

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO E APLICAÇÃO DE CONTROLADORES LÓGICOS
PROGRAMÁVEIS (CLP) E INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM)
NO CONTROLE E SUPERVISÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS**

PEDRO EUGÊNIO MARCONDES JUSTINO RIBEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul no
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Campo Grande – MS
Dezembro de 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

PEDRO EUGÊNIO MARCONDES JUSTINO RIBEIRO

**ESTUDO E APLICAÇÃO DE CONTROLADORES LÓGICOS
PROGRAMÁVEIS (CLP) E INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM)
NO CONTROLE E SUPERVISÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Campo Grande – MS
Dezembro de 2009

PEDRO EUGÊNIO MARCONDES JUSTINO RIBEIRO

**ESTUDO E APLICAÇÃO DE CONTROLADORES LÓGICOS
PROGRAMÁVEIS (CLP) E INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM)
NO CONTROLE E SUPERVISÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul no Centro de Ciências Exatas e Tecnologia no Departamento de Engenharia Elétrica, para obtenção da graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Profº Dr. Paulo Irineu Koltermann - Orientador

Profª Dra. Luciana Cambraia Leite

Profº Msc. Luigi Galotto Júnior

Campo Grande, 14 de Dezembro de 2009.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me ajudou nos momentos difíceis ou não, me dando calma e tranqüilidade.

Não posso mensurar aqui o quanto sou grato aos meus familiares, que sempre me incentivaram e me deram força na minha caminhada da graduação. Meu obrigado especial a meu pai Eugênio que soube me mostrar quais os valores necessários para uma boa formação; a minha mãe Zilda que me ensinou muito mais do que ela imagina e às minhas irmãs, as quais nunca pouparam esforços para o meu auxílio.

Outra pessoa essencial para a realização desse trabalho foi o Prof. Dr. Cristiano Quevedo, sempre disposto e compreensivo prestou grande auxílio ao trabalho como um todo.

Também agradeço ao prof. Luigi Galotto Junior pela atenção prestada, mesmo em meio a tantos afazeres; ao prof. Dr. João Onofre Pereira Pinto e toda equipe do BATLAB pela ajuda e disponibilidade de tempo e de material.

Por fim, sou muito grato aos meus colegas do grupo PET pela convivência cheia de experiência que auxiliou muito a minha formação e aos amigos de graduação que sempre estiveram presentes em momentos difíceis.

RESUMO

Os processos industriais atuais demandam aplicação de técnicas de controle apuradas visando aumento da qualidade e eficiência do sistema. A utilização de unidades micro controladas para implantação dessas técnicas otimizou os processos, diminuiu o custo de produção e adicionou segurança e flexibilidade às linhas de montagem. Porém, devido às características dinâmicas que os processos adquiriram, a indústria passou a demandar a supervisão desses processos. Essa supervisão deveria atender a requisitos de eficiência e rapidez, ou seja, deveria ser caracterizada pela facilidade de comunicação do operador com o equipamento a fim de facilitar a tomada de decisão a respeito do controle do processo. Nesse contexto surgiram os sistemas supervisórios, caracterizados pela presença de interfaces homem-máquina para auxílio da comunicação entre o usuário e o sistema de controle implementado em controladores lógicos programáveis.

No presente trabalho foi realizado o projeto, simulação e implementação de um sistema supervisório de processos térmicos utilizando controladores lógicos programáveis e interface homem-máquina. Para tanto se realizou um estudo abrangendo técnicas de controle, técnicas de identificação e modelagem de processos, equipamentos utilizados na supervisão de processos automatizados, linguagens e softwares de programação utilizados nesses equipamentos.

Para implementação do sistema consideraram-se as técnicas de controles mais utilizadas na indústria, bem como técnicas alternativas que possam representar boas opções aplicadas a problemas específicos. O processo a ser controlado foi escolhido por demonstrar-se largamente utilizado na indústria. As plantas a serem controladas foram estudadas, bem como técnicas de modelagem, identificação e controle.

ABSTRACT

Current industrial processes require the application of accurate control techniques in order to increase quality and efficiency. The use of micro-controlled units for deployment of these techniques streamlined processes, reducing the cost of production, and added security and flexibility to the manufacture lines. However, due to the dynamic characteristics processes have acquired, the industry has required supervision of the processes. The monitoring should attend efficiency and speed requirements, ie, should be characterized by easy communication between the equipment and operator to facilitate decision making regarding the control of the process. So the supervisory systems have emerged characterized by the presence of human-machine interfaces (HMI) to aid communication between the user and the control system implemented in programmable logic controllers (PLC).

This work presents the design, simulation and implementation of a supervisory system of industry thermal processes using programmable logic controller and human-machine interface. To do so, an investigation was conducted comprising control techniques, processes identification, modeling techniques and the equipment used in the supervision process, languages and programming software for such equipment.

To implement the system, were also considered also the most frequently used control techniques in industry were also considered as well as alternative techniques that may represent good option to specific problems. The process to be controlled was chosen based on its wide application in industry. The plants to be controlled were studied, and so were the modeling, identification and control techniques.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO 9

1.1	Controle de Processos e Automação	9
1.2	Objetivo	10
1.3	Estrutura do Texto	11

Capítulo 2 - REVISÃO DE LITERATURA 12

2.1	Processo a ser controlado	12
2.2	Identificação de Processos Térmicos.....	13
2.3	Controle e supervisão de processos	14
2.3.1	Controlador PID	14
2.3.2	Termo Proporcional	16
2.3.3	Termo Integral	16
2.3.4	Termo derivativo	17
2.4	Ação do PID	17
2.5	Sintonia de PID.....	18
2.6	Controladores com realimentação de derivada.....	20
2.7	Considerações sobre sistemas Discretos.....	21

Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS 23

3.1	Metodologia de Trabalho.....	23
3.2	Materiais utilizados	23
3.2.1	O Controlador Lógico Programável MPC4004.06BF	24
3.2.2	Ferramenta de programação - A1 Automation Tools.....	25
3.2.3	A Interface Homem-Máquina (IHM)	25
3.2.4	Ferramenta de programação - HMI Design Tools.....	26
3.3	Plantas Industriais	27
3.3.1	Ferro de solda	27
3.3.2	Canhão Térmico	27

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1 Modelagem e Identificação das Plantas	29
4.1.1 Identificação ferro de solda	29
4.1.2 Identificação Canhão Térmico.....	30
4.2 A Interface Gráfica	30
4.3 Programação em <i>Ladder</i>	35
4.4 Simulação do Sistema.....	37
4.4.1 Simulação de controladores.....	37
4.5 Simulação do sistema com controlador PID	38
4.6 Simulação do sistema utilizando controlador Robusto	39
4.7 Implementação do Supervisório	42
4.7.1 Resultados Experimentais	42
Capítulo 5 - CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Resposta ao Degrau para plantas de 1 ^a ordem.....	12
Figura 2.1 - Método de Identificação da Reta Tangente.....	14
Figura 2.2 - Esquema Genérico de Malha de Controle	15
Figura 2.3 - Equação Controlador PID.....	15
Figura 2.4 - Diagrama de Blocos equivalente do controlador PID.	15
Figura 2.5 - Saída do Controlador com e sem termo integral.....	16
Figura 3.1 - Controlador Lógico Programável MPC4004.06BF.....	25
Figura 3.2 - IHM Série Arion.....	26
Figura 3.3 - Tela software IHM Design Tools.	26
Figura 3.4 – Planta térmica Ferro de Solda.	27
Figura 3.5 – Planta térmica canhão térmico.	28
Figura 4.1 - Identificação Ferro de Solda.....	29
Figura 4.2 - Identificação Ferro de Solda.....	30
Figura 4.3 - Tela de Inicialização.	31
Figura 4.4 - Tela de Início.	31
Figura 4.5 - Tela de Menu Principal.....	32
Figura 4.6 - Tela de Plantas.....	32
Figura 4.7 - Tela de Controladores.....	33
Figura 4.8 - Tela Controlador PID.	33
Figura 4.9 - Tela de Implementação de Controlador PID.	34
Figura 4.10 - Tela do Controlador Robusto.....	34
Figura 4.11 - Tela de Implementação de Controlador Robusto.	35
Figura 4.12 - Tela de Execução do Sistema.	35
Figura 4.13 - Diagrama de blocos Controlador Robusto.....	36
Figura 4.14 - Influência do ganho na resposta.	37
Figura 4.15 - Diagrama de blocos do sistema com controlador PID.....	38
Figura 4.16 - Simulação de Controlador PID - Ferro de Solda.	38
Figura 4.17 - Simulação de Controlador PID - Canhão Térmico.....	39
Figura 4.18 - Diagramas de blocos controlador Robusto.	40
Figura 4.19 - Simulação de Controlador Robusto - Ferro de Solda.	40
Figura 4.20 - Simulação Controlador Robusto - Canhão Térmico.....	41
Figura 4.21 - Diferentes pontos de operação - Ferro de Solda.....	41

Figura 4.22 - Bancada de Implementação.	42
Figura 4.23 - Execução do Controle PID através do supervisório.	43
Figura 4.24 - Forma de Onda Aquisitada pelo Supervisório.....	43
Figura 4.23 - Execução do Controle PID com Referência Variável.	44
Figura 4.25 - Controlador Robusto aplicado do Ferro de Solda.....	44
Figura 4.26 - Controlador Robusto aplicado do Canhão.	45

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Controle de Processos e Automação

Desde o início do desenvolvimento moderno, sentiu-se a crescente necessidade de se controlar de forma mais apurada os sistemas e processos na indústria. Inicialmente, durante o período de desenvolvimento após a revolução industrial utilizava-se o controle manual nos processos da indústria, que de forma geral atendia as necessidades da época. Porém, com a evolução da tecnologia e constante busca pelo aperfeiçoamento tecnológico que tal controle tornou-se ineficaz no sentido de que não se conseguiu aumentar a qualidade nem a produtividade dos processos. Assim, sentiu-se a necessidade de novas formas de controle, mais apuradas, específicas e automatizadas, reduzindo a interferência humana no processo a fim de se garantir maior confiabilidade, segurança, qualidade e produtividade dos processos (NATALE, F., 2004).

Com o advento e evolução da eletrônica analógico-digital possibilitou-se a criação de computadores dedicados com funções complexas, permitindo a implementação de controles automáticos a processos industriais. Assim, surgiu a automação industrial com a implantação de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) que visam à substituição de controles implementados em contatos elétricos físicos por lógicas programadas em softwares e implementadas pelo CLP (OLIVEIRA, J. C. P, 1990).

Atualmente, a utilização de CLPs na indústria abrange uma larga gama de setores e aplicações, tais como: sequenciamento e intertravamento de operações, controle de acionamentos e servo-posicionamento, controle de temperatura de processos químicos e físicos, etc. Processos como metalurgia, usinagem, produção de manufaturas, produção de bens de consumo duráveis e linhas de produção em geral utilizando controladores lógicos programáveis (OLIVEIRA, J. C. P, 1990).

Com o benefício do custo, qualidade e robustez a automação industrial cresceu e se desenvolveu oferecendo novos produtos e serviços mediante a necessidade da indústria.

Com o crescimento das indústrias, ramificação e interligação de serviços e processos industriais, notou-se a necessidade de supervisão destes processos de forma global e unificada por parte dos operadores, gerentes ou supervisores. Logo, criou-se a necessidade de interligação e comunicação destes processos (controlados pelo CLP) com o operador do sistema global. No entanto esta comunicação deveria ser rápida e eficiente para o operador, ou seja, a interface entre este e a máquina deveria ser amigável e eficaz para que se facilite a possível tomada de decisão a respeito de alterações necessárias nos processos. Nesse sentido criou-se a supervisão de processos que é definida pela monitoração e rastreamento das variáveis de um processo produtivo para facilitar a comunicação com o operador.

