

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Curso de Especialização em Engenharia de Instrumentação

**Implementação de Controle Proporcional, Integral e
Derivativo Digital em Controladores Lógico
Programáveis**

Wladimir de Andrade Guerra

Orientador: Prof. Edval J. P. Santos, PhD

Monografia apresentada ao Centro de
Tecnologia e Geociências da
Universidade Federal de Pernambuco
como parte dos requisitos para obtenção
do Certificado de Especialista em
Engenharia de Instrumentação

Recife, 2009

Resumo

Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis

Wladimir de Andrade Guerra

Janeiro/2009

Orientador: Prof. Edval J. P. Santos, PhD
Área de concentração: Eletrônica
Palavras-chaves: automação, PID, CLP

Nesta monografia é realizado um estudo sobre controlador proporcional, integral e derivativo (PID) digital em um Controlador Lógico Programável (CLP). O controle foi aplicado a um sistema de Tratamento de Óleo bruto para separação de óleo, gás e água.

Uma análise das conseqüências da digitalização da equação do PID foi realizada. Leva-se em conta situações práticas envolvendo riscos de segurança e desgaste das partes do sistema do Tratador de Óleo. O resultado desta análise resulta em três variações da equação do PID digital. Cada uma delas tem um comportamento distinto onde exigências do processo é que definem a mais adequada a ser aplicada.

Um algoritmo foi elaborado em LADDER para um CLP da *Allen Bradley* utilizando o *software RSLogix5000* a fim de realizar a simulação das três variações da equação do PID digital utilizando blocos de instrução básicas. Para fins de comparação também foi elaborado um algoritmo utilizando um bloco PID pré-definido disponível no *software* de programação do controlador.

Para aplicar os algoritmos elaborados ao sistema do tratador de óleo o modelo foi aproximado por uma equação diferencial de segunda ordem.

Uma comparação entre as três equações e o bloco PID pré-definido aplicados ao modelo foi feita para determinar a melhor equação para o sistema em questão.

Conteúdo

1.	Introdução	1
1.1.	O Sistema	1
1.2.	Motivação	2
1.3.	Metodologia	3
2.	Tecnologias Disponíveis	4
2.1.	Controladores Lógicos Programáveis	4
2.2.	Termopar	8
2.3.	Queimador	11
2.4.	Considerações Finais	11
3.	Malha de controle Proporcional, Integral e Derivativa	12
3.1.	Equação da Malha PID	12
3.2.	PID Digital	16
3.3.	Algoritmo PID	19
3.4.	Considerações Finais	25
4.	Aplicação do PID Digital ao Tratador de Óleo	26
4.1.	Modelo Matemático do Sistema	26
4.2.	Sintonia do PID	28
4.3.	Simulação e Resultados Obtidos	30
4.4.	Considerações Finais	33
5.	Conclusão	34
5.1.	Trabalhos Futuros	34
6.	Apêndice A	36
7.	Referências Bibliográficas	37

1. Introdução

Na indústria moderna, a automação dos processos fabris é fundamental para a manutenção ou aumento da competitividade no mercado, seja este local, nacional ou mesmo mundial. O objetivo, em geral, de uma automação é fabricar o mesmo insumo com maior eficiência. O resultado é a diminuição do desperdício, do consumo de energia e, em alguns casos, do impacto ambiental. Automação objetivando a segurança dos colaboradores também é comum, resultando em diminuição de custos para a empresa tanto no tangível -- encargos trabalhistas -- quanto no intangível -- perda de mão-de-obra especializada em caso de acidente.

Existem diferentes graus de automação e diversos tipos de sistema de controle. Pode-se ter desde um controle simples de posicionamento e enchimento de um refil como uma garrafa de refrigerante a um controle sofisticado de temperatura e vazão de uma coluna de destilação multifásica[1].

Diversas técnicas de controle podem ser empregadas num sistema, mas a mais usada é a do controle proporcional, integral e derivativo (PID). Esta é uma técnica de controle clássica que se aplica apenas a sistemas com uma entrada e uma saída (*Single Input Single Output* - SISO). Sua popularidade deve ao fato de ser simples de ajustar e ter, no mercado, uma grande variedade de ferramentas que possibilitam sua implementação de maneira fácil e prática. Um exemplo é que todo Controlador Lógico Programável (CLP), por mais simples que seja, possui o algoritmo PID pronto para ser usado. Existe até aqueles que possuem ferramentas de auto-ajuste do PID reduzindo ainda mais a necessidade de ter uma pessoa qualificada para ajustá-lo.

Este trabalho tem o objetivo de discutir e analisar a implementação do PID em um CLP e aplicá-lo a uma situação hipotética que condiz com a realidade. Considerando que o CLP nada mais é do que um computador mais robusto, ele só trabalha com valores numéricos discretos. Por outro lado a teoria do controle PID foi desenvolvida no domínio dos números reais, ou seja, no contínuo. Assim, será discutido também a discretização do PID e elaborado um algoritmo em LADDER para implementá-lo.

1.1. O Sistema

O sistema escolhido para aplicação do controle foi o de um Tratador de Óleo que é fundamental na indústria petrolífera.

No processo de extração de petróleo pelas Centrais Coletoras de Óleo sempre ocorre a mistura de fluidos imiscíveis (óleo e água). Dependendo do número de fluidos na mistura o escoamento pode ser chamado de bifásico, trifásico (óleo, gás e água) ou mesmo multifásico. O gás, ou está naturalmente livre no reservatório e será produzido com o óleo, ou resultará da mudança de fase das frações mais leves do óleo, quando este perde pressão ao escoar para a superfície. Em outras palavras sempre haverá a mistura óleo-gás na extração de petróleo.

A mistura dos fluidos é chamada emulsão e constitui-se de um sistema heterogêneo de dois ou mais líquidos imiscíveis com um deles disperso na forma de gotículas no outro. A segregação não pode ser feita em tanques de armazenamento convencionais. O Tratador de Óleo (ilustrado na figura 1), que é um subsistema da Central Coletora de Óleo, tem como principal função realizar a separação destes fluidos.

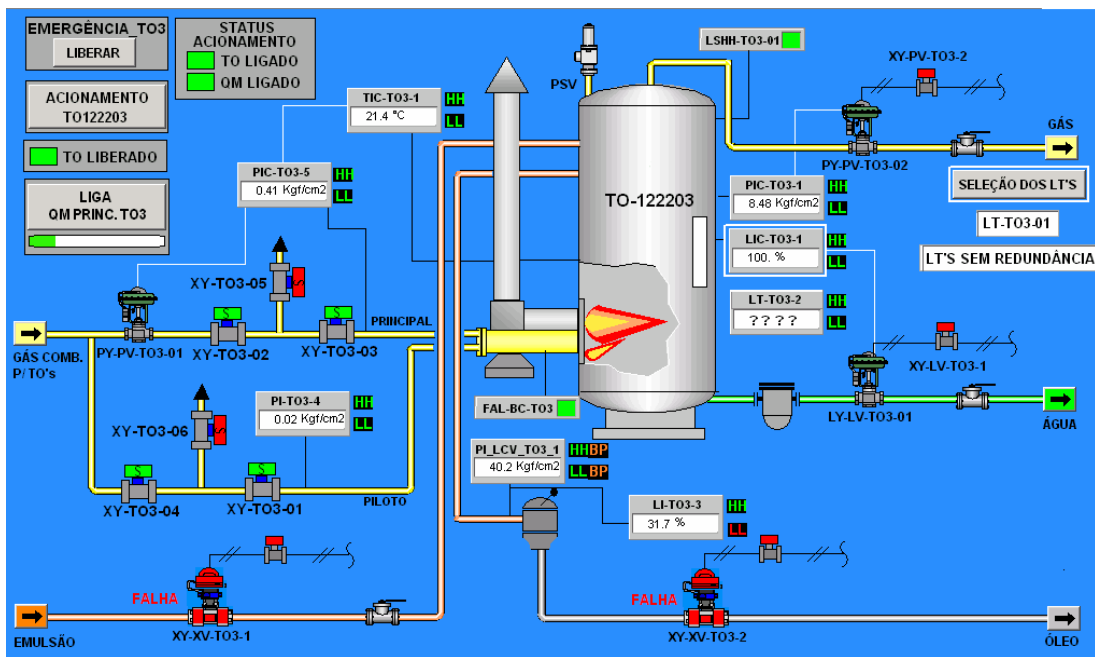


Figura 1 – Tratador de Óleo

1.2. Motivação

Diversas técnicas de controle podem ser empregadas num sistema, mas a mais usada e amplamente difundida é a do controle proporcional, integral e derivativo (PID). Esta é uma técnica de controle clássica que se aplica apenas a sistemas com uma entrada e uma saída (*Single Input Single Output- SISO*) ou a sistemas com mais de uma entrada e saída desde que este possa ser dividido em subsistemas SISO.

Sua popularidade se deve ao fato de ser simples de ajustar e ter, no mercado, uma grande variedade de ferramentas que possibilitam sua implementação de maneira fácil e prática. Um exemplo é que todo Controlador Lógico Programável (CLP), por mais simples que seja, possui o algoritmo PID pronto para ser usado. Existe até aqueles que possuem ferramentas de auto-ajuste reduzindo ainda mais a necessidade de ter uma pessoa qualificada para ajustá-lo.

Neste contexto e levando-se em conta que alguns CLP's não disponibilizam um bloco pré-definido para controle por malha PID este trabalho foi elaborado visando mostrar que é possível implementar um PID em qualquer CLP.

1.3. Metodologia

Duas formas de implementar o mesmo algoritmo são apresentadas neste trabalho. Uma delas é realizada utilizando um bloco de operação onde é possível escrever toda a equação do PID digital. A outra utiliza blocos de operações básicas como soma, multiplicação, subtração e divisão. Essas duas formas de implementação abrangem a maioria dos CLP's do mercado.

O algoritmo foi elaborado em LADDER baseado na equação do PID digital e obtido pela análise e discretização da equação do PID no contínuo realizadas neste trabalho.

2. Tecnologias Disponíveis

Neste capítulo serão descritos os dispositivos e equipamentos que compõem o sistema de controle.

O controle proposto para o Tratador de Óleo constitui-se de um Controlador Lógico Programável com um módulo de entrada e um módulo de saída analógico, um termopar para medir a temperatura do Tratador de Óleo e uma servo-válvula para controle da vazão do gás do queimador para aumentar ou diminuir a temperatura do Tratador de Óleo.

No caso do termopar é necessário um circuito de condicionamento para “interpretar” o sinal em milivolts da ponta de prova. Este circuito pode ser um conversor como o da figura 2 fabricado pela Telemecanique [5] que converte o sinal do termopar em um analógico padronizado de quatro a vinte miliampéres, ou um módulo acoplável ao CLP específico para termopares.



Figura 2 – Conversor comercial para termopares

2.1. Controladores Lógicos Programáveis

Os CLP's são microcomputadores de alta robustez desenvolvidos especialmente para controle de processos industriais. Possuem memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas controlando vários tipos de dispositivos.

Além de proporcionar flexibilidade e rapidez na modificação e ajuste de malhas de controle, sua capacidade de processamento lhe confere grande versatilidade. As vantagens vão desde melhorar a operacionabilidade através de IHM (Interface Homem

Máquina) ou terminais com Supervisório¹ a permitir acionamento remoto e a registrar eventos ocorridos no processo produtivo numa base de dados para futuras análises.

2.1.1 Estrutura do CLP

O CLP é uma máquina seqüencial programável. Para executar um programa, a máquina é dotada de circuitos eletrônicos digitais, e organizada de forma a interpretar e executar instruções, que são os elementos fundamentais de um programa.

Sua estrutura física é composta de CPU, barramento de dados, *buffer* de controle, memória de programa, memória de dados e I/O's.

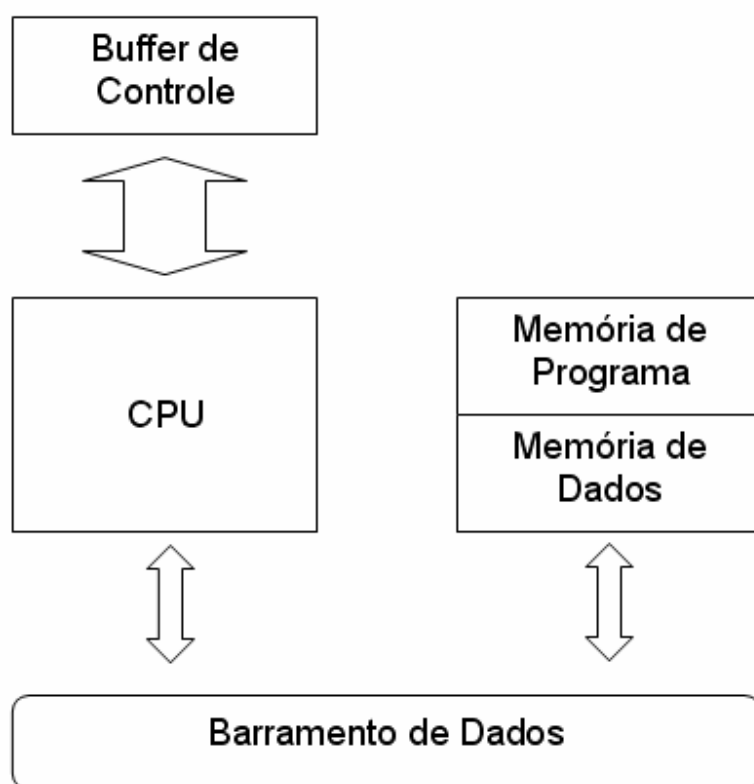


Figura 3 - Diagrama da Estrutura de um CLP

A CPU é responsável pela interpretação e execução de instruções. Ela é composta de vários circuitos funcionais, entre os quais se destaca: a Unidade Lógica e Aritmética (ALU), o barramento de dados, o *buffer* de controle e as portas de entrada/saída (I/O).

2.1.2 Princípio de Funcionamento

Basicamente o CLP possui dois modos: o modo RUN e o STOP. No primeiro

¹ Software geralmente instalado em um PC que funciona como interface gráfica entre homem e máquina.

modo todas as instruções previamente programadas são executadas enquanto que no segundo o CLP fica em estado de espera e, independentemente de qualquer estímulo em qualquer das entradas, nenhuma ação é tomada.

Como sua forma de operação é seqüencial ele apresenta um ciclo de funcionamento que se repete denominado ciclo de varredura ou *scan cycle*. Num ciclo, o CLP executa os procedimentos ilustrados resumidamente na figura 4.

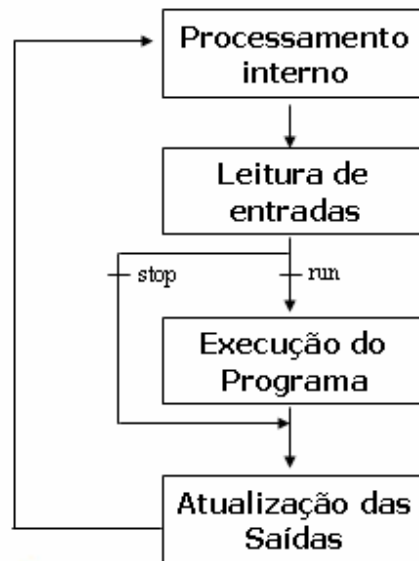


Figura 4 - Ciclo de varredura de um CLP

Quando o CLP está em modo *RUN* a lógica programada é executada e as saídas são atualizadas de acordo com o resultado da execução. Por outro lado quando o CLP está em modo *STOP* as saídas são atualizadas, mas permanecem inalteradas pois neste estado o programa é ignorado.

2.1.3 Entradas e Saídas

As entradas e saídas dos CLP's podem ser digitais ou analógicas. Estas são projetadas para trabalhar com padrões de tensão e corrente elétricas.

As entradas analógicas recebem sinais de sensores e transdutores que representam grandezas do processo. Deve-se dar atenção especial à conexão elétrica, bem como ao aterramento e blindagem de cabos, para evitar ruído eletromagnético. As entradas analógicas podem ser entradas de modo comum ou entradas de modo diferencial.

As entradas de modo comum são entradas que possuem uma conexão comum entre elas - normalmente o terminal negativo, comumente chamado de GND. Especial cuidado deve ser tomado com relação à circulação de corrente entre elas, o que poderia

corromper os sinais. Normalmente as placas analógicas exigem uma alimentação CC externa, como apresentado na Figura 5.

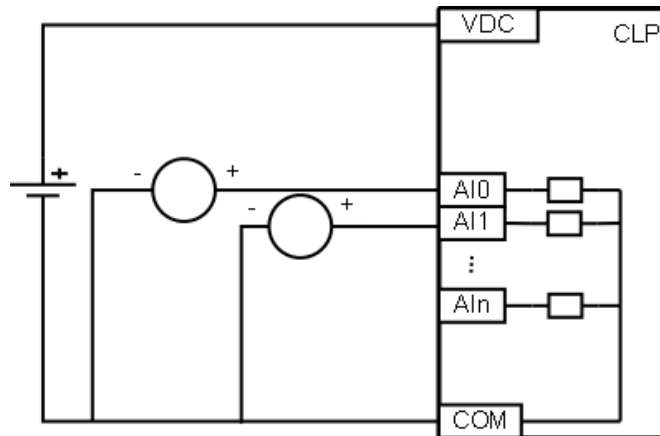


Figura 5 - Entrada analógica de modo comum

Por outro lado as entradas de modo diferencial são entradas isoladas entre si. Especial cuidado deve ser tomado com relação à especificação de máxima tensão de modo comum, que limita o valor da diferença de potencial entre elas. A Figura 6 representa uma ligação típica de placa de entrada analógica diferencial.

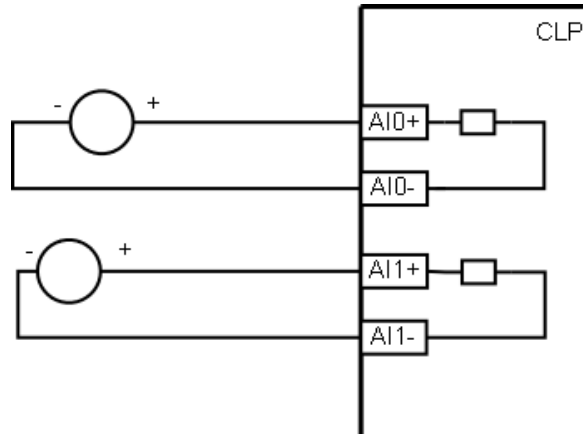


Figura 6 - Entrada analógica de modo diferencial

As saídas analógicas são normalmente em modo comum. Deve-se estar atento às especificações do fabricante, principalmente com relação à máxima carga admissível, para prevenir saturação do sinal. Na especificação da mesma deve-se ter o cuidado de verificar circulação de corrente entre saídas analógicas e o circuito ao qual a mesma será ligada, para prevenir curtos circuitos, o que poderia danificar os mesmos e/ou o CLP. Devem-se observar atentamente todas as recomendações do fabricante, tanto do CLP quanto dos equipamentos associados.

2.2. Termopar

Os termopares são transdutores que utilizam o Efeito de Seebeck para mensurar temperatura. Este efeito consiste no surgimento de uma diferença de potencial numa junção de dois metais que varia de acordo com a temperatura. É possível utilizar qualquer combinação de dois metais. A força eletro-motriz (fem) gerada por uma junção metálica, como a ilustrada na figura 7, é dada pela equação (1) – desde que o gradiente de temperatura nos condutores seja linear.

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T))dT \quad (1)$$

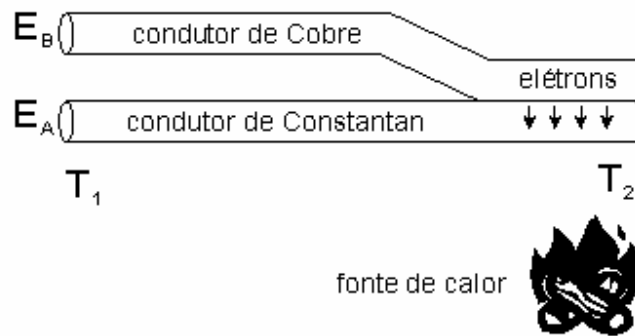


Figura 7 - Junção metálica de um termopar

Na maioria dos casos se utiliza combinações normalizadas, pois proporcionam tensões de saída previsíveis e suportam grande gama de escala de temperaturas. A escolha do tipo de junção pode ser feita analisando tabelas normalizadas que indicam a tensão produzida por cada tipo de termopar para todos os valores de temperatura que suporta. Todas as tabelas normalizadas dão os valores da tensão de saída do termopar considerando que a segunda junção do termopar (a junção fria ou de referência) é mantida a exatamente zero graus Celsius.

Para mensurar temperatura com um termopar não basta ligar um voltímetro ao termopar e registrar o valor da tensão produzida. A junção do fio de cobre com os metais da junção gera também uma diferença de potencial que varia com a temperatura como ilustra a figura 8. As tensões $e_{AC}(T)$ e $e_{BC}(T)$ introduzem um erro indesejado que varia com a temperatura.

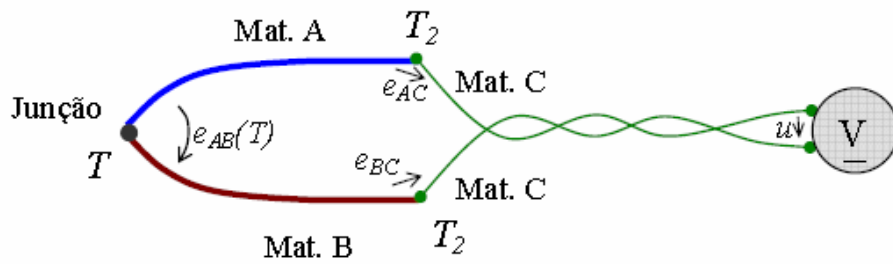


Figura 8 - Método incorreto de medição com termopar

A solução é utilizar uma configuração como ilustra a figura 9. A equação (2) da malha nos mostra que as tensões geradas pelas junções com o fio do circuito de condicionamento se anulam restando apenas as tensões das duas juntas.

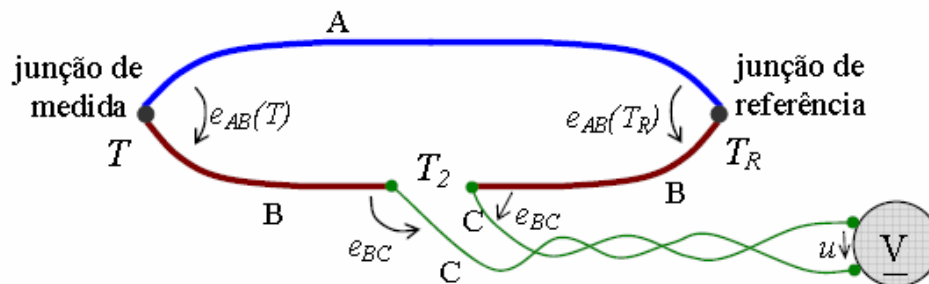


Figura 9 - Método correto de medição com termopar

$$u(T) = -e_{AB}(T) - e_{AB}(T_R) \quad (2)$$

Vale observar que a fem gerada depende apenas das temperaturas das junções e independe da forma como a temperatura se distribui pelos condutores desde que não haja corrente circulando pelos mesmos.

Na prática o instrumento de medida precisa estar afastado da junção de maneira que é necessário utilizar fios de extensão ou de compensação. Estes são fios que possuem mesma curva de tensão que a do termopar. O motivo de utilizá-los é que de outra forma o instrumento não teria acesso a temperatura da junção de referência como ilustra a figura 10, impossibilitando ao instrumento realizar a medida da fem da equação (2).

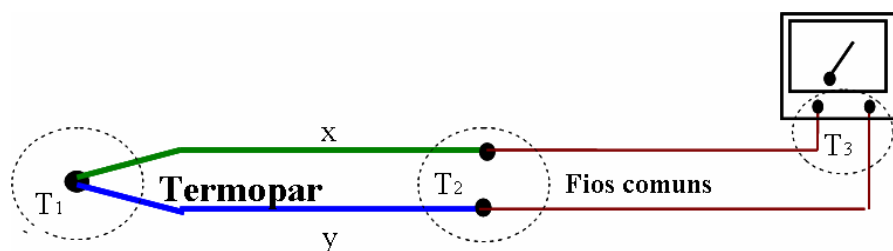


Figura 10 - Ligação incorreta de um termopar ao instrumento de medição

A escolha de um termopar deve ser feita ponderando qual o mais adequado para a aplicação desejada, segundo as características de cada tipo de termopar, tais como a gama de temperaturas suportada, a exatidão e a confiabilidade das leituras, entre outras.

Dentre as vantagens pode-se citar sua simplicidade e confiabilidade de maneira que podem ser substituídos sem introduzir erros relevantes. Existem diferentes tipos de termopares e para cada um existe uma faixa de temperatura de trabalho. A cada tipo são especificados limites de erro denominados padrão (*standard*) e especial, segundo as normas ASTM E230, I.T.S.-90 e IEC 584 como ilustra a figura 11 [6].

TIPOS DE TERMOPARES	FAIXA DE TEMPERATURA	LIMITES DE ERRO	
		STANDARD (escolher o maior)	ESPECIAL (escolher o maior)
T	0 a 370°C	± 1°C ou ± 0,75%	± 0,5°C ou ± 0,4%
J	0 a 760°C	± 2,2°C ou ± 0,75%	± 1,1°C ou ± 0,4%
E	0 a 870°C	± 1,7°C ou ± 0,5%	± 1°C ou ± 0,4%
K/N	0 a 1260°C	± 2,2°C ou ± 0,75%	± 1,1°C ou ± 0,4%
S/R	0 a 1480°C	± 1,5°C ou ± 0,25%	± 0,6°C ou ± 0,1%
B	870 a 1700°C	± 0,5%	± 0,25%
T	-200 a 0°C	± 1°C ou ± 1,5%	
E	-200 a 0°C	± 1,7°C ou ± 1%	
K	-200 a 0°C	± 2,2°C ou ± 2%	

Figura 11 – Tipos de Termopares

Como o Tratador de Óleo trabalha numa faixa de trabalho de 45 a 60 °C então o mais indicado seria o tipo K/N especial ou standard, cujas ligas são cromel e alumel. Os motivos são que o custo destes é baixo e as suas especificações (escala de medição e margem de erro) são adequadas a este processo, haja vista que a temperatura do Tratador deve ficar entre 45 e 60 °C [3].

2.3. Queimador

É um dispositivo que gera chama para aquecimento utilizando gás (acetileno, propano ou gás natural) como combustível. Geralmente possuem entrada para o comburente que pode ser ar ou oxigênio. Diferentes combinações de combustível e comburente proporcionam diversa gama de temperaturas de chama.

No processo de tratamento termoquímico realizado pelos Tratadores de Óleo, a quebra de emulsão por meio de aquecimento geralmente ocorre na faixa de 45 a 60 °C. A melhor combinação combustível/comburente deve ser feita levando-se em conta principalmente o custo para manter o sistema funcionando. Em geral a combinação utilizada é gás natural e ar.

O controle da temperatura no queimador utilizado é realizado por uma servo-válvula que regula a vazão de gás do queimador. Em alguns casos a servo-válvula é acoplada mecanicamente a uma segunda válvula que regula a vazão de ar (comburente).

O ajuste de abertura da servo-válvula é realizado através de um sinal, de quatro a vinte miliampères, enviado pelo CLP que corresponde proporcionalmente ao grau de abertura da mesma.

2.4. Considerações Finais

A descrição do controlador neste capítulo é genérica e se aplica a maioria dos controladores industriais do mercado. Existem inúmeros fabricantes de controladores no mercado. Cada um deles tem um projeto diferente para suas linhas de controladores. Utilizam também *softwares* específicos para programação cada um com recursos distintos. Alguns disponibilizam além do LADDER outras linguagens de programação como LIST (ou STL) e texto estruturado.

CLP's como os da Rockwell ou da Schneider Electric possuem por padrão um tempo de *scan cycle* que varia de acordo com o tamanho do programa. Este recurso visa otimizar o tempo de execução do programa.

Quando uma tarefa requer um período de execução fixo o programador pode utilizar alguns recursos disponibilizados nestes CLP's que utilizam interrupção (ou eventos, como alguns fabricantes denominam) para executar parte do programa[7] (uma subrotina) com maior prioridade.

3. Malha de controle PID

Neste capítulo serão explicados todos os aspectos do controle através de um PID. Iniciando com uma abordagem ao controlador proporcional e mostrando suas desvantagens em relação ao controle proporcional-derivativo (PD). Em seguida compara-se o resultado de um controle PD com o do PID observando as vantagens do uso deste último tipo de controle.

Num outro momento discute-se a discretização da equação do PID objetivando aplicá-la ao CLP. Uma equação do PID digital e duas variantes desta são deduzidas e suas características são explicadas.

Finalmente as duas possíveis formas de implementação do algoritmo PID são ilustradas e discutidas.

3.1. Equação da Malha PID

O controle por malha PID utiliza o desvio, a diferença, entre o valor esperado de uma variável de processo e seu valor medido por meio de um transdutor. Na figura 12 é ilustrada seu modo de operação.

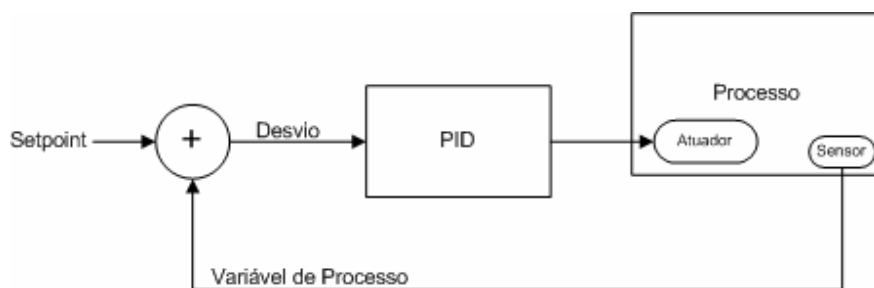


Figura 12 - Diagrama de uma malha PID

Este tipo de controle é largamente utilizado na indústria por possibilitar um controle com boa estabilidade e baixo erro de *offset*². Ele é uma combinação dos modos de controle proporcional (P), integral (I) e derivativo (D).

3.1.1 Controle proporcional

Seja o sistema de controle ilustrado na figura 12 onde o sistema realimentado possui um controlador representado por $G_c(s)$. Considerando o ganho da realimentação – igual a um a função transferência do sistema pode ser representada pela equação (3).

² Desvio remanescente após o sistema ter estabilizado

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)} \quad (3)$$

O objetivo principal é tornar $C(s)$, que é a variável de processo, igual a $R(s)$, que é o *setpoint* ou ponto de operação desejado.

A partir da equação (3) vemos que uma das maneiras de tornar $T(s)$ aproximadamente igual a um é fazer o termo $G_c(s) \cdot G_p(s)$ ser muito maior que um. O resultado, então, pode ser observado na equação (4).

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{G_c(s) \cdot G_p(s)} = 1 \quad (4)$$

Este é o princípio de funcionamento do controlador proporcional. Um grande problema neste tipo de controle é o aumento do *overshoot* (ver figura 14) à medida que a constante proporcional aumenta. Além disto, uma mudança abrupta na variável de processo pode causar um pico na saída do controlador muito acima do valor de operação desejado.

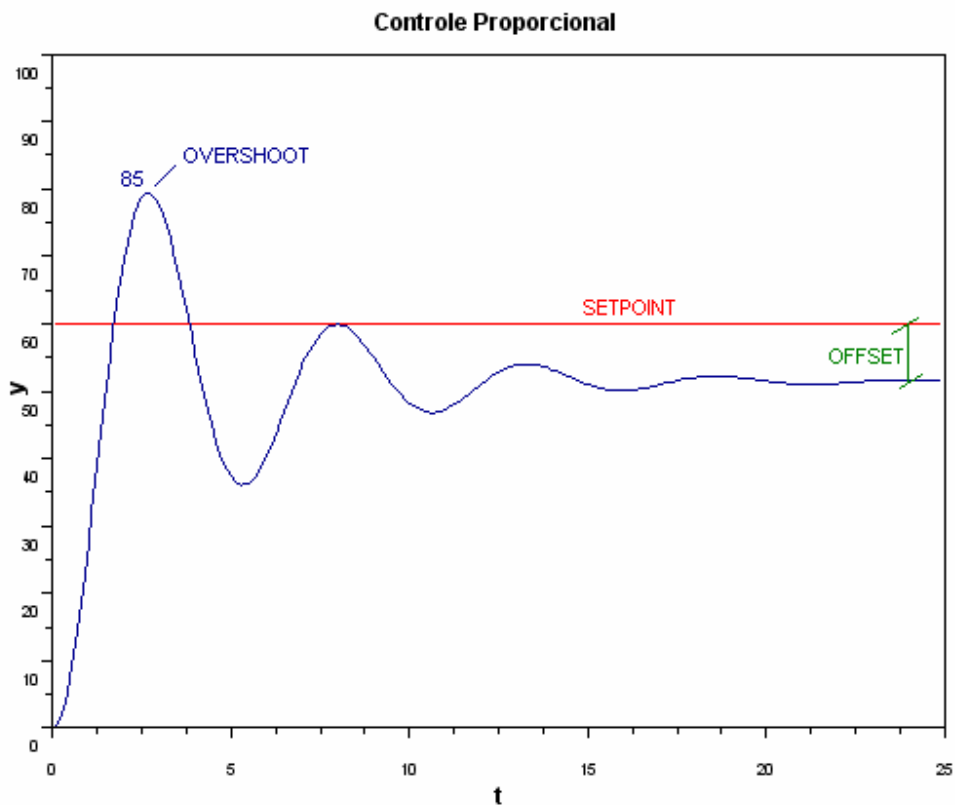


Figura 13 - Controle Proporcional

3.1.2 Controle Proporcional e Derivativo

Para eliminar o problema do *overshoot* é introduzido um termo derivativo correspondendo a taxa de mudança do erro como mostra a equação (5). Este fator faz com que o controlador tenha uma resposta inicial elevada e diretamente relacionada à taxa de mudança do erro. Quanto maior a taxa de mudança do erro mais rápida é a resposta do controlador à mudança.

$$G_c(s) = K_p + K_d \cdot s \quad (5)$$

Um grande problema neste tipo de controle é a existência de *offset* ou erro em regime permanente quando o sistema estabiliza (ver figura 15). Este erro depende do sistema e da constante de proporcionalidade e se deve ao fato de que quando o desvio se torna nulo a saída do controlador também se anula. Assim o sistema tende a se equilibrar num ponto em torno do *setpoint* e não no *setpoint*.

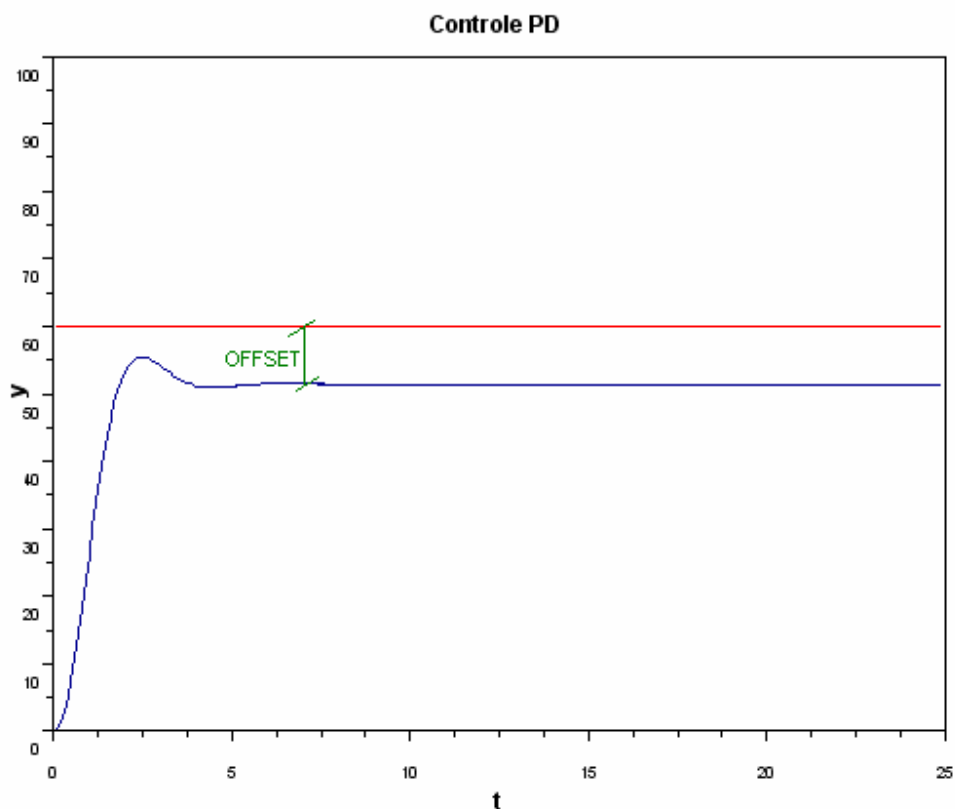


Figura 14 - Controle Proporcional e Derivativo

3.1.3 Controle Proporcional, Integral e Derivativo

Uma das maneiras de eliminar o erro em regime permanente é adicionar um termo integral ao controlador G_c de forma que sua função transferência fique igual à equação (6).

$$G_c(s) = K_p + K_d \cdot s + \frac{K_i}{s} \quad (6)$$

Com este termo adicionado, uma entrada nula correspondendo a um desvio igual a zero não resultará numa saída nula do controlador. Contudo dois problemas são introduzidos com esta modificação. Primeiro a estabilidade do sistema diminui devido ao acréscimo do pólo. Segundo o sistema passa a ter uma resposta transitória mais lenta [7]. Estes problemas podem, no entanto, ser eliminados com a correta sintonia do controlador (ver figura 16).

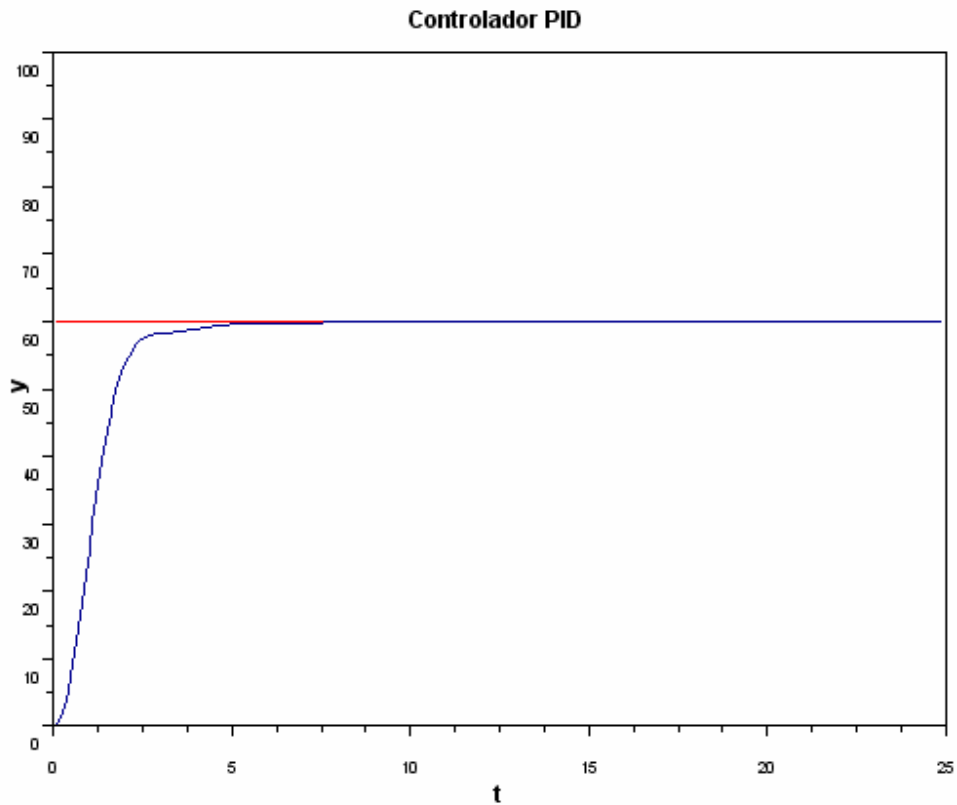


Figura 15 - Controle Proporcional, Integral e Derivativo

3.2. PID Digital

A equação do PID digital pode ser obtida através da amostragem da equação do PID analógico no domínio do tempo. Ela pode ser deduzida pela transformada inversa do produto da equação (7) pelo sinal E(s).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Matematicamente a amostragem é feita realizando a seguinte substituição:

$$t = nT \quad (8)$$

Onde T é o período de amostragem e n é um inteiro correspondendo ao número da amostra.

Obtemos, assim, a equação discretizada:

$$u(nT) = K_p \cdot e(nT) + K_i T \sum_{j=0}^n e(jT) + K_d \frac{e(nT) - e([n-1]T)}{T} \quad (9)$$

Normalizando em termo do período de amostragem T:

$$u[n] = K_p \cdot e[n] + K_i T \sum_{j=0}^n e[j] + K_d \frac{e[n] - e[n-1]}{T} \quad (10)$$

Esta é a equação de um PID digital. A partir dela podem-se elaborar algoritmos em computadores como CLP's para controlar os mais variados sistemas.

3.2.1 Análise da viabilidade prática da equação

Os controladores lógicos programáveis, assim como qualquer computador, têm limitações na capacidade de armazenamento e representação de números. Usualmente um CLP utiliza posições de memória de dezesseis a trinta e dois *bit's* para representar números como ilustra a figura 17.

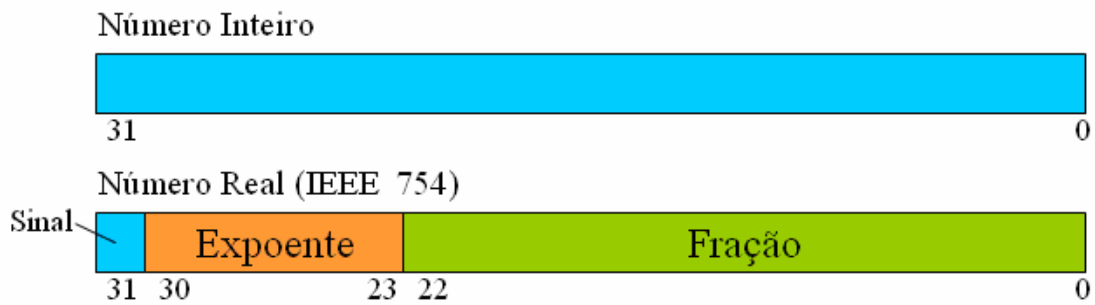


Figura 16 – Memória de um CLP

A representação dos números inteiros está limitada a um máximo valor positivo e a um mínimo valor negativo. Os limites estão diretamente relacionados ao número de *bit's* da posição de memória utilizada. Caso esta seja de trinta e dois *bit's*, por exemplo, o valor máximo representável será igual a +2.147.483.647 e o mínimo será igual a -2.147.483.648.

Os números reais, bem como os números inteiros, são limitados a um valor máximo positivo e mínimo negativo quando o valor do expoente (ver figura 16) é positivo. Existe também uma restrição que é a de “fundo de escala”, caso em que o valor do expoente é negativo. O CLP não tem a capacidade de representar uma fração menor que um valor determinado pelo número de *bit's* da posição de memória.

Por outro lado, em processos de produção industrial é comum que máquinas ou linhas de produção inteiras permaneçam ligadas por vários dias ou semanas. Entretanto o período de amostragem para um PID normalmente não excede a dezenas de minutos. Apesar da grande capacidade de armazenamento dos CLP's atuais, até mesmo com taxas de amostragem de dezenas de minutos seria inviável a implementação de um algoritmo para a equação (10) devido à presença do somatório. O valor do termo integral poderia “saturar” levando o sistema a agir de maneira indesejada.

3.2.2 Alternativa

É possível eliminar o somatório da equação (10) realizando manipulações matemáticas que são detalhadas a seguir.

Considere o seguinte deslocamento no tempo:

$$u[n-1] = K_p \cdot e[n-1] + K_i T \sum_{j=0}^{n-1} e[j] + K_d \frac{e[n-1] - e[n-2]}{T} \quad (11)$$

Subtraindo a saída do controlador $u[n]$ por seu valor imediatamente anterior:

$$u[n] - u[n-1] = K_p \cdot e[n] + K_i T \sum_{j=0}^n e[j] + K_d \frac{e[n] - e[n-1]}{T} - \left[K_p \cdot e[n-1] + K_i T \sum_{j=0}^{n-1} e[j] + K_d \frac{e[n-1] - e[n-2]}{T} \right] \quad (12)$$

Observando que:

$$\sum_{j=0}^n e[j] - \sum_{j=0}^{n-1} e[j] = e[n] \quad (13)$$

Obtemos o seguinte resultado:

$$u[n] = u[n-1] + K_p \cdot (e[n] - e[n-1]) + K_i T \cdot e[n] + \frac{K_d}{T} \cdot (e[n] - 2 \cdot e[n-1] + e[n-2]) \quad (14)$$

Esta é a equação ideal do PID Digital. Ela foi elaborada levando-se em conta que o *setpoint* