizando os dois tanques para controlar o nível do tanque 2.

5.3.1. Experimento Realizado no Sistema de Primeira Ordem

Etapa de identificação do sistema de primeira ordem.

Ao ser inicializado o software, abri-se uma tela de recebimento dos parâmetros da planta necessários para a identificação do sistema de primeira ordem.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRICA
PROGRAMA DE RE-SINTONIA DE CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM
TELA DOS PARAMETROS NECESSARIOS PARA A IDENTIFICACAO DO SISTEMA

Periodo de amostragem:

Tempo de identificação:

Valores do PV:

Minimo:

Maximo:

Valores do MV:

Minimo:

Maximo:

Variacao do MV para a geracao do PRBS (%):

Figura 5.3 - Tela de identificação do sistema de primeira ordem

A figura 5.3 mostra os dados de entrada utilizados para a identificação do sistema de primeira ordem, este sistema controla o nível do tanque 1 da figura 5.2.

Os dados da planta são os seguintes:

- Período de amostragem de 1 segundo;
- Tempo de identificação de 300 segundos;
- Valor mínimo do PV igual a 0 cm;
- Valor máximo do PV igual a 30 cm;
- Valor mínimo do MV igual a -3V;
- Valor máximo do MV igual a 3V;

A MV do sistema é a tensão aplicada na bomba que alimenta o tanque 1 e a PV é o nível do tanque 1 medido pelo sensor de nível do tanque 1.

O tanque 1 foi levado para o ponto de operação 15 cm e depois foram enviados os dados da tela da figura 5.3 para o algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivo, para ser feita a identificação do sistema. O modelo de um sistema de primeira ordem é representado pela equação 5.5, e a equação 5.6 apresenta os parâmetros obtidos na identificação da planta.

$$y(k+1) = \theta_1 y(k) + \theta_2 u(k) \quad (5.5)$$

$$y(k+1) = 0.91y(k) + 0.25u(k) \quad (5.6)$$

Depois de feita a identificação do sistema são apresentados os resultados obtidos. A figura 5.4 apresenta os dois parâmetros (θ_1 e θ_2) obtidos da identificação do sistema de primeira ordem. Percebe-se que os valores convergiram, e isso significa que a identificação levou a um bom resultado. A figura 5.5 apresenta a validação da identificação do sistema de primeira ordem, o resultado obtido também foi bom. Veja que o modelo obtido tem uma resposta bem próxima da resposta da planta quando são aplicadas as mesmas entradas no MV durante o período de identificação.

Para mais um teste do modelo obtido foi apresentado, figura 5.6, o nível de estabilização do modelo obtido, em malha aberta, utilizando o valor da MV obtida do CLP que estava sendo aplicado no sistema no início da identificação do sistema, ou seja, a MV aplicada no sistema quando o mesmo estava no ponto de operação 15 cm. O resultado mostra que o modelo estabilizou bem próximo de 15 cm.

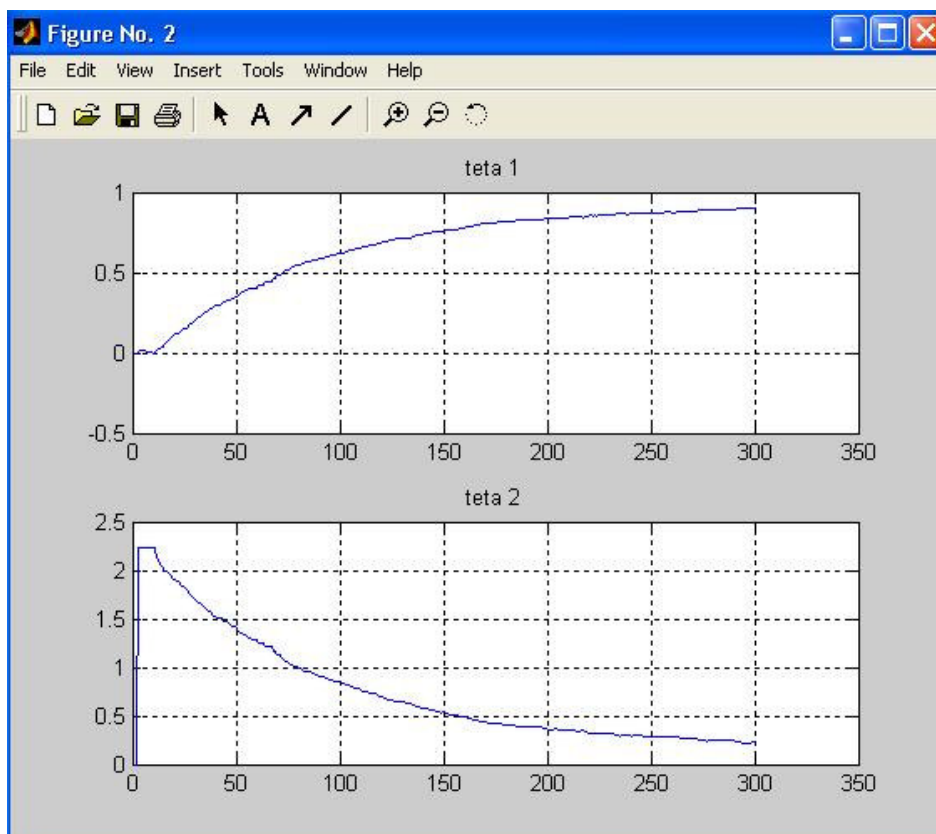


Figura 5.4 – Parâmetros obtidos da identificação do sistema de primeira ordem

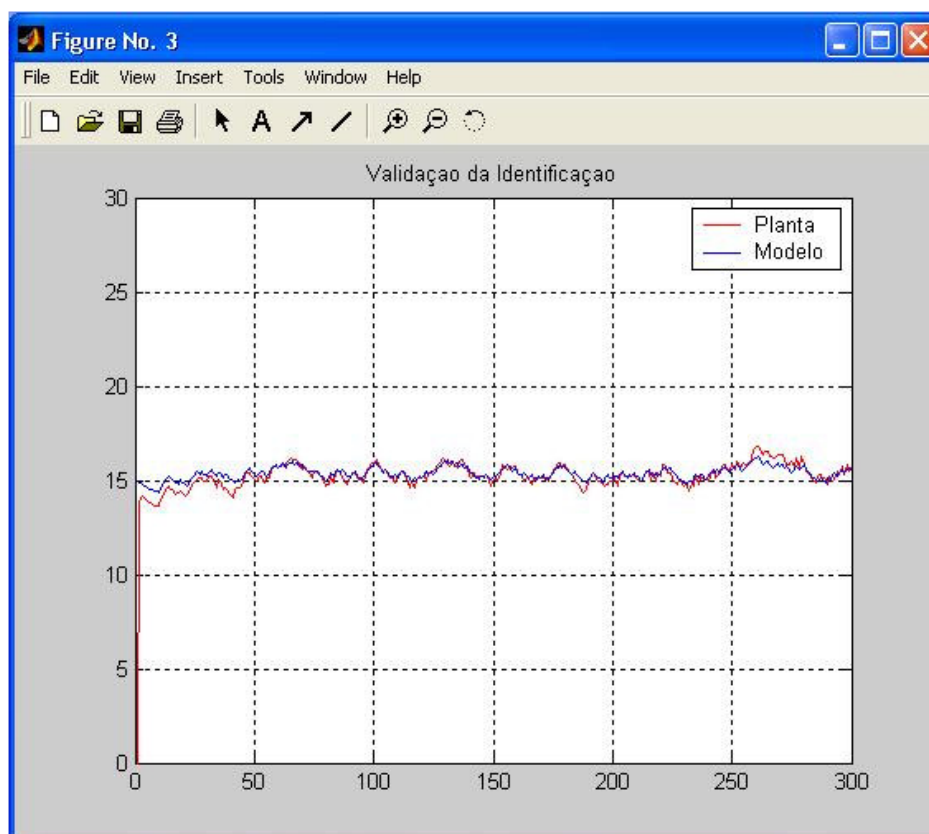


Figura 5.5 - Validação da identificação do sistema de primeira ordem

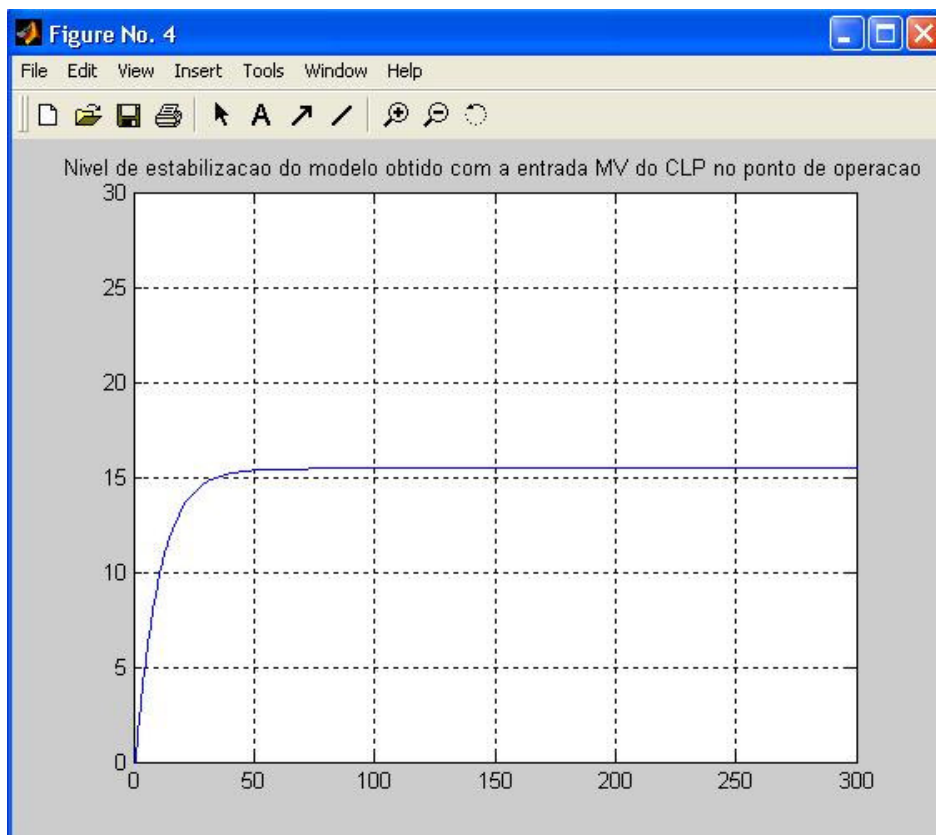


Figura 5.6 – Resposta do sistema de primeira ordem obtido com a entrada MV, obtida do CLP no ponto de operação, aplicada no modelo em malha aberta

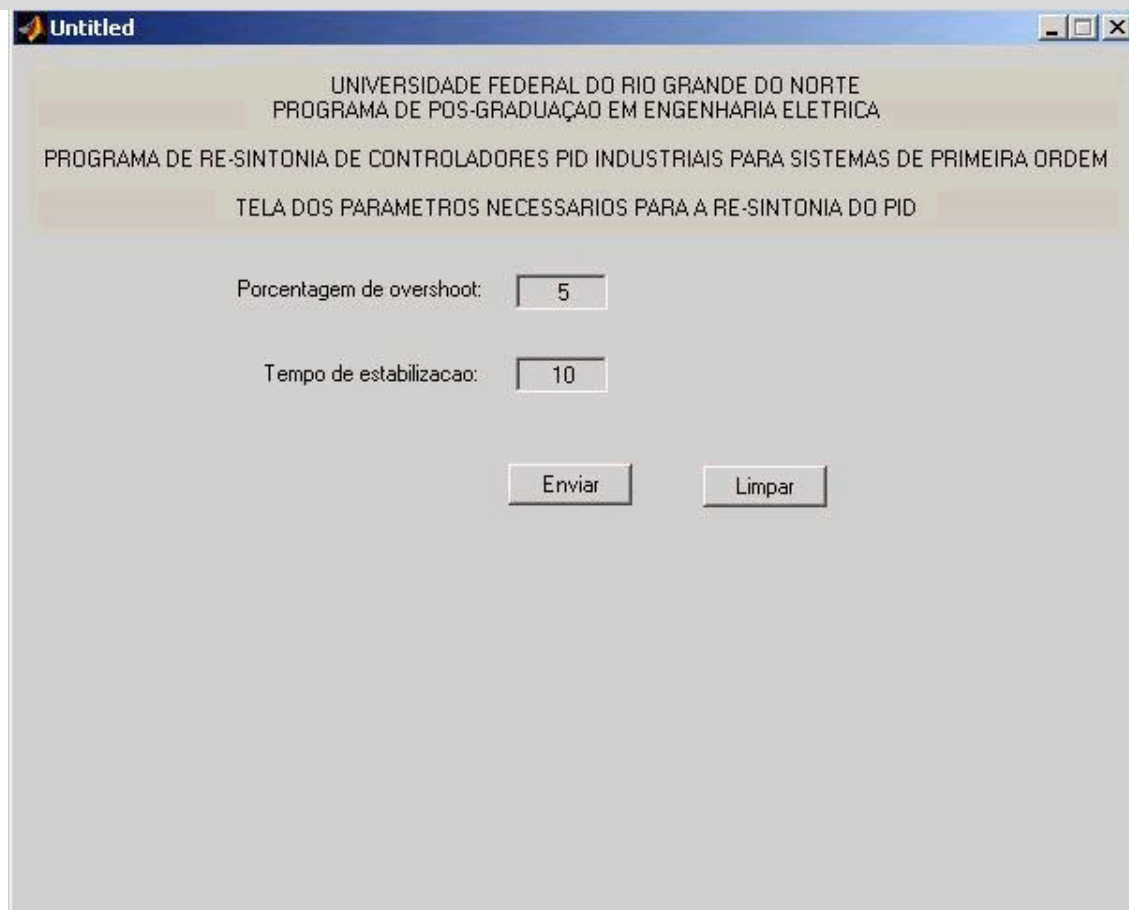
A etapa de identificação obteve um bom resultado e foi então concluída. Passa-se agora para a etapa de re-sintonia de controladores PI implementado no CLP que controla o sistema.

Etapa de re-sintonia do controlador PI do sistema de primeira ordem.

A figura 5.7 apresenta a tela de re-sintonia e são solicitados alguns dados da planta necessários para ser feita a re-sintonia do controlador PI. Os dados de entrada utilizados para a realização da re-sintonia do PI para o sistema de primeira ordem foram:

- Porcentagem de overshoot desejado de 5%;
- Tempo de estabilização desejado de 10 segundos.

Os dados foram enviados para o algoritmo do Método do Lugar das Raízes para ser feito o projeto dos parâmetros do controlador PI.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRICA
PROGRAMA DE RE-SINTONIA DE CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM
TELA DOS PARAMETROS NECESSARIOS PARA A RE-SINTONIA DO PID

Porcentagem de overshoot:

Tempo de estabilizacao:

Figura 5.7 - Tela de re-sintonia do controlador PI para sistemas de primeira ordem

Os parâmetros inseridos na tela de re-sintonia do PI, apresentado na figura 5.7, retornaram um valor desejado no Root-locus igual a $(0.6122 \pm 0.273i)$. A figura 5.8 mostra o root locus obtido do sistema de primeira ordem discreto com os parâmetros solicitados na tela de re-sintonia do PI. A figura 5.9 apresenta os parâmetros obtidos e enviados para o controlador PI do CLP. Os parâmetros do controlador PI obtidos foram $K_p = 3$ e $K_i = 1$.

A figura 5.10 apresenta a validação do projeto do PI. O sistema foi levado durante um tempo de três vezes o período de estabilização desejado (30s) para 10% abaixo do ponto de operação 15cm e em seguida foi levado 10% acima do ponto de operação 15cm pelo mesmo período. É mostrado o gráfico com os valores PV durante essa validação e o resultado obtido é satisfatório. O sistema chegou a estabilizar um pouco antes dos 10 segundos e ficou em torno do overshoot de 5%.

Por fim é apresentado na figura 5.11 o gráfico com os valores MV durante o processo de validação do projeto do PI. Percebe-se que não teve problemas com relação à saturação da MV.

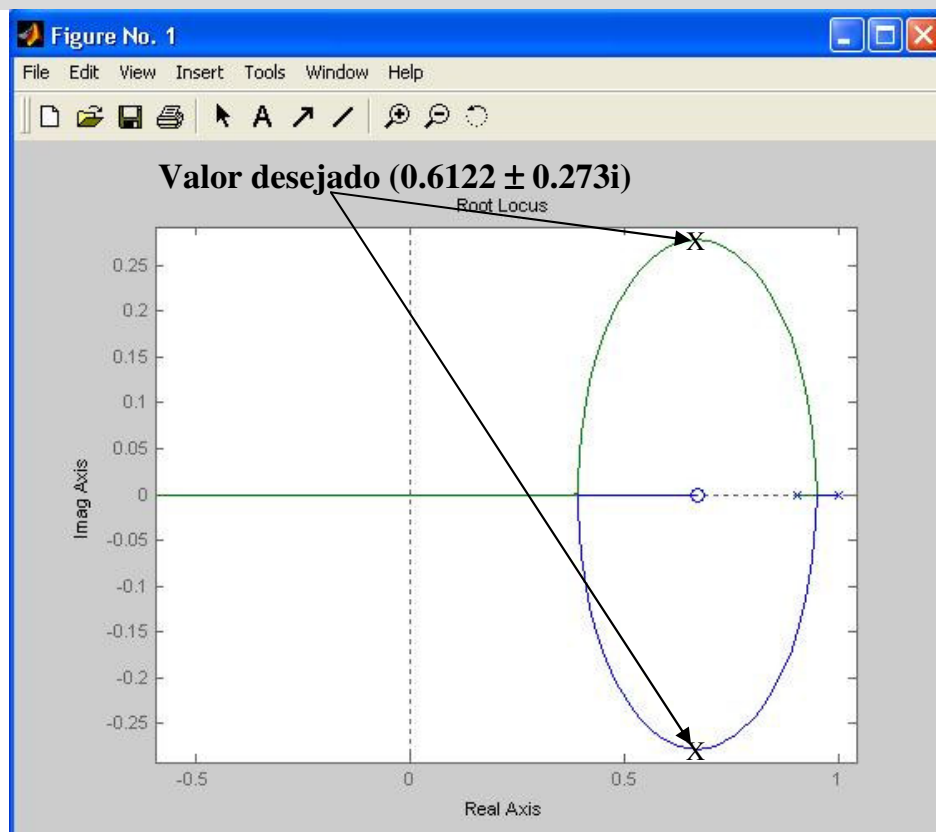


Figura 5.8 – Root-Locus do sistema de primeira ordem discreto

PID Setup

Tuning Parameters	Inputs	Flags
Controller Gain K_c = 3.0	Setpoint SP = 7372	TM = 0
Reset K_i = 1.0	Setpoint MAX(Smax) = 16383	AM = 0
Rate T_d = 0.00	Setpoint MIN(Smin) = 0	CM = 0
Loop Update = 0.10	Process Variable PV = 7219	OL = 0
Control Mode = E=SP-PV		RG = 0
PID Control = AUTO		SC = 0
Time Mode = STI		TF = 0
Limit Output CV = NO		DA = 0
Deadband = 0		DB = 0
Feed Forward Bias = 8191		UL = 0
		LL = 0
		SP = 0
		PV = 0
		DN = 1
		EN = 1

OK Cancel Help

Figura 5.9 – Tela do RSLogix do bloco PI implementado no CLP

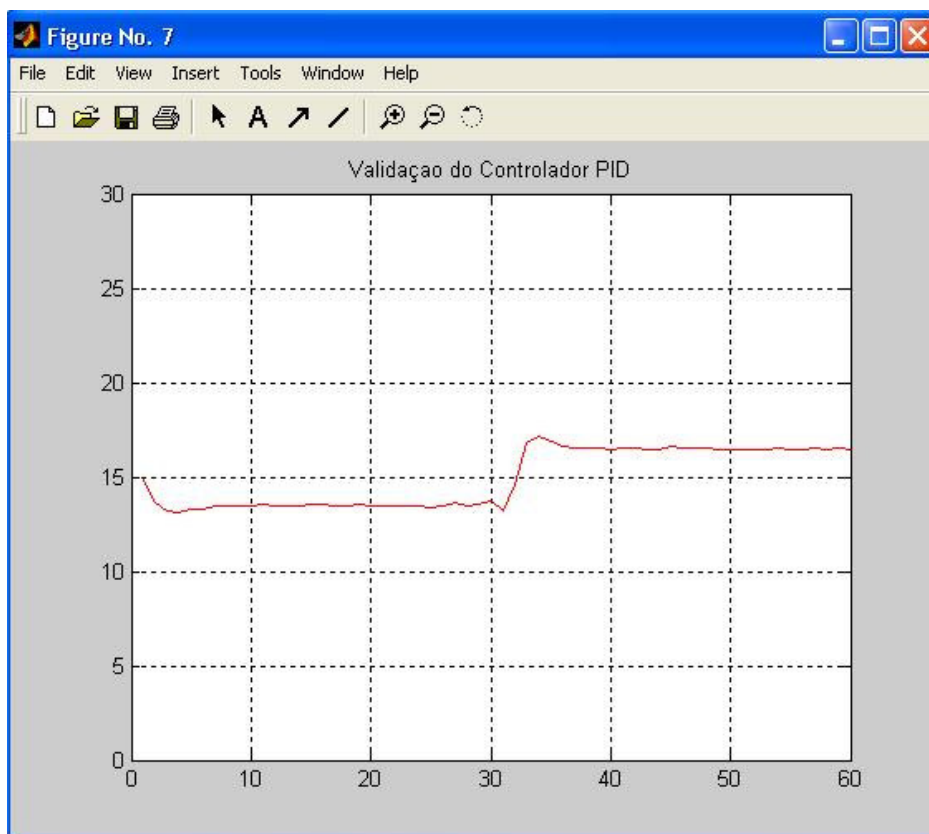


Figura 5.10 – Resposta da planta com controlador PI em torno do ponto de operação

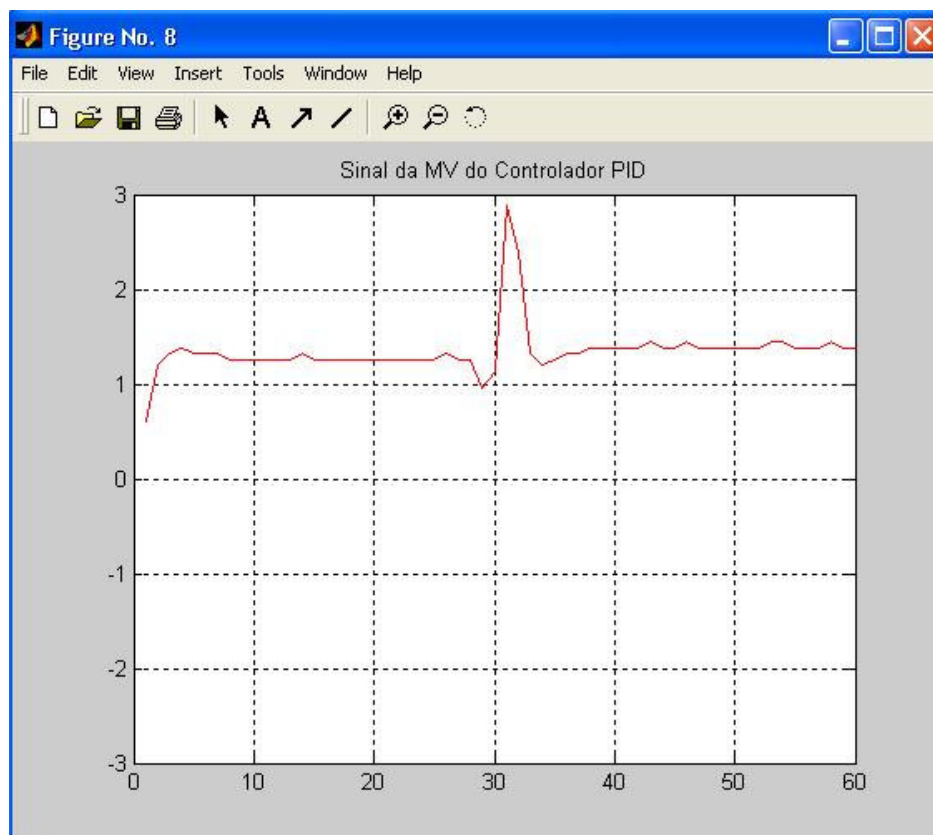


Figura 5.11 – Sinal da MV durante a validação do projeto do controlador PI

5.3.2. Experimento Realizado no Sistema de Segunda Ordem

Etapa de identificação do sistema de segunda ordem.

Ao ser inicializado o software para sistemas de segunda ordem, abri-se uma tela de recebimento dos parâmetros da planta necessários para a identificação do sistema de segunda ordem.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRICA
PROGRAMA DE RE-SINTONIA DE CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS PARA SISTEMAS DE SEGUNDA ORDEM
TELA DOS PARAMETROS NECESSARIOS PARA A IDENTIFICACAO DO SISTEMA

Periodo de amostragem: 2

Tempo de identificação: 500

Valores do PV:
Minimo: 0
Maximo: 30

Valores do MV:
Minimo: -3
Maximo: 3

Variação do MV para a geracao do PRBS (%): 10

Enviar Limpar

Figura 5.12 - Tela de identificação do sistema de segunda ordem

A figura 5.12 mostra os dados de entrada utilizados para a identificação do sistema de segunda ordem, este sistema controla o nível do tanque 2 da figura 5.2.

Os dados da planta são os seguintes:

- Período de amostragem de 2 segundos;
- Tempo de identificação de 500 segundos;
- Valor mínimo do PV igual a 0 cm;
- Valor máximo do PV igual a 30 cm;
- Valor mínimo do MV igual a -3V;
- Valor máximo do MV igual a 3V;

A MV do sistema é a tensão aplicada na bomba que alimenta o tanque 1 e a PV é o nível do tanque 2 medido pelo sensor de nível do tanque 2. Os tanques estão em cascata, ou seja, o tanque 2 recebe o líquido do tanque 1 que por sua vez recebe o líquido da bomba. Formando assim um sistema de segunda ordem.

O tanque 2 foi levado para o ponto de operação 10 cm e depois foram enviados os dados da tela da figura 5.12 para o algoritmo dos Mínimos Quadrados Recursivo, para ser feita a identificação do sistema. O modelo de um sistema de segunda ordem é representado pela equação 5.7, e a equação 5.8 apresenta os parâmetros obtidos na identificação da planta.

$$y(k+1) = \theta_1 y(k) + \theta_2 y(k-1) + \theta_3 u(k) + \theta_4 u(k-1) \quad (5.7)$$

$$y(k+1) = 0.92y(k) + 0.012y(k-1) + 0.17u(k) + 0.018u(k-1) \quad (5.8)$$

Depois de feita a identificação do sistema são apresentados os resultados obtidos. A figura 5.13 apresenta os quatro parâmetros (θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4) obtidos da identificação do sistema de segunda ordem. Percebe-se que os valores convergiram, e isso significa que a identificação levou a um bom resultado. A figura 5.14 apresenta a validação da identificação do sistema de segunda ordem, o resultado obtido também foi bom. Veja que o modelo obtido tem uma resposta bem próxima da resposta da planta quando são aplicadas as mesmas entradas no MV durante o período de identificação.

Para mais um teste do modelo obtido foi apresentado, figura 5.15, o nível de estabilização do modelo obtido, em malha aberta, utilizando o valor da MV obtida do CLP que estava sendo aplicado no sistema no início da identificação do sistema, ou seja, a MV aplicada no sistema quando o mesmo estava no ponto de operação 10 cm. O resultado mostra que o modelo estabilizou exatamente em 10 cm.

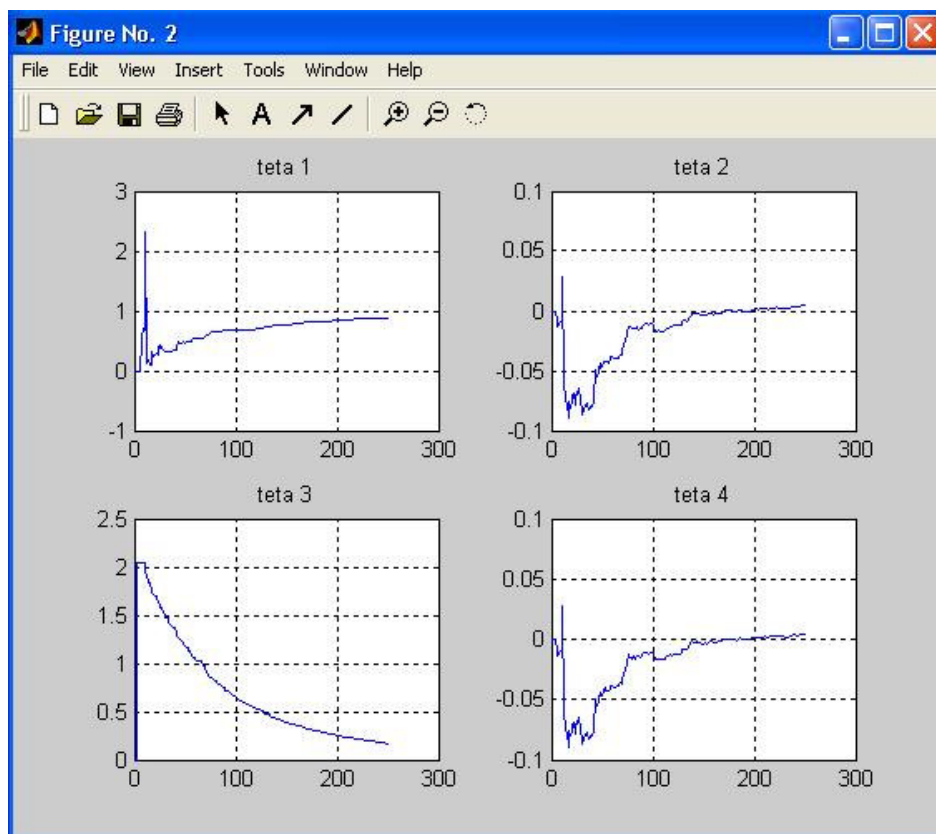


Figura 5.13 - Parâmetros obtidos da identificação do sistema de segunda ordem

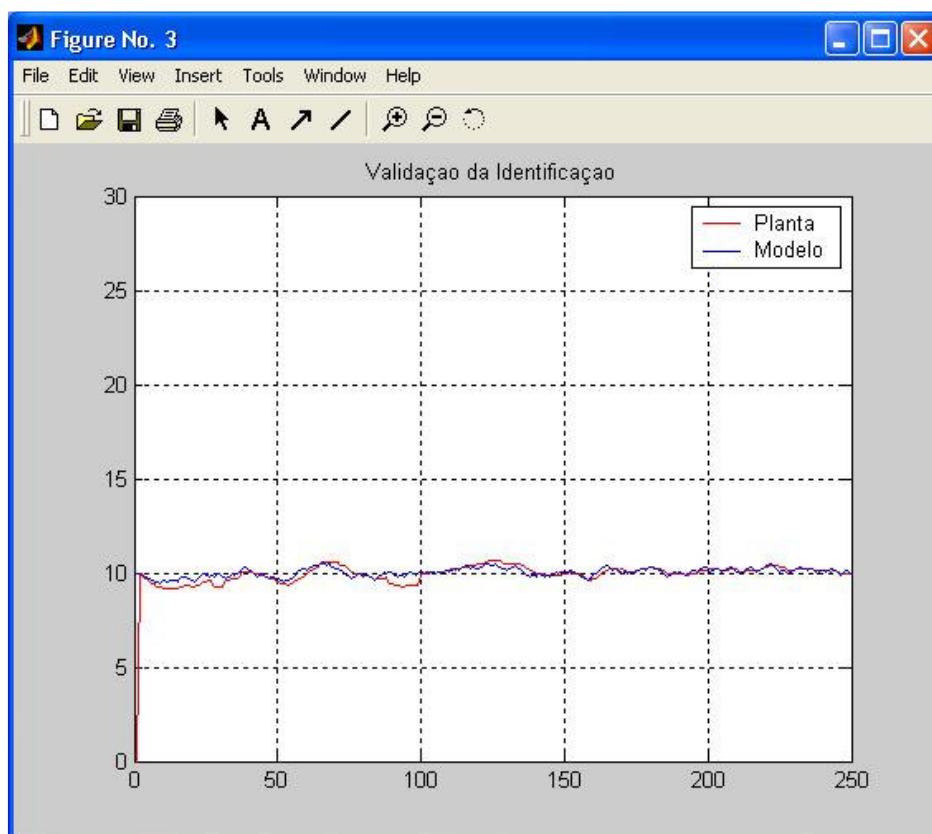


Figura 5.14 - Validação da identificação do sistema de segunda ordem

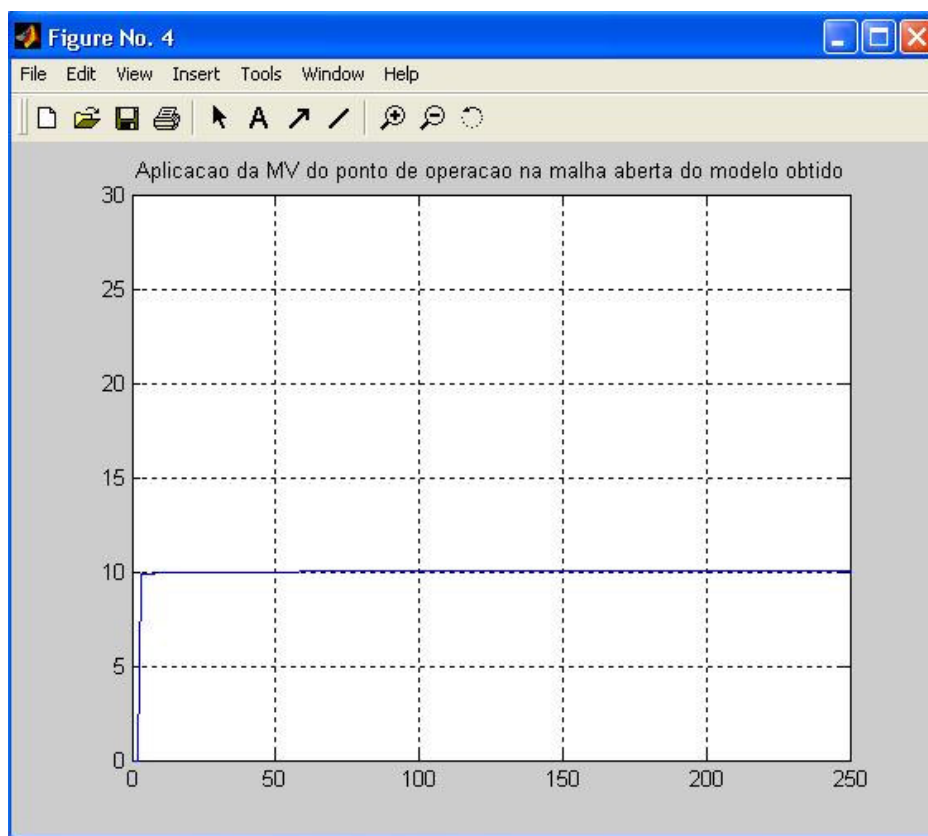


Figura 5.15 – Resposta do sistema de segunda ordem obtido com a entrada MV, obtida do CLP no ponto de operação, aplicada no modelo em malha aberta

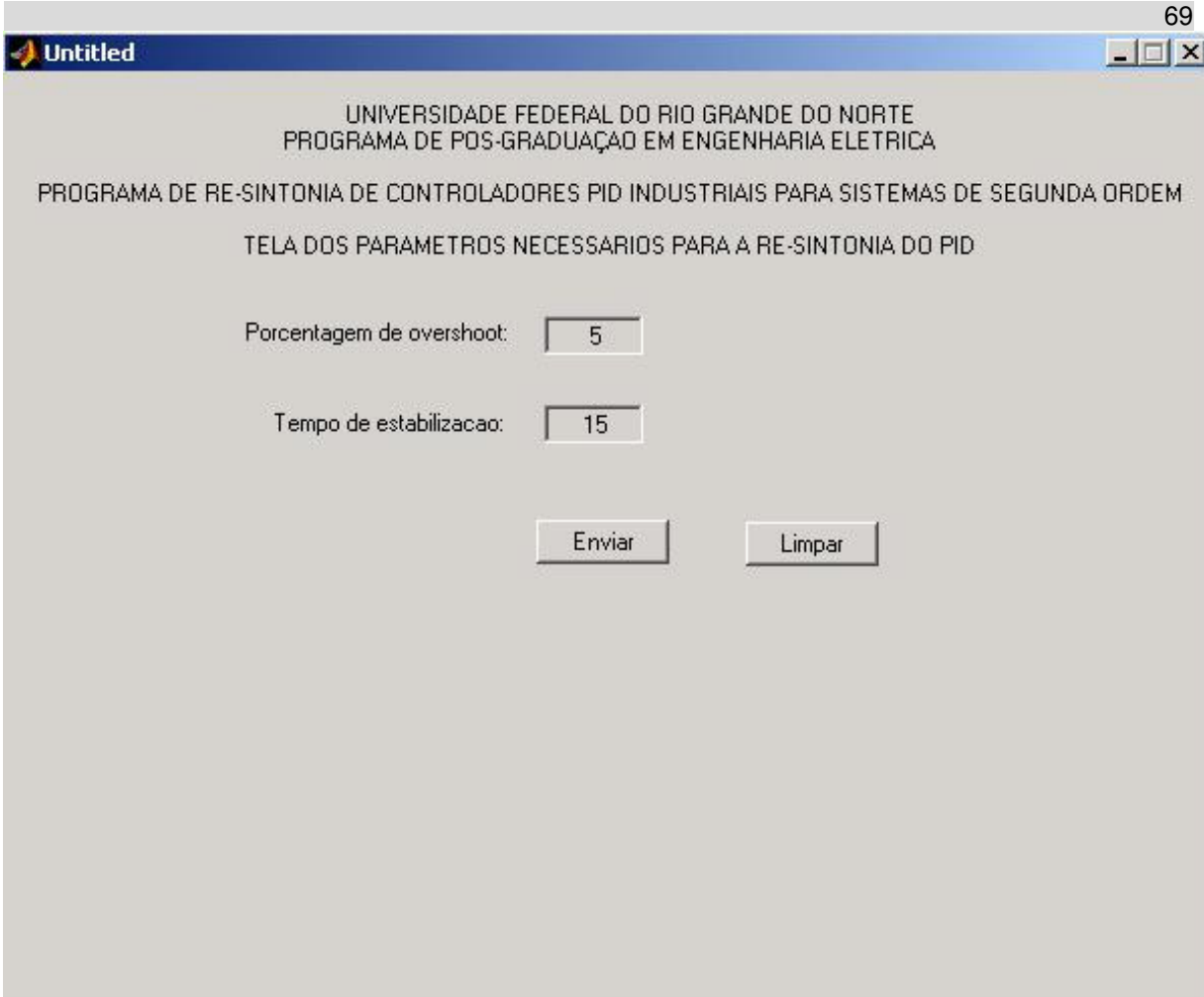
A etapa de identificação obteve um bom resultado e foi então concluída. Passa-se agora para a etapa de re-sintonia de controladores PI implementado no CLP que controla o sistema.

Etapa de re-sintonia do controlador PI do sistema de segunda ordem.

A figura 5.16 apresenta a tela de re-sintonia e são solicitados alguns dados da planta necessários para ser feita a re-sintonia do controlador PI. Os dados de entrada utilizados para a realização da re-sintonia do PI para o sistema de segunda ordem foram:

- Porcentagem de overshoot desejado de 5%;
- Tempo de estabilização desejado de 15 segundos.

Os dados foram enviados pra o algoritmo do Método do Lugar das Raízes para ser feito o projeto dos parâmetros do controlador PI.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRICA

PROGRAMA DE RE-SINTONIA DE CONTROLADORES PID INDUSTRIAIS PARA SISTEMAS DE SEGUNDA ORDEM

TELA DOS PARAMETROS NECESSARIOS PARA A RE-SINTONIA DO PID

Porcentagem de overshoot:

Tempo de estabilizacao:

Figura 5.16 - Tela de re-sintonia do controlador PI para sistemas de segunda ordem

Os parâmetros inseridos na tela de re-sintonia do PI, apresentado na figura 5.16, retornaram um valor desejado no Root-locus igual a $(0.4973 \pm 0.3113i)$. A figura 5.17 mostra o Root-locus obtido do sistema de segunda ordem. A figura 5.18 apresenta os parâmetros obtidos e enviados para o controlador PI do CLP. Os parâmetros do controlador PI obtidos foram $K_p = 3,7$ e $K_i = 0,6$.

A figura 5.19 apresenta a validação do projeto do PI. O sistema foi levado durante um tempo de quatro vezes o período de estabilização desejado (60s) para 10% abaixo do ponto de operação 10cm e em seguida foi levado 10% acima do ponto de operação 10cm pelo mesmo período. É mostrado o gráfico com os valores PV durante essa validação e o resultado obtido é satisfatório. O sistema estabilizou em torno de 20 segundos e com *overshoot* de 9%. Mesmo ultrapassando os valores desejados o resultado é considerado bom.

Por fim é apresentado na figura 5.20 o gráfico com os valores MV durante o processo de validação do projeto do PI. Percebe-se que também não teve problemas com relação à saturação da MV.

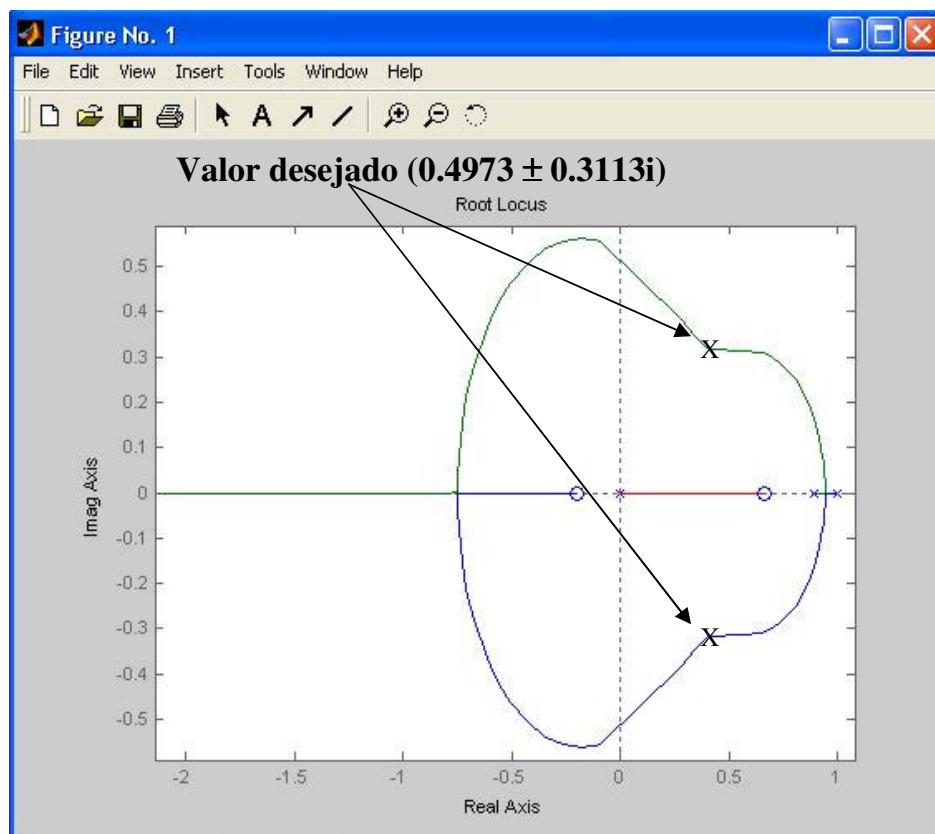


Figura 5.17 - Root-Locus do sistema de segunda ordem discreto

Tuning Parameters	Inputs	Flags
Controller Gain Kc = 3.7	Setpoint SP = 5461	TM = 1
Reset Ki = 0.6	Setpoint MAX(Smax) = 16383	AM = 0
Rate Td = 0.00	Setpoint MIN(Smin) = 0	CM = 0
Loop Update = 0.01	Process Variable PV = 5384	OL = 0
Control Mode = E=SP-PV		RG = 0
PID Control = AUTO		SC = 0
Time Mode = TIMED		TF = 0
Limit Output CV = NO		DA = 0
Deadband = 0		DB = 0
Feed Forward Bias = 8191		UL = 0
		LL = 0
		SP = 0
		PV = 0
		DN = 0
		EN = 1

Output:

Control Output CV (%)	70
Output Max CV (%)	100
Output Min CV (%)	0
Scaled Error SE	77

Buttons: OK, Cancel, Help

Figura 5.18 - Tela do RSLogix do bloco PI implementado no CLP

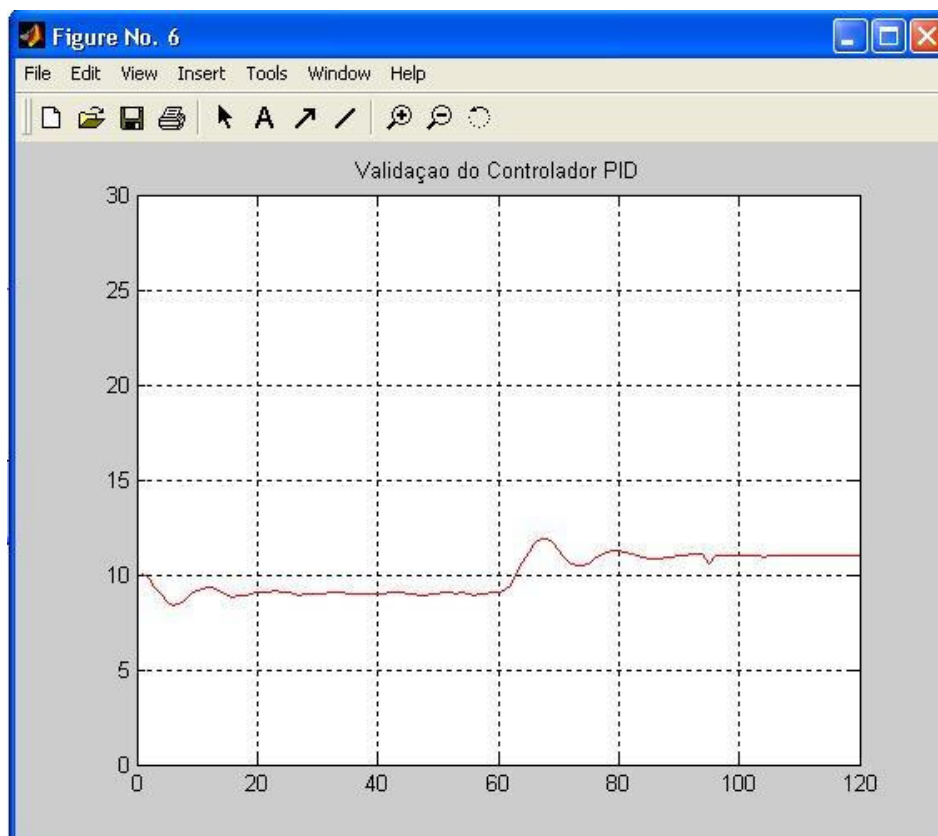


Figura 5.19 - Resposta da planta com controlador PI em torno do ponto de operação

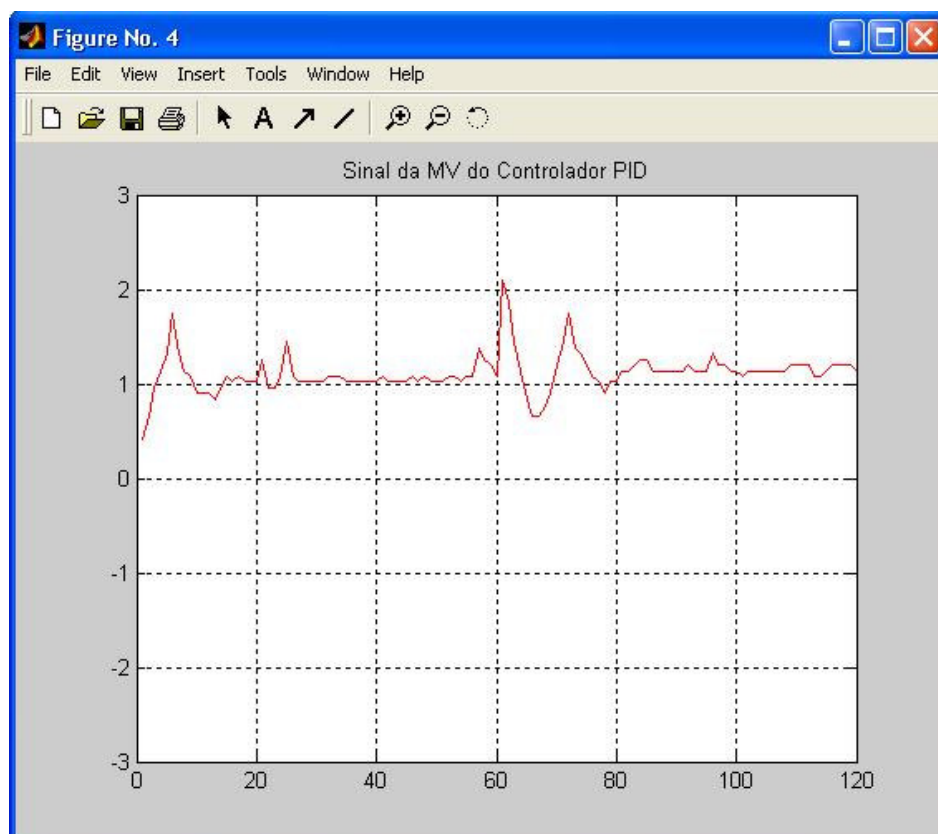


Figura 5.20 - Sinal da MV durante a validação do projeto do controlador PI

Capítulo 6 - Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros

Este trabalho mostra uma linha de pesquisa de ampla aplicação na indústria. Vários trabalhos já foram feitos para re-sintonia de controladores PID, mas poucos utilizando instrumentação industrial.

O presente trabalho apresentou o método de projeto e implementação de controladores PID, baseado em instrumentação industrial. O software apresentado neste trabalho foi aplicado em plantas de níveis de tanques de primeira e segunda ordem controladas por controladores PI implementados num CLP. O software foi aplicado para fazer a re-sintonia dos parâmetros dos controladores PI das plantas de primeira e segunda ordem, apresentando bons resultados nas suas duas etapas. A primeira etapa é a da identificação do sistema, utilizando o algoritmo dos mínimos quadrados recursivos e a segunda a do projeto dos parâmetros do controlador PI, utilizando o algoritmo do método do lugar das raízes.

Foram feitos experimentos simulando uma planta no próprio computador para testar e validar os algoritmos desenvolvidos. O tempo de identificação aplicado na planta real foi maior que o aplicado na planta simulada. Um dos motivos disto é o fato dos sensores de nível apresentarem ruídos nas suas medições, o que implica de um tempo maior para que os parâmetros obtidos da planta convirjam para seus valores.

Com a estrutura de comunicação montada é possível o desenvolvimento de vários outros trabalhos, entre eles estão:

- Aplicação do software desenvolvido neste trabalho em outras plantas de primeira e segunda ordem;
- Utilização de outros algoritmos para a etapa de identificação de sistemas;
- Utilização de outros algoritmos para o projeto dos parâmetros do controlador PID;
- Projeto de outros tipos de controladores utilizando o modelo obtido com o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo ou com outro algoritmo.

Referências Bibliográficas

- [1] Maitelli, A. L. Apostila de Controladores Lógicos Programáveis. UFRN, Natal-RN, 2003. (<ftp://ftp.dca.ufrn.br/pub/users/maitelli/clp/>). Consultada em 25/06/2004.
- [2] Coelho, A. A. Rodrigues & Coelho, L.S.. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Ed UFSC, Florianópolis, 1995.
- [3] Oliveira, J. C. P. Controlador Lógico Programável. Makron Books do Brasil, 1990.
- [4] Lourenço, João. Apostila de Sintonia de Controladores PID. Escola Superior de Tecnologia, Setúbal, 1997. (<http://ltodi.est.ips.pt/smarques/CS/Pid.pdf>). Consultada em 10/03/2005.
- [5] Oliveira, J. P. B. M. Review of Auto-tuning Techniques for Industrial PI Controllers. Dissertação de Mestrado. University of Salford, 1994.
- [6] Ogata, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 1998.
- [7] Cohen, Coon. Theoretical Consideration of Retarded Control, 1952.
- [8] Guia de Instruções, CLP SLC-500 Programação Avançada. Rockwell International Corporation, 2001.
- [9] Berto, Maria Isabel & Sá, Fabiana Rodrigues & Silveira, Vivaldo. Avaliação de Controle PID Adaptativo para um Sistema de Aquecimento Resistivo de Água. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, jul.-set. 2004.
- [10] Aguirre L. A. Introdução à Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 2000.
- [11] DAQ 6023E, 6024E, and 6025E User Manual, Multifunction I/O Devices for PCI, PXI, CompactPCI, and PCMCIA Bus Computers, December, 2000.
- [12] Fernandes Júnior, Francisco Guerra & Maitelli, A. L. & U. de Araujo, Fábio Meneghetti & H. Guedes de O., L. Affonso & B. Lopes, J. Soares. Implementação de Controladores PID Utilizando Lógica Fuzzy e Instrumentação Industrial. VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís, setembro de 2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)