Os Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA do inglês Supervisory Control and Data Acquisition) atualmente incluem tecnologias de computação e comunicação possibilitando a apresentação dos dados através das interfaces homem-máquina (IHM) de forma gráfica e amigável.

A utilização de CLPs, IHM em supervisão de processos estão entre as tecnologias aplicadas à automação industrial visando aumento da qualidade da produção e redução dos custos operacionais caracterizando-se como um importante conhecimento para os engenheiros e técnicos responsáveis pelo setor produtivo (MORAES, C. C. & CASTRUCCI, 2001).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema supervisório para controle de processos industriais. Neste contexto, este sistema de automação será responsável por

supervisionar um processo térmico industrial, implementado em bancada de laboratório. No processo de implementação do sistema supervisório, será utilizado um CLP (Controlador Lógico Programável) e uma IHM (Interface Homem Máquina).

1.3 Estrutura do Texto

Após a introdução é feita uma revisão de literatura (Capítulo 2), citando os trabalhos mais relevantes acerca do tema abordado. Nesse capítulo é discutido o processo escolhido para implementação do sistema supervisório, bem como suas características principais e o processo de identificação utilizado. Também é abordado o método de controle utilizado (controlador PID), bem como seu método de sintonia e as considerações acerca da implementação discreta.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados para a implementação do sistema proposto juntamente com a metodologia abordada para realização do trabalho.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos, primeiramente os de simulação, depois os de implementação e a discussão e comparação destes.

Finalizando o trabalho são apresentadas as conclusões do mesmo considerando seus objetivos iniciais e avanços acadêmicos.

Capítulo 2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processo a ser controlado

Os processos térmicos são largamente utilizados na indústria atual, como em processos químicos, extrusão, etc. Tais processos, entretanto, apresentam características próprias que dificultam o seu controle. Devido às suas propriedades físicas, estes processos apresentam relativa lentidão em relação á outros processos comuns na indústria, como por exemplo, o acionamento de máquinas. Essa característica peculiar nesses processos pode ser modelada para que o controle seja determinado (ROOTS & SHRIDHAR, 1967).

As plantas térmicas possuem um atraso de transporte, o que significa que existe uma diferença considerável de tempo entre uma variação na variável controlada (MV) até a consequência na variável de processo (PV).

Outras duas características importantes das plantas térmicas são: o ganho estático (ganho real entre PV e MV) e a constante de tempo (relativa à taxa de variação da temperatura da planta).

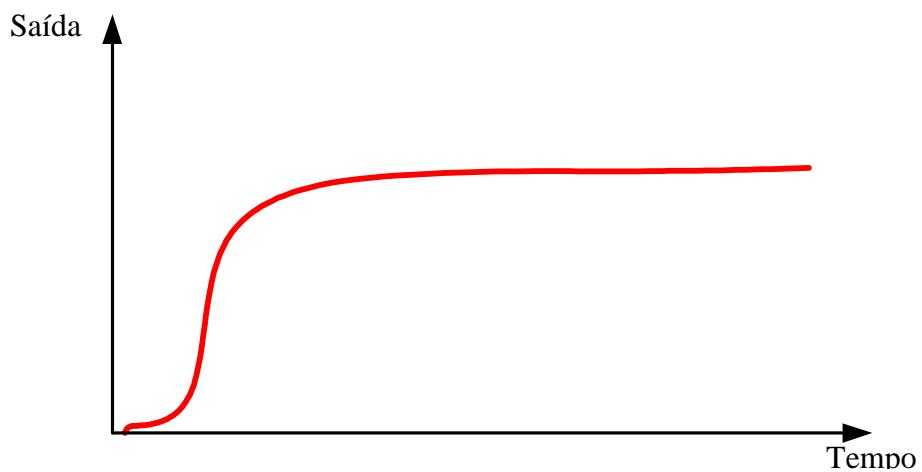


Figura 1.1 - Resposta ao Degrau para plantas de 1^a ordem.

Na figura 1.1 observa-se a resposta geral de plantas térmicas reais à entrada em degrau, em malha aberta.

2.2 Identificação de Processos Térmicos

Para a sintonia do controle dos processos é necessária a identificação da planta (ZIEGLER, J. B. & NICHOLS, 1942). Baseado nas características das plantas térmicas (resposta aproximadamente exponencial, atraso de transporte, ganho estático e constante de tempo) pode-se utilizar um modelo de primeira ordem em função de transferência (modelagem em freqüência no plano s), considerando o atraso de transporte.

$$G(s) = e^{-Ls} \times \frac{K}{Ts + 1}$$

Em que:

L: Atraso de transporte

T: Constante de Tempo

K: Ganho Estático

Assim, dado uma resposta a um degrau, é possível a identificação da planta através da aplicação do método da reta tangente (ZIEGLER, J. B. & NICHOLS, 1942). Com a resposta da planta no tempo traça-se uma reta tangente a curva no ponto de inflexão até esta reta atingir o mesmo valor da resposta da planta em regime. Dado o degrau conhecido determina-se o Ganho da planta por:

$$K = \frac{\text{Valor_regime} - \text{Valor_inicial}}{\text{Variação_degrau}}$$

O atraso da planta é igual à diferença de tempo entre a ação do degrau na entrada e o ponto em que a reta tangente toca o eixo das abscissas. A inclinação da reta traçada dos dá o valor da constante de tempo da planta.

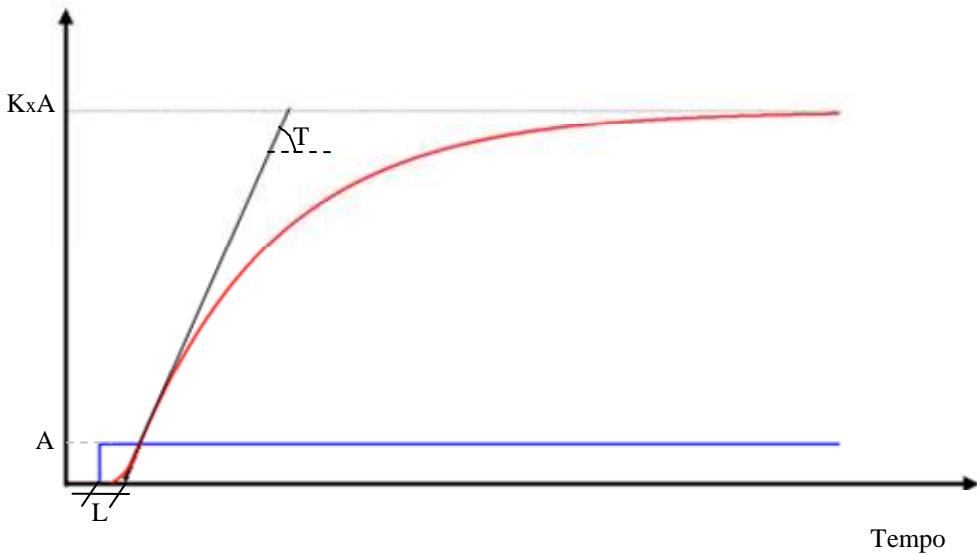


Figura 2.1 - Método de Identificação da Reta Tangente.

2.3 Controle e supervisão de processos

A automação industrial depende essencialmente dos sistemas de controle de processos para a manipulação de variáveis até a chegada no ponto desejado. Tais sistemas de controle atuam na regulação automática das plantas industriais nos sistemas de produção integrados.

Atualmente o controlador PID é amplamente utilizado na indústria para o fim de controle de processos devido a sua simplicidade e robustez.

2.3.1 Controlador PID

O controlador PID é um mecanismo de controle para sistemas realimentados, largamente utilizado na indústria. Este tipo de controlador atua sobre o erro entre a variável de processo e a referência desejada, no intuito de minimização desse erro.

Logo a atuação do PID consiste em manter a variável de processo próximo ao valor de referência desejado modificando a variável de controle enviada à planta através das ações proporcional, integral e derivativa aplicadas ao erro.

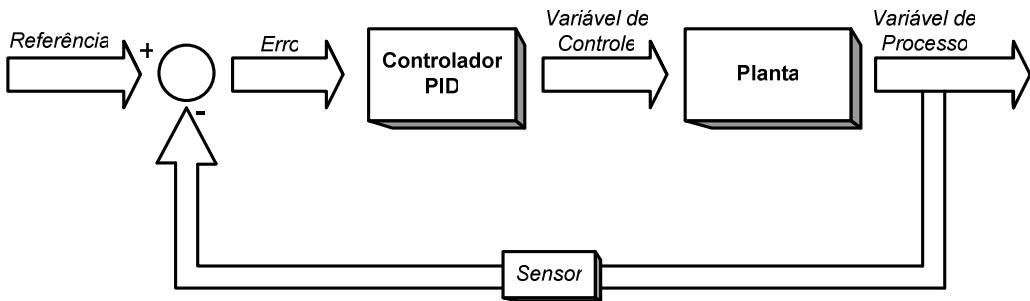


Figura 2.2 - Esquema Genérico de Malha de Controle

A equação geral do controlador PID é descrita pela soma dos termos proporcional, integral e derivativo que atuam sobre o erro entre a referência e a variável de processo da malha do sistema. A equação geral do controlador (considerando o controlador contínuo) é mostrada na figura 2.2.

$$-E(s) \rightarrow \left[K \left(1 + \frac{1}{Ti \times s} + Td \times s \right) \right] \rightarrow S(s)$$

Figura 2.3 - Equação Controlador PID.

A equação pode ser representar em um diagrama de blocos conforme a figura 2.3 mostrando a divisão do controlador e os três termos bem definidos.

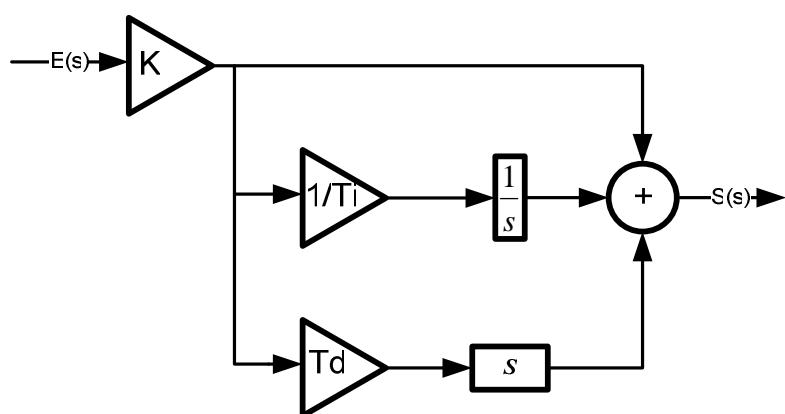


Figura 2.4 - Diagrama de Blocos equivalente do controlador PID.

2.3.2 Termo Proporcional

O termo proporcional do controlador (chamado também de ganho) altera a variável de controle de forma proporcional ao erro instantâneo corrente entre a variável de processo e a referência desejada.

Alterações na componente proporcional do controlador influem diretamente na ultrapassagem percentual, tempo de assentamento e erro de regime permanente. Deve-se notar que somente a ação proporcional diminui, porém, não garante erro nulo de regime permanente (OGATA, K. 1982).

2.3.3 Termo Integral

A ação integral está relacionada diretamente com o erro do processo e a duração desse erro no tempo. A variável de controle é afetada pela soma dos erros instantâneos passados, multiplicados pelo ganho integral ($1/T_i$). Esta ação tem por objetivo corrigir o erro de regime permanente, porém, também afeta o regime transitório elevando o *overshoot* e o tempo de assentamento (NISE, N. 2002).

Uma interpretação física para o tempo T_i seria a do tempo necessário para a ação integral equiparar a ação do termo proporcional.

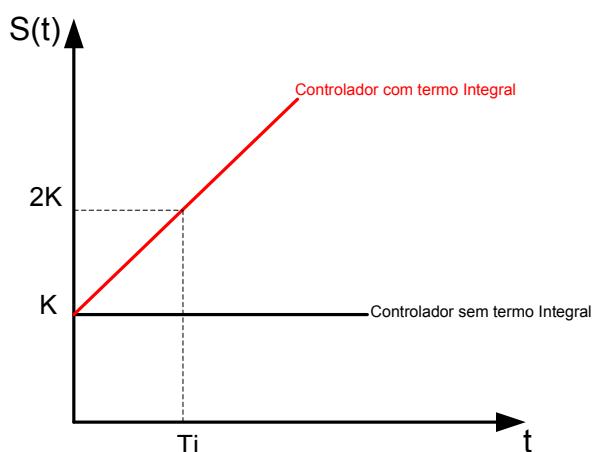


Figura 2.5 - Saída do Controlador com e sem termo integral.

Na modelagem em freqüência, a componente integral do controlador comprehende a adição de um pólo na origem, o que significa um aumento de ordem da função de transferência resultante, tornando nulo o erro de regime permanente para a entrada em degrau para sistemas de primeira e segunda ordem apenas; para outros sistemas nada se pode afirmar, entretanto, o termo integral sempre tende a diminuir o erro, desde que garantida a estabilidade da planta.

2.3.4 Termo derivativo

A ação do termo derivativo influí a variável de controle proporcionalmente à taxa de variação do erro do processo no tempo. Logo, calcula-se a inclinação instantânea do erro do processo e multiplica-se pelo ganho derivativo (T_d) e adiciona-se esse resultado a variável de controle. Assim o termo derivativo não influi no regime permanente (mediante a ausência de variação no erro), porém exerce grande influência no aspecto transitório do processo, possibilitando redução da ultrapassagem, por exemplo. É notório que esse aspecto é interessante considerando-se muitas vezes as limitações físicas das plantas. Na aplicação do termo derivativo é preciso ter cuidado com ruídos de alta freqüência, pois estes são amplificados. Uma solução comum é a implantação de um filtro passa baixa de primeira ordem no caminho direto do termo derivativo (OGATA, K. 1982).

2.4 Ação do PID

Como visto, dadas às características de uma resposta no tempo de uma planta e considerando as características dos termos do controlador pode-se observar que o termo proporcional atua no *overshoot* e no erro de regime permanente, porém nunca o anula. O termo integral atua de forma a anular o erro de regime, porém, distorce o regime transitório inserindo oscilações e aumentando o tempo de assentamento. E o termo derivativo atua no

sentido de alterar o overshoot e o tempo de assentamento, garantindo uma maior estabilidade ao sistema (NISE, N. 2002).

Somando-se as ações citadas, o controlador PID tem a possibilidade de atuar na variável de controle e assim levar a variável do processo a atender a referência de forma segura, rápida e sem erro.

A decisão de quais termos adicionar ou dar maior relevância em uma aplicação é chamada de sintonia de controlador PID. A sintonia do controlador se refere ao ajuste dos parâmetros K_p , T_i e T_d . Na literatura, em geral, são propostos diversos métodos, de soluções numérica ou experimental para este processo de sintonia. Tais métodos usualmente consideram a planta do processo, logo, mostra-se necessária a identificação correta da mesma.

A sintonia também depende dos parâmetros de desempenho desejados para a resposta do processo. Dentre eles especifica-se, principalmente, o *overshoot* máximo permitido, erro de regime admitido e tempo de estabelecimento aceito.

2.5 Sintonia de PID

Os controladores são determinados pelos parâmetros K_p , T_i e T_d . Tais parâmetros devem ser ajustados para atender os requisitos de desempenho de cada sistema específico. A esse ajuste dos parâmetros do controlador dá-se o nome de sintonia. Existem diversos métodos de sintonia de controladores PID, dentre e eles, os métodos baseados na resposta ao degrau e em identificação dos parâmetros do sistema, os principais são: Ziegler e Nichols (ZIEGLER; NICHOLS, 1942), Relé Realimentado (ÅSTRÖM; HÄNGLUND, 1995) e outros (CHEN, 1989). Existem ainda métodos heurísticos baseados na reação a variação dos parâmetros. Esses métodos supracitados devido a sua simplicidade e aplicabilidade são largamente utilizados na indústria.

O conhecido método de Ziegler-Nichols ainda é amplamente utilizado na sintonia de controladores industriais. Com a evolução dos processos e a inserção de computadores na execução dos sistemas de controle, o método ZN sofreu adaptações para sua aplicação em sistemas discretizados.

A modificação de Takahashi (TAKAHASHI; et al, 1971) ao método de Ziegler-Nichols, visa sua adaptação à sistemas discretizados no tempo, em que considera-se o efeito do tempo de amostragem do sistema no cálculo dos parâmetros do controlador. Assim, após identificação dos parâmetros da planta e dado um tempo de amostragem do sistema tem-se:

$$K_p = 1,2 \left(\frac{T}{R} \right) - \frac{0,3T \times t}{R_1^2}$$

$$Ti = K \frac{R_1^2}{0,6T}$$

$$Td = \frac{0,5T}{K}$$

Sendo t: Tempo de amostragem

$$R = L + T$$

$$R_1 = L + \frac{t}{2}$$

Assim, com procedimentos simples de sintonia os controladores PID são largamente utilizados na indústria e apresentam desempenho muito satisfatório para plantas modeladas em torno de um único ponto de operação.

Contudo, vale ressaltar que existem aplicações que demandam vários pontos de operação, seja pela necessidade de variação da referência ou mesmo pela dinâmica planta do processo. Assim, entra em questão a consideração a respeito da robustez da sintonia do

controlador do sistema, a fim de se assegurar confiabilidade ao sistema projetado. A linearização na identificação dos sistemas ou no método de sintonia prejudica a robustez do controle aumentando a sua sensibilidade às influências dinâmicas não modeladas do meio ou da própria planta. A aplicação de controle de plantas térmicas por vezes demanda esse tipo de característica de controle em seus sistemas. Logo, o estudo de controladores alternativos faz-se necessário quando existem particularidades no processo a ser controlado, como por exemplo, mudanças constantes de referências.

2.6 Controladores com realimentação de derivada

Os controladores PID apresentam-se como uma eficaz alternativa para controle de processos comuns na indústria, porém, ao operar-se em um sistema cuja dinâmica muda durante o processo, os controladores PID apresentam uma deficiência em adaptar-se a tais mudanças podendo causar desde prejuízos ao desempenho do processo até perda da estabilidade do sistema (Roots & Wu, 1967).

Para evitar tais situações os controladores PID necessitam de reajuste de seus parâmetros gerando custo operacional ao sistema, devido a tempo de ajuste, parada de processos ou tempo de processamento para cálculo dos novos parâmetros. Assim, para tais situações, observa-se a necessidade de emprego de controladores robustos que não diminuam o seu desempenho mediante alterações do processo a ser controlado.

Para a solução desse tipo de problema tem-se estudado e aplicado diversos teorias de controle moderno, juntamente com técnicas modelagem avançadas que consideram os parâmetros não-lineares das plantas. Porém, a implementação desse tipo de solução ainda encontra dificuldade de aplicação na indústria devido à complexidade dos algoritmos, o que acaba por gerar altos custos computacionais (ROOTS W. K. & SHRIDHAR, 1969).

Os controladores com realimentação de derivada apresentam-se como uma

alternativa a sistemas onde os controladores PID apresentam redução de desempenho, pois trabalham de forma a minimizar rapidamente as alterações ocorridas na saída da planta. Possuem algoritmo simplificado, podendo ser implementados em CLPs, como mostrado no capítulo de resultados.

Na implementação de controladores com realimentação de derivada utiliza-se o controle em cascata que consiste na utilização de pelo menos duas malhas de controle interligadas atuando em duas variáveis controladas, a fim de se modificar uma variável de processo. Este tipo de controle é indicado para a eliminação de perturbações externas. Para seu bom desempenho é necessário considerar no projeto dos controladores a necessidade que a malha de controle interno seja mais rápida que a de controle externo (MARLIN, 2000).

O controle em cascata com realimentação de derivada tem por característica a suavidade na resposta e diminuição da ultrapassagem máxima da referência, tendo aplicações para sistemas em que se deseja reduzir sensibilidade da resposta a mudanças de parâmetros, como a mudança de referência, por exemplo.

2.7 Considerações sobre sistemas Discretos

Em sistemas de controle digital um computador é responsável pela implementação da lei de controle da malha do processo. Os computadores processam somente sinais digitais, porém os processos industriais a serem controlados são analógicos. Logo, faz-se necessário a utilização de conversores analógico-digitais (ADs) para a leitura da variável do processo pelo computador. Após essa leitura o computador efetua a lei de controle e dispara a saída (a variável de controle) para o atuador da malha. Nesta etapa é necessária a conversão digital-analógica (através de conversores DAs). Estes conversores, na maioria dos processos industriais, trabalham de forma simples a amostrar um valor e reter esse

valor até a próxima amostragem, caracterizando assim um tempo de amostragem que influirá na planta equivalente do processo. Por essa característica aproximação do valor, estes conversores recebem o nome de extrapoladores de ordem zero em sua modelagem. Logo, quando se tem um processo amostrado com um tempo (T) é possível modelar através de amostradores e extrapoladores de ordem zero através da função de transferência $G_h(s)$ (NISE, N. S. 2002).

$$G_h(s) = \frac{(1 - e^{Ts})}{s}$$

Assim, é de grande importância que em processos industriais considere-se a amostragem do sistema para a configuração do sistema de controle, pois a característica discreta do sistema influí diretamente no projeto e sintonia de controladores.

Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia de Trabalho

A metodologia de trabalho adotada consistiu em estudo inicial do processo a ser controlado, com levantamento das características e modelagem da planta. Cumprida essa etapa iniciou-se o estudo da linguagem *ladder* genérica a ser utilizada para a programação do CLP. Iniciou-se então a especificação dos componentes dos sistemas (CLP, IHM, sensores, fontes). Definido esses componentes, iniciou-se o aprendizado das ferramentas de simulação e programação (softwares) dos fabricantes desses produtos.

Após esta etapa de aprendizagem e especificação, iniciou-se a programação nos softwares específicos para simulação do sistema a ser implementado. Após a realização da simulação iniciou-se o processo de implementação realizado, basicamente, em três etapas:

- 1) Implementação, execução do código *ladder* no CLP supervisionando as variáveis através de computador.
- 2) Implementação, execução do programa gráfico na IHM, supervisionando as funções através de computador.
- 3) Execução do programa em *ladder* no CLP com supervisão das variáveis através da IHM.

Em todas as etapas serão observados e analisados os resultados parciais para correção de possíveis erros e posterior evolução do trabalho.

3.2 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento do presente trabalho utilizou-se de:

- Bancada de Montagem
- Um CLP modelo: MPC4004.06BF - ATOS/Scheneider

- Uma fonte de alimentação 85-265Vac/24Vcc 1ª – ATOS /Scheneider
- Uma expansão Termopar modelo: 4004.66j - ATOS /Scheneider
- Uma IHM modelo: Arion 2700.03 touchscreen - ATOS/Scheneider
- Cabos e terminais tipo tubo de 1,5 mm para ligação.
- Cabo conversor USB - Serial
- Cabo conversor RS232-Serial
- Cabo RS232- RS232
- Cabo térmico isolado.
- Simulink – Matlab – Software de simulação de sistemas.
- Software A1 Automation Tools - Ferramenta de programação CLP
- Software HMI Desing Tools – Ferramenta de programação IHM
- Planta Térmica I – Ferro de solda 60 W 127 V
- Planta Térmica II – Canhão Térmico de Injetora.

3.2.1 O Controlador Lógico Programável MPC4004.06BF

O CLP escolhido possui um processador RISC de 32 bits de 400 MHz, memória FLASH de 2 Mbytes e 256 kbytes de memória RAM CMOS. O tempo de varredura reduzido é de apenas 0,4 ms/k instrução e linguagem de programação padronizada pela norma IEC61131-3. Este CLP incorpora uma família de produtos modulares, o que possibilita a expansão de módulos de entradas e saídas analógico ou digitais, fontes de alimentação e módulos de comunicação, possibilitando montagens específicas para diferentes aplicações.



Figura 3.1 - Controlador Lógico Programável MPC4004.06BF.

3.2.2 Ferramenta de programação - A1 Automation Tools

A ferramenta A1 Automation Tools foi utilizada para programação do CLP. Esta ferramenta possibilita a criação, documentação e manutenção das aplicações de controle. Também fornece os recursos de simulação (o código é executado no computador) e de supervisão, onde o CLP executa o código e as variáveis são monitoradas (com possibilidade de alteração) pelo computador.

3.2.3 A Interface Homem-Máquina (IHM)

A interface homem-máquina tem tecnologia *touch-screen*, apresenta suporte gráfico colorido de 65.536 cores por tela e resolução de 400 x 240 pontos em um display de 6,5" wide screen.

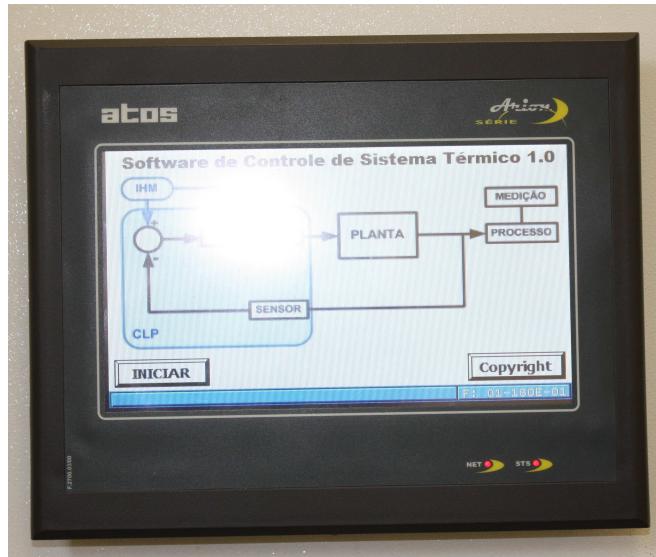


Figura 3.2 - IHM Série Arion.

3.2.4 Ferramenta de programação - HMI Design Tools

O aplicativo HMI Design Tools foi utilizado para a criação do conteúdo gráfico do sistema supervisório a ser executado na IHM. Possibilita a simulação do sistema em conjunto com o software A1 possibilitando a emulação da comunicação do CLP e da IHM.

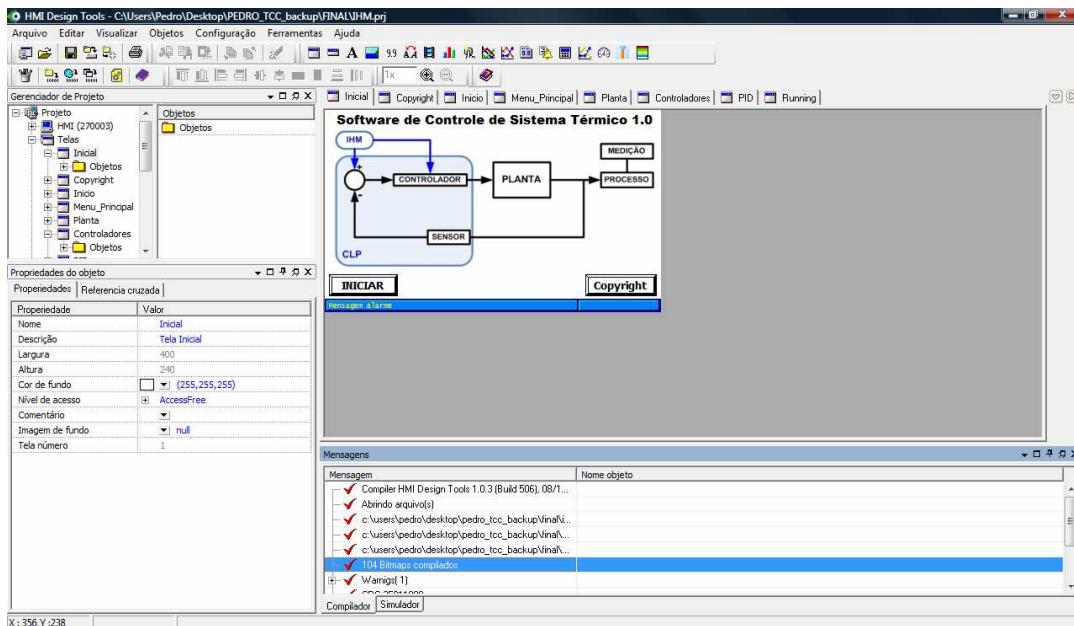


Figura 3.3 - Tela software IHM Design Tools.

3.3 Plantas Industriais

Para a implementação do sistema proposto utilizaram-se as seguintes plantas ferro de solda e canhão térmico de injetora de plástico, ambas plantas térmicas modeladas como sistemas de primeira ordem com atraso de transporte.

3.3.1 Ferro de solda

Planta térmica didática feita de material condutor de calor que eleva sua temperatura por efeito joule (aquecimento por passagem de corrente elétrica) e suas características são:

- Conexão elétrica em 127 Vac
- Potência de entrada: 60W
- Dimensões: 15 cm (comprimento)



Figura 3.4 – Planta térmica Ferro de Solda.

3.3.2 Canhão Térmico

Planta Térmica industrial utilizada no processo de extrusão e aquecimento de grandes massas de líquidos. Utiliza-se também do efeito joule para o aquecimento e suas características são dadas a seguir:

- Conexão elétrica em 220 Vac
- Potência de entrada: 1200 W
- Dimensões: 60 cm (comprimento)

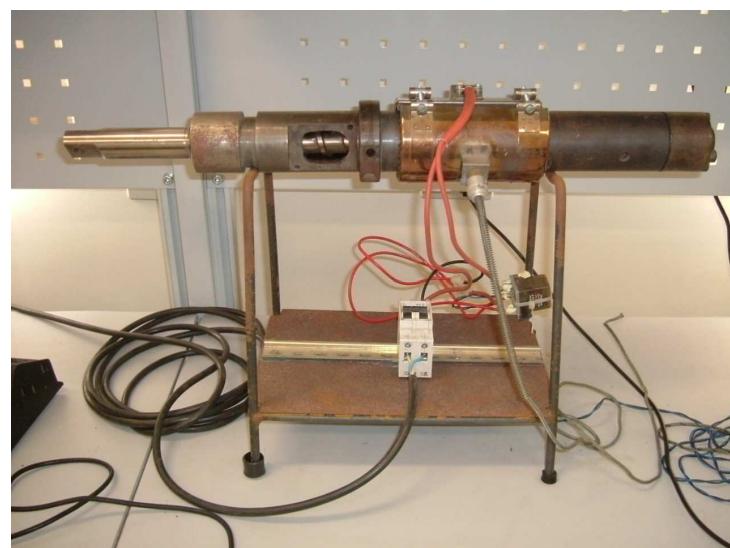


Figura 3.5 – Planta térmica canhão térmico.

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelagem e Identificação das Plantas

Inicialmente, ensaiaram-se as plantas a fim de obter o modelo das mesmas. Aplicou-se um degrau na entrada da planta e analisou-se a resposta da saída no tempo. Com o gráfico da resposta no tempo, traçou-se a reta tangente no ponto de inflexão, calculando-se o coeficiente angular dessa reta encontra-se a constante de tempo do sistema. O ganho estático pode ser encontrado pela razão entre o valor de regime e o degrau aplicado. O atraso de transporte pode ser determinado como a diferença de tempo entre a aplicação do degrau e o ponto que a reta tangente cruza o eixo do tempo. É notório que CLP possui um escalonamento da variável de controle e da variável de processo e que esse escalonamento altera o ganho visto pelo CLP, porém ao utilizar esse ganho equivalente, não há prejuízos para o controle projetado.

4.1.1 Identificação Ferro de Solda

Foi aplicado um degrau ao ferro de solda e realizado o processo de identificação através do método da reta tangente. Foram encontrados $L=10$ s, $\tau=190$ e $K=6,1$.

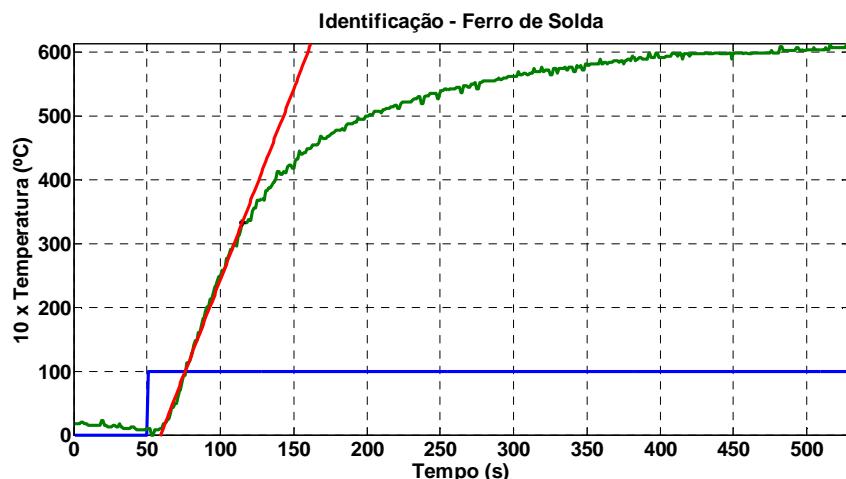


Figura 4.1 - Identificação Ferro de Solda.

4.1.2 Identificação Canhão Térmico

Foi aplicado um degrau equivalente a 100 °C ao canhão térmico e realizado o processo de identificação através do método da reta tangente. Foram encontrados L=120 s, $\tau=1913$ e $K=9,86$.

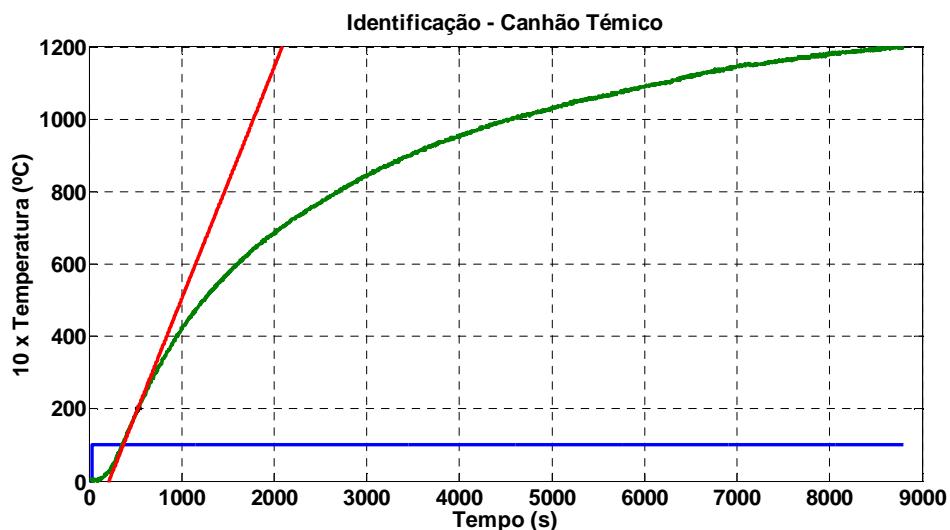


Figura 4.2 - Identificação Ferro de Solda.

4.2 A Interface Gráfica

O desenvolvimento de uma interface gráfica e amigável ao usuário é de extrema importância para a eficiência dos sistemas supervisórios. Neste trabalho a implementação dessa interface foi realizada através de uma IHM. Foi implementado um software com a estrutura mostrada a seguir. Cada bloco indica uma tela implementada na IHM

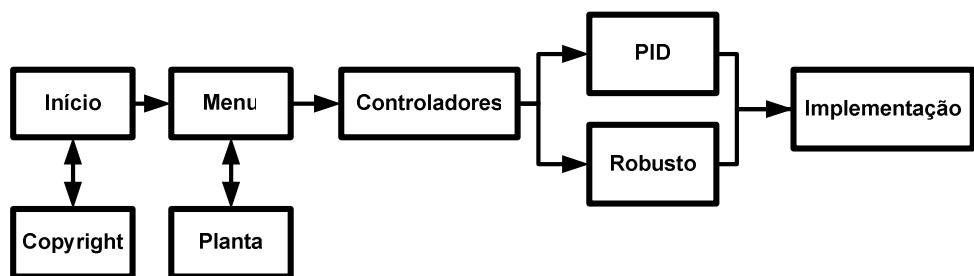


Figura 4.3 - Estrutura do software implementado na IHM.

Cada bloco indica uma tela implementada na IHM. A seguir são mostradas as telas desenvolvidas:

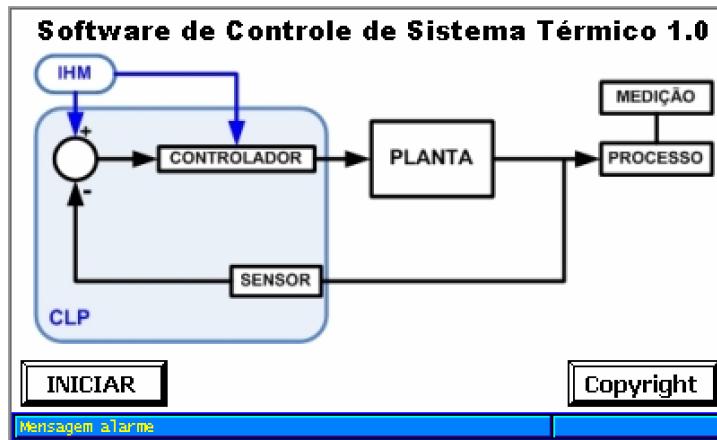


Figura 4.3 - Tela de Inicialização.

A figura 4.3 ilustra a tela de apresentação do supervisório desenvolvido. Nesta etapa apresenta-se uma ilustração geral do sistema e duas ações possíveis: visualizar a tela de direitos autorais (copyright) ou iniciar o programa supervisório.

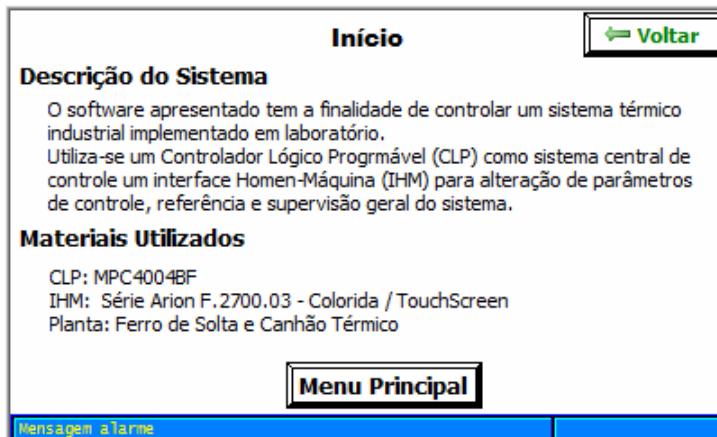


Figura 4.4 - Tela de Início.

Esta tela apresenta uma breve descrição do sistema indicando a sua funcionalidade e principais componentes.

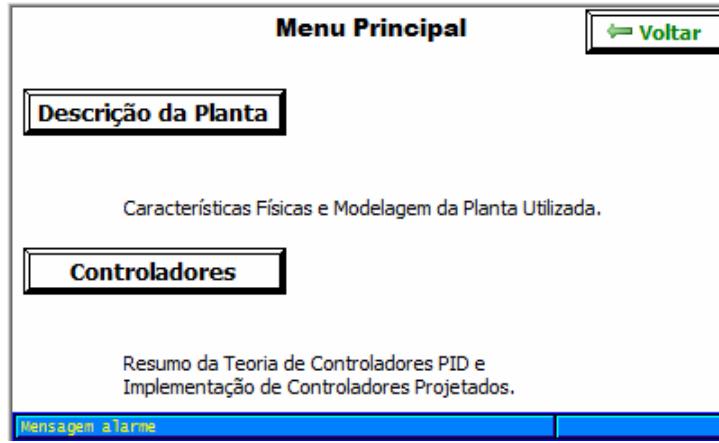


Figura 4.5 - Tela de Menu Principal.

Apresenta-se aqui a opção para o usuário de obter mais informações a respeito das plantas a serem controladas (descrição, modelagem e características) ou dos controles a serem implementados.

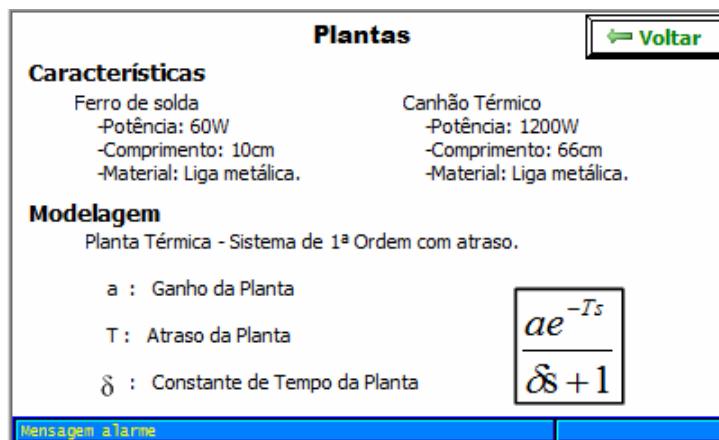


Figura 4.6 - Tela de Plantas.

Aqui são apresentadas as principais características das plantas (dimensionais e elétricas), bem como o seu modelo em função de transferência.

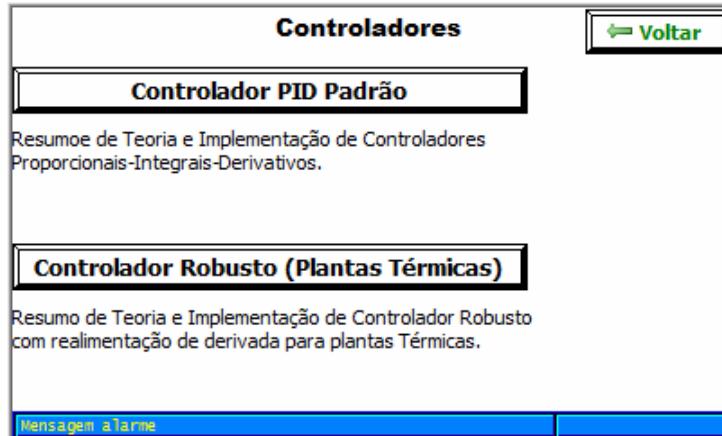


Figura 4.7 - Tela de Controladores.

No menu de controladores, o usuário tem a disponibilidade de escolha sobre a implementação dos dois tipos de controladores.

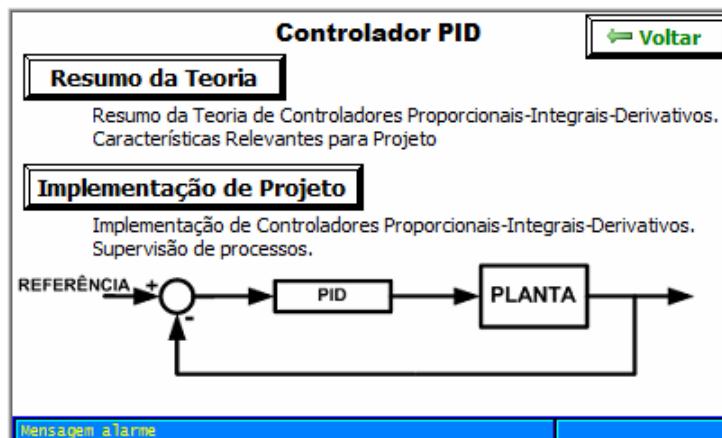


Figura 4.8 - Tela Controlador PID.

Na tela do controlador PID o usuário pode optar por consultar um resumo da teoria, contendo informações e características importantes a respeito deste tipo de controlador ou partir diretamente para o processo de início do sistema supervisório através da implementação do controlador PID.

PID - Implementação

Voltar

Forma Geral:

$$-E(s) \rightarrow K \left(1 + \frac{1}{Ti \times s} + Td \times s \right) \rightarrow S(s)$$

Projeto:

K = 000.0 **Temperatura atual: 000.0 °C**
Ti = 0000 **Referência de Temperatura: 000.0 °C**
Td = 000

Implementar

Mensagem alarme

Figura 4.9 - Tela de Implementação de Controlador PID.

Na tela de implementação são mostradas a equação geral (algoritmo ISA) do controlador, os parâmetros do controlador para sintonia e o campo de ajuste da referência de temperatura.

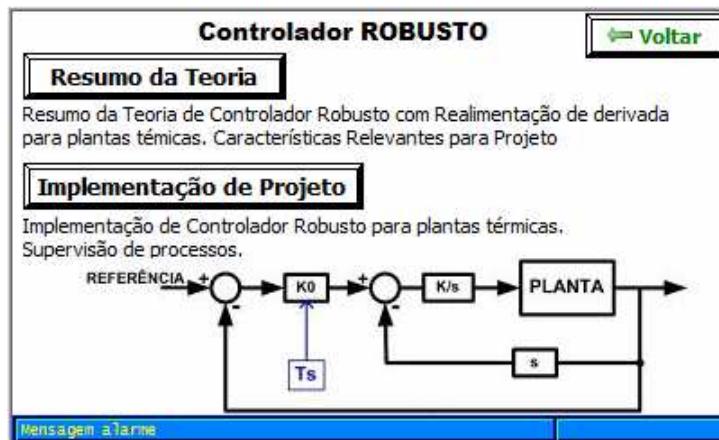


Figura 4.10 - Tela do Controlador Robusto.

Para as telas do controlador robusto também foram disponibilizadas opções semelhantes à do controlador PID. Possibilitando uma consulta com as características desse controlador e alteração de parâmetros de controle.

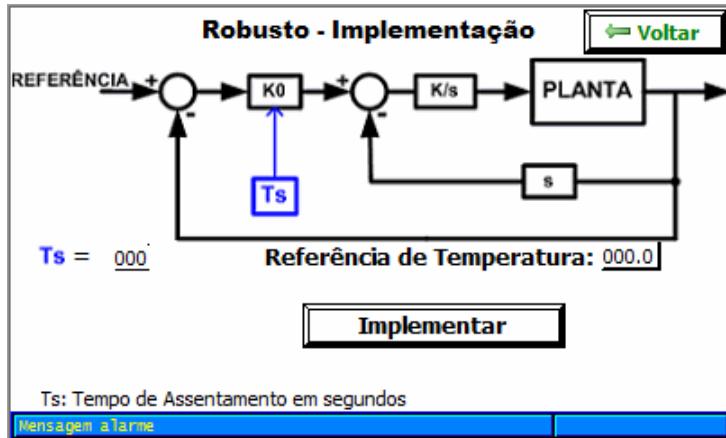


Figura 4.11 - Tela de Implementação de Controlador Robusto.

Em qualquer controlador ao se alterar os parâmetros e implementar o sistema, é mostrado para o usuário uma tela de execução do sistema onde este pode acompanhar o valor instantâneo da variável do processo (a temperatura), bem como a sua tendência no tempo e o seu valor de referência. Após o término do processo, o usuário pode finalizar a supervisão para observação dos parâmetros de qualidade.

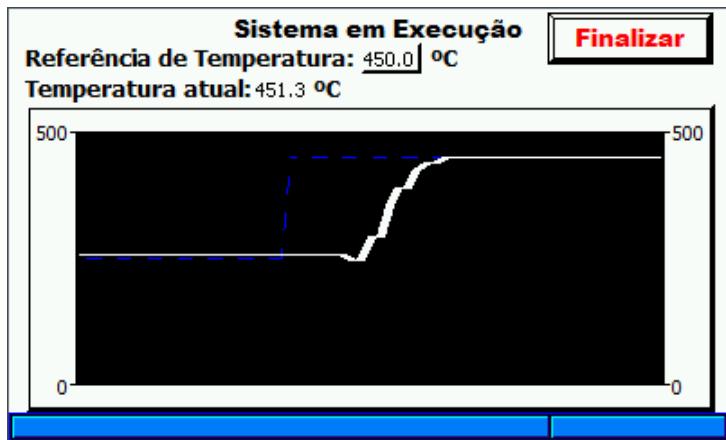


Figura 4.12 - Tela de Execução do Sistema.

4.3 Programação em *Ladder*

Para implementação da lógica do supervisório utilizou-se a programação em linguagem *ladder* implementada no CLP. O código é estruturado basicamente em três rotinas. Uma referente ao controle de interação com o usuário, em que são coletados os

dados enviados pelo usuário, através da IHM, para atender as especificações de operação do sistema, como por exemplo, controlador a ser utilizado.

A segunda rotina se refere à implementação dos controladores através dos blocos de algoritmo PID. Nessa rotina os blocos PID são conectados através de variáveis do programa a fim se implementar o controlador desejado.

A implementação do controlador PID é direta, ativando-se blocos funcionais de algoritmos PID, utilizados para implementação dos controladores propostos, respetivo bloco e atualizando-se PV e MV respectivamente, para temperatura real da planta e entrada da planta. No caso do controlador robusto, devido à necessidade de mais de um bloco PID para sua implementação, é preciso alterar-se virtualmente as variáveis de processo e controle, com a inserção de variáveis auxiliares conforme mostra a figura 4.13.

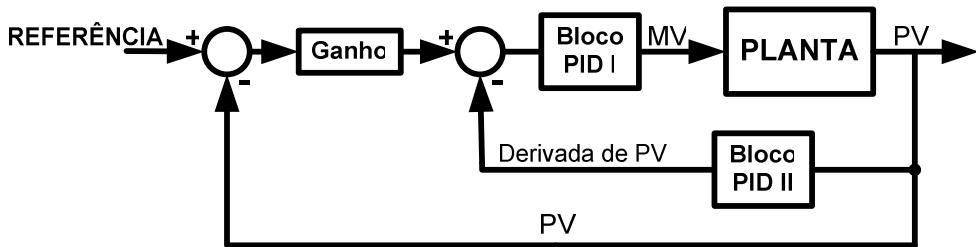


Figura 4.13 - Diagrama de blocos Controlador Robusto.

Assim, a temperatura mantém-se como a variável de processo da malha externa, porém, na malha interna realimenta a derivada da temperatura, adicionando-se uma variável de controle (derivada de PV) do bloco PID II.

A terceira rotina destina-se ao processo de atualização do gráfico quando o supervisório está em execução. As variáveis são aquisitadas da rotina 2, escalonadas e então enviadas para a IHM para serem plotadas.

Dado esse sistema de controle, temos que o bloco PID I constitui-se unicamente de um ganho com um integrador puro, a fim de estabilizar a malha interna unicamente. O tempo de assentamento é dado pelo ganho da malha externa, que ganho atua no sentido de

diminuir o tempo de assentamento do sistema. Porém, para o aumento demasiado desse ganho, o sistema apresenta oscilações podendo até perder a sua estabilidade como mostrado na figura 4.14.

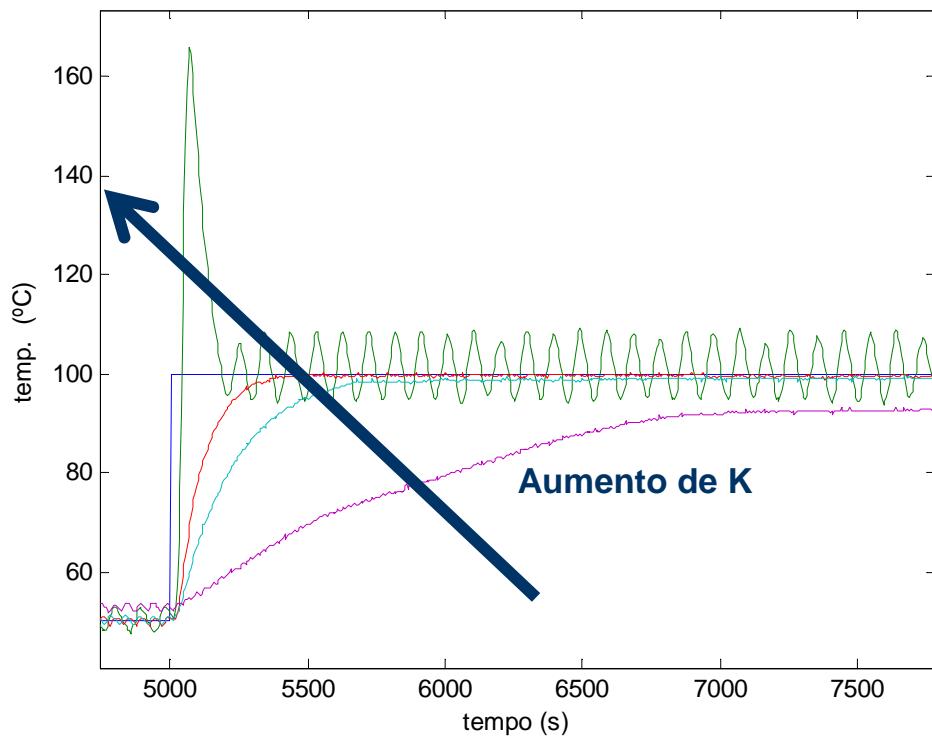


Figura 4.14 - Influência do ganho na resposta.

4.4 Simulação do Sistema.

O sistema foi simulado de duas formas. A primeira realizada no software Simulink®, onde foi criado um modelo do algoritmo PID do CLP para testes a respeito de sintonias realizadas para observação de possíveis ajustes necessários. A segunda tratava a respeito de testar o código *ladder* do CLP, bem como sua comunicação com a IHM.

4.4.1 Simulação de controladores

A figura 4.15 mostra o diagrama de blocos desenvolvido para simulação dos controladores projetados. Nota-se que além do controlador PID subdividido nos termos (proporcional, integral e derivativo) têm-se também blocos referentes ao escalonamento da

saída (segundo modelo do PID), o tempo morto (faixa de não atuação do controlador) e extrapoladores de ordem zero para simular o tempo de amostragem do sistema.

4.5 Simulação do sistema com controlador PID

Utilizou-se o modelo proposto esquematizado na figura 4.15 para as duas plantas identificadas. Ajustou-se a referência dentro da faixa de abrangência de temperatura da planta e verificou-se o desempenho do controlador. Observe que o sistema opera adequadamente para o degrau de identificação.

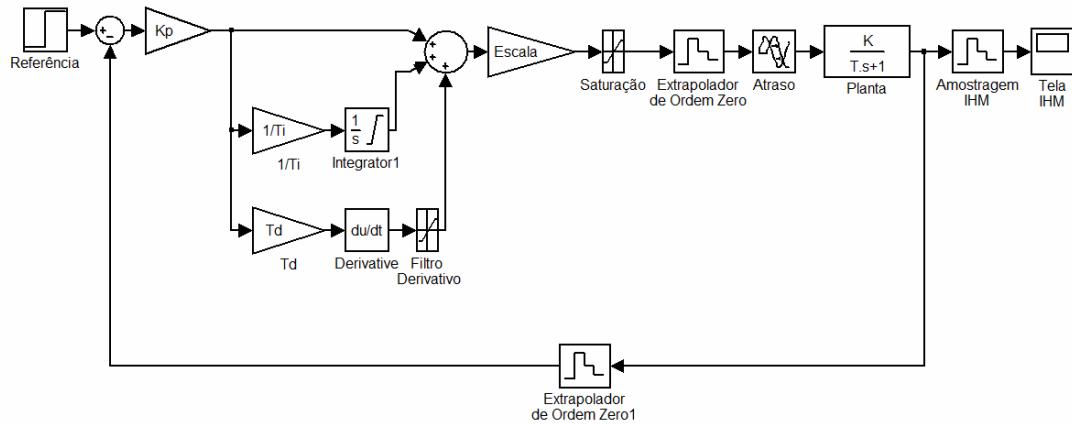


Figura 4.15 - Diagrama de blocos do sistema com controlador PID.

Inicialmente, com a planta em regime aplicou-se um degrau na referência.

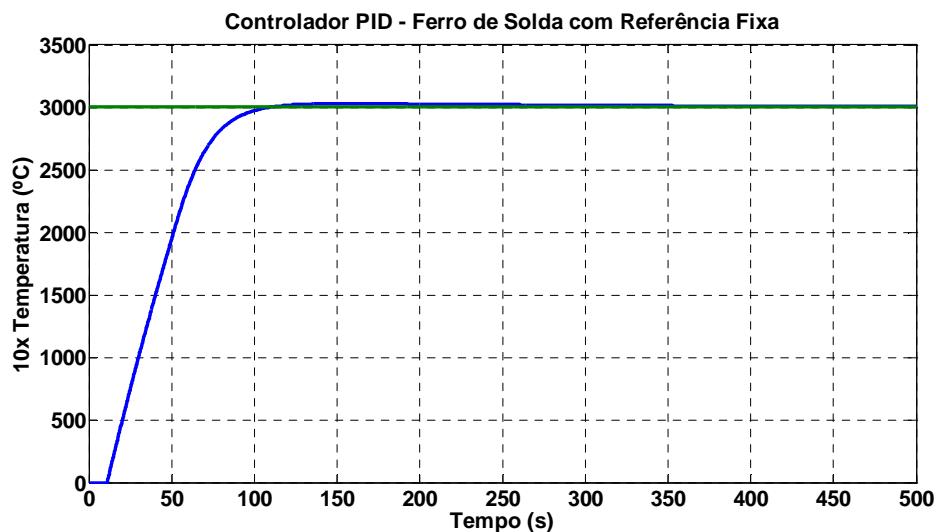


Figura 4.16 - Simulação de Controlador PID - Ferro de Solda.

Pode-se observar o bom desempenho do controlador para a resposta ao degrau, obtendo um tempo de assentamento de aproximadamente 100 segundos, sem ultrapassagem relevante da referência e erro de regime nulo.

Para a planta canhão térmico também se realizou o mesmo procedimento de simulação. Os resultados são mostrados na figura 4.17

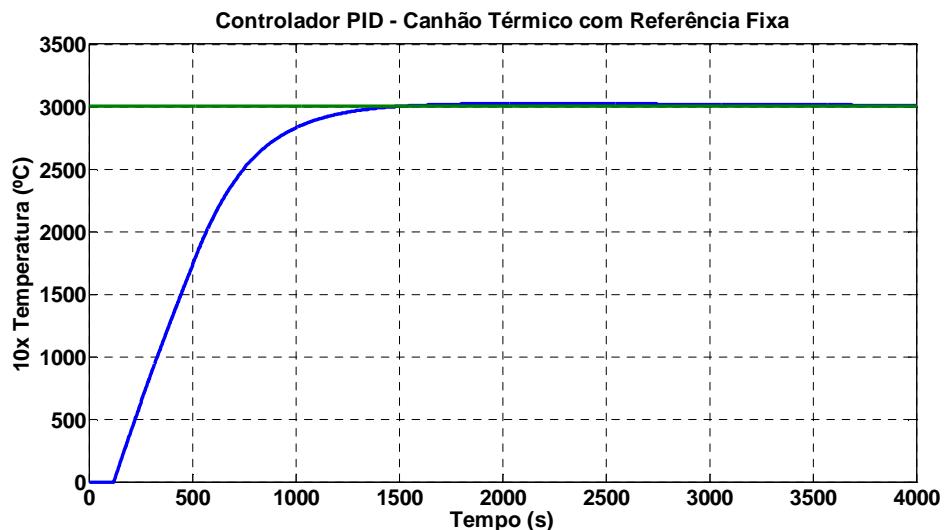


Figura 4.17 - Simulação de Controlador PID - Canhão Térmico.

Com a nova sintonia do controlador PID, devido à mudança na planta, observa-se que também a obtenção de uma resposta satisfatória, sem ultrapassagem relevante da referência, tempo de assentamento (condizente com a dinâmica da planta) e erro de regime nulo.

4.6 Simulação do sistema utilizando controlador Robusto

Para a simulação do controlador robusto utilizou-se o esquema mostrado em figura 4.18, executado para o modelo da planta do ferro de solda e depois para a o canhão térmico, modificando-se unicamente o ganho externo referente ao tempo de assentamento.

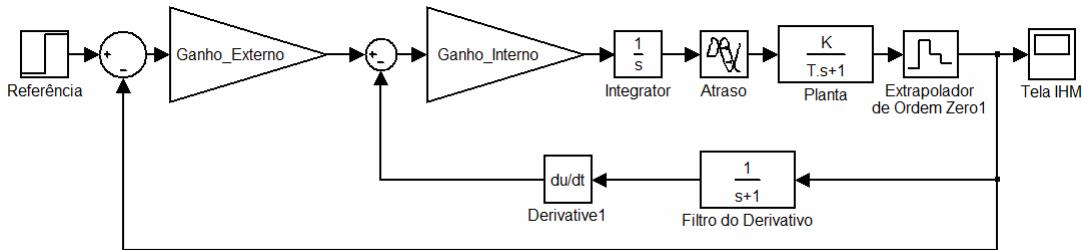


Figura 4.18 - Diagramas de blocos controlador Robusto.

Inicialmente, com as plantas em regime, variou-se a referência em um degrau de temperatura semelhante ao aplicado com o controlador PID. Observa-se que foi possível assentar o processo em um tempo menos.

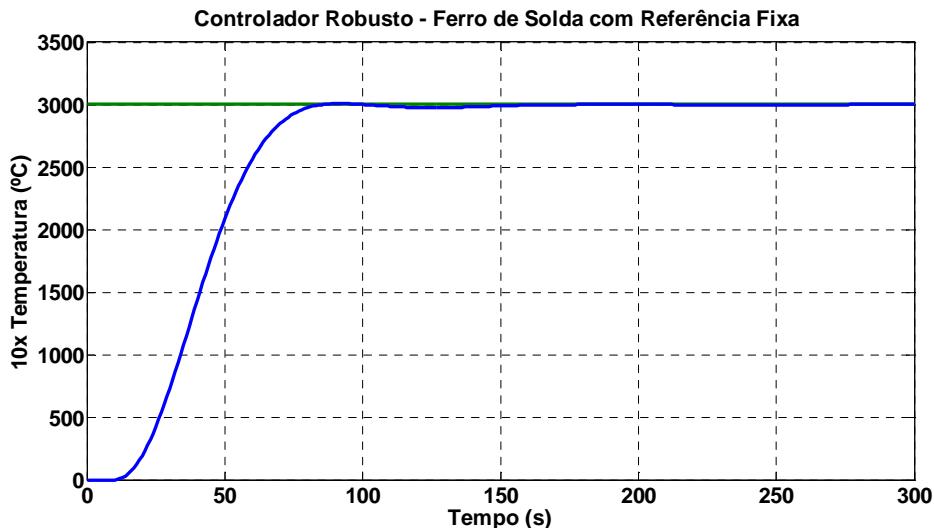


Figura 4.19 - Simulação de Controlador Robusto - Ferro de Solda.

Para verificação da robustez do controlador alternativo, simulou-se a substituição da planta no processo de temperatura. Note que foi alterado o valor de tempo de assentamento, pois o canhão térmico possui uma constante de tempo muito superior ao ferro de solda.

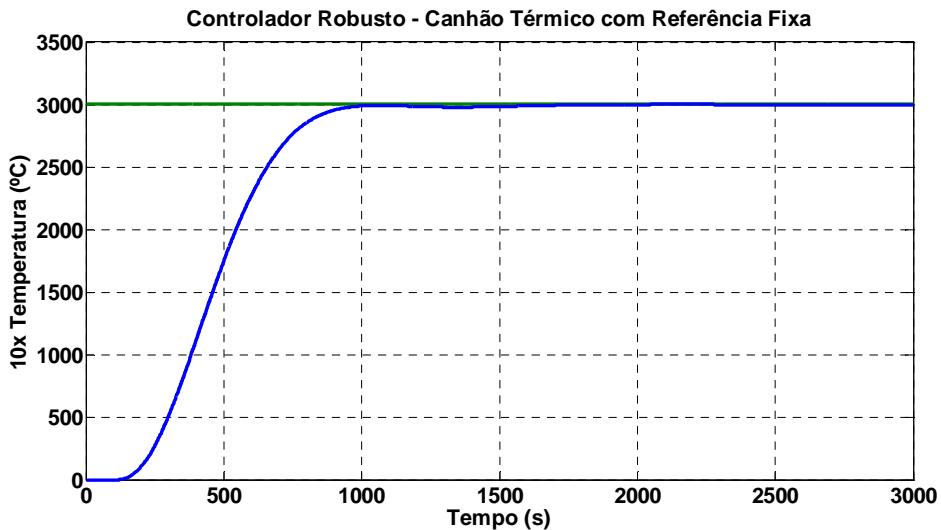


Figura 4.20 - Simulação Controlador Robusto - Canhão Térmico.

Observa-se que o controle desempenhou bom papel, pois estabilizou os sistemas com o tempo de assentamento desejado sem ultrapassagem da referência.

Para o controle robusto também se variou a referência em degraus fixo para análise desde em diferentes pontos de operação da planta ferro de solda.

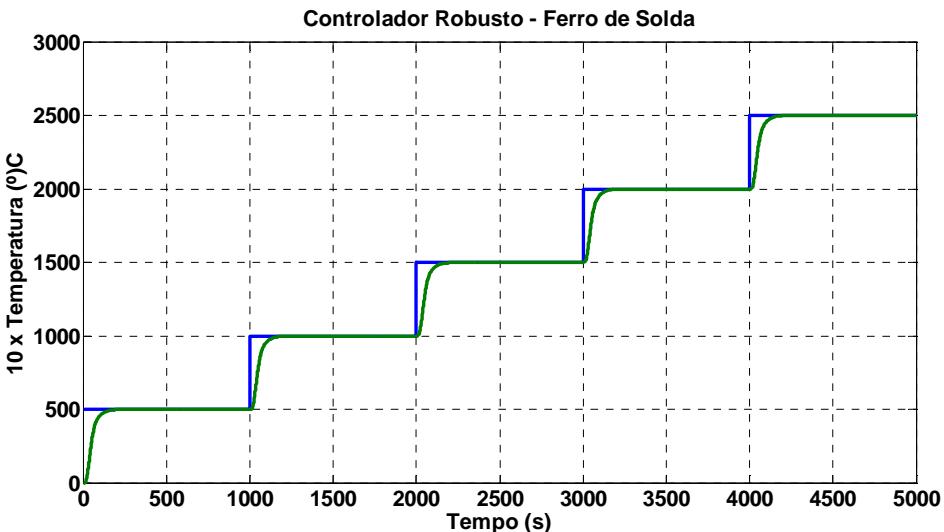


Figura 4.21 - Diferentes pontos de operação - Ferro de Solda.

Observa-se o bom desempenho do controlador para as diferentes condições de operação da planta, mostrando-se a robustez de sua aplicação.

4.7 Implementação do Supervisório

Realizada as etapas de simulação o sistema proposto foi implementado com a montagem em bancada. Executando-se o código no CLP e alterando-se os parâmetros de controle pela IHM o executou-se, sistema para controle das plantas. Foram realizados testes com os mesmos parâmetros de simulação para avaliação do sistema e modelos propostos.



Figura 4.22 - Bancada de Implementação.

4.7.1 Resultados Experimentais

O sistema desenvolvido foi testado nas mesmas condições de operação da simulação realizada. Inicialmente utilizou-se o supervisório desenvolvido no modo controlador com $K_p=10$, $T_i=60$ e $T_d=5$. Os resultados são mostrados na figura 4.23.

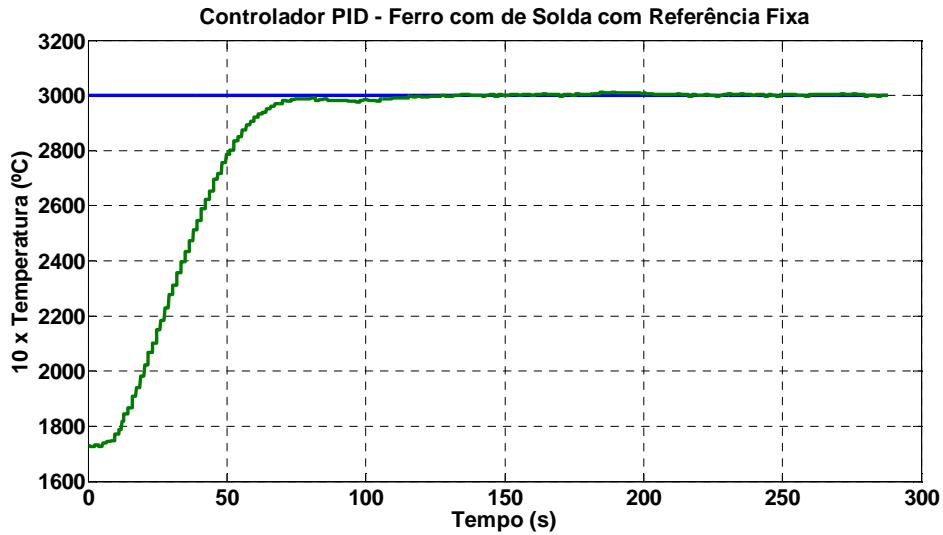


Figura 4.23 - Execução do Controle PID através do supervisório.

Nota-se que o sistema se comportou de forma prevista na simulação atendendo aos critérios de ultrapassagem igual a zero e tempo de assentamento semelhante ao de simulação.

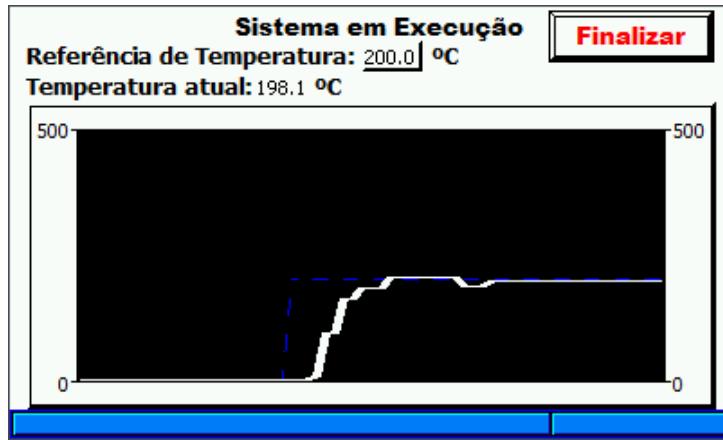


Figura 4.24 - Forma de Onda Aquisitada pelo Supervisório.

Observa o bom desempenho do sistema, semelhante aos resultados simulados em computador. A semelhança entre as respostas atesta a qualidade do modelo e bom desempenho do sistema implementado. Para análise do comportamento do controlador PID com variação de pontos de operação utilizou-se o mesmo modelo de planta encontrado para uma resposta de degrau e aplicaram-se vários valores de referência, vide Figura 4.25. Observa-se que a resposta do sistema não é satisfatória, pois com a sintonia para um único

ponto de operação o controlador não atende as especificações de projeto conforme varia-se a referência do sistema.

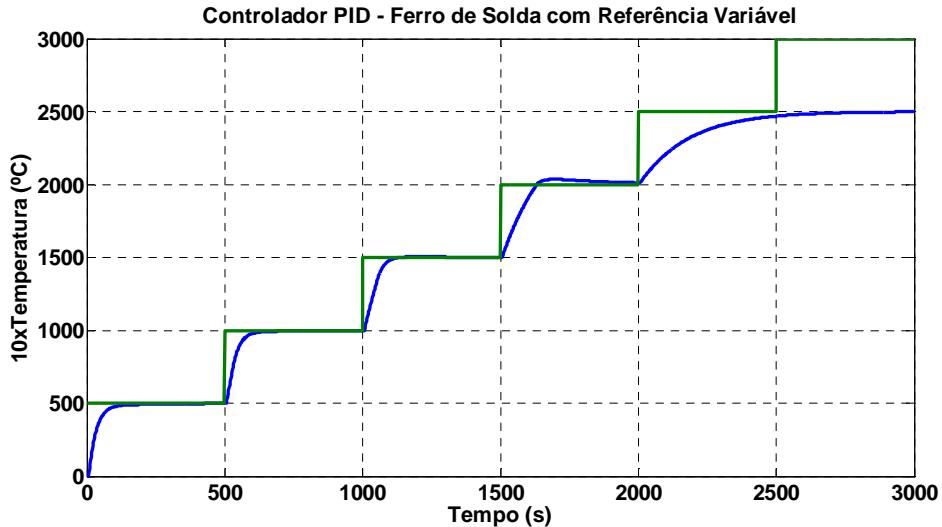


Figura 4.23 - Execução do Controle PID com Referência Variável.

Para a aplicação do controlador Robusto foi utilizado à variação de referência da planta utilizada, alterando-se somente o parâmetro de tempo de assentamento.

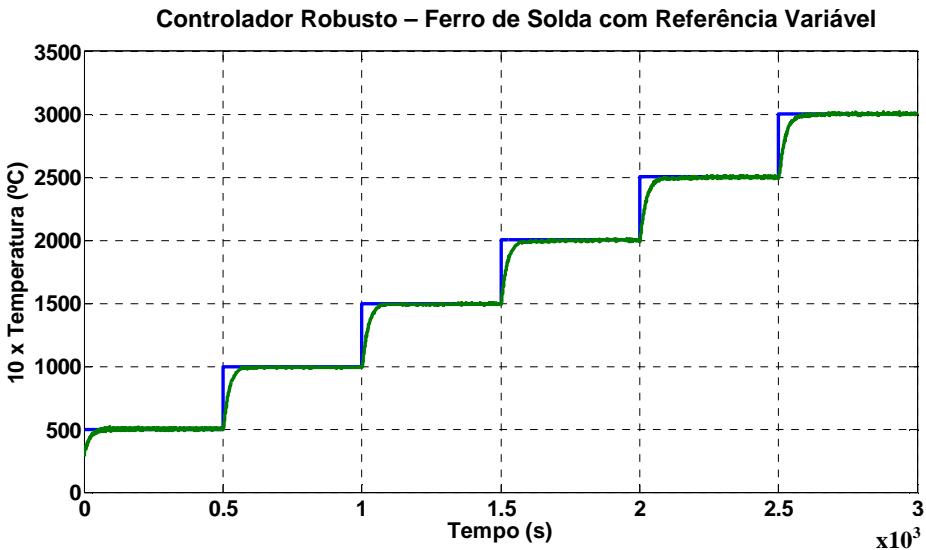


Figura 4.25 - Controlador Robusto aplicado ao Ferro de Solda.

Ajustou-se o tempo de assentamento do ferro de solda para 200 segundos. Obteve-se erro nulo em todos os casos. Comparando-se o controlador robusto com o controlador PID, observa-se a vantagem de aplicação do controlador robusto conforme varia-se os pontos de operação.

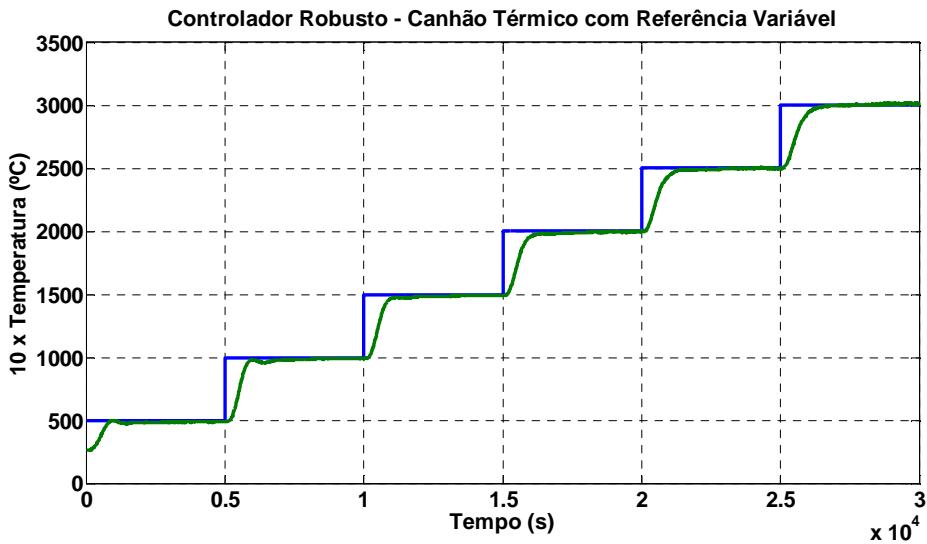


Figura 4.26 - Controlador Robusto aplicado do Canhão.

O canhão se comportou de forma estável zerando o erro em regime em todos os casos de variação de referência com tempo de assentamento esperado de 2000 s. O sistema mostrou-se estável na mudança de plantas, atuando de forma segura e eficaz.

Capítulo 5 - CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se a implementação de um sistema supervisório de controle de plantas térmicas industriais. Inicialmente, considerando-se o ponto de operação fixo, utilizou-se controle PID devido a sua simplicidade de implementação e vasta aplicabilidade na indústria. Utilizou-se simulação computacional, para verificação dos controladores projetados, bem como para testes da programação e comunicação dos dispositivos do sistema (CLP e IHM). Os resultados de simulação se mostraram promissores, atendendo a todos os requisitos de projeto. Com a posterior implementação em hardware observou-se o comportamento similar entre a simulação e os resultados experimentais.

O software implementado na IHM atendeu aos requisitos de simplicidade e objetividade necessários para facilitar a atuação do usuário no sistema.

Para implementação do controlador PID no CLP em questão, utilizou-se o bloco PID contendo um algoritmo padrão. Esta implementação se mostrou eficaz e satisfatória para aplicações da mesma planta com a referência fixa.

Para aplicações onde existe a necessidade de troca de planta ou variações constantes na referência de temperatura utilizou-se a implementação de um controlador robusto com realimentação de derivada. Nesta implementação utilizou-o blocos PID conectados através de variáveis digitais internas do CLP.

A implementação do controle robusto para plantas térmicas mostrou-se eficiente à medida que foram variadas as plantas, alterando-se somente o tempo de assentamento desejado. Alteraram-se ainda as referências de temperatura das plantas a fim de constatar-se a robustez do sistema.

Logo, o sistema implementado comportou-se de forma satisfatória, atendendo todos os objetivos propostos para sua implementação.

Deve-se destacar ainda o caráter educativo do sistema desenvolvido, pois este pode ser utilizado para fins de aprendizagem na área de controle e automação.

Atualmente, é notório o importante papel dos sistemas de automação para as indústrias. Neste trabalho o controle e monitoramento dos processos foram realizados através de sistema supervisório que possibilita ao operador alterar parâmetros de controle conforme sinta necessidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÅSTRÖM, K. J.; HÄNGLUND, T. 1988 Automatic Tuning of PID Controllers. NC. EUA: Instrument Society of America.

CAVALCANTI, F. A. 2008. Supervisório/IHM aplicado ao processo de uma coluna de destilação. Monografia - Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

CHEN, C. L. “A simple method for on-line identification and controller tuning.” AIChE Journal, 1989 v. 35, n. 12, p. 156–168,

MARLIN, T. E; 2000. Process Control. McGraw Hill International.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L; 2001. Engenharia de Automação Industrial. LTC.

NATALE, F; 2004. Automação Industrial. Editora Érica. São Paulo.

NISE, N. S.; 2002 Engenharia de Controle e Automação. LTC.

OGATA, K; 1982. Engenharia de controle moderno. Prentice Hall do Brasil.

OLIVEIRA, J. C. P.; 1990. Controlador Lógico Programável. Makron Books do Brasil.

ROOTS W. K.; SHRIDHAR, M. “Temperature-Control Strategies for Industrial Processes” IEEE Transactions on Industry and General Applications, 1969 pp.735-739.

ROOTS W. K.; WALKER, F. “Dynamic equilibrium cycling in discontinuously controlled electric process heating” IEEE Transactions on Industry and General Applications, 1967 pp.131-140.

ROOTS W. K.; WU CHENG-MENG. "Stability in Electric Process Heating", IEEE Transactions On Industry And General Applications. 1967. pp.421-425.

TAKAHASHI, Y.; CHAN, C. S.; AUSLANDER, D. M. "Parameterinstellung bei linearen ddc-algorithmen". 1971 Regelungstechnik un ProzeBtenverarbeitung, v. 19, p. 237–244,

ZIEGLER, J. B.; NICHOLS, N. B. "Optimum settings for automatic controls". ASME Transactions, 1942. v. 64, pp. 759–768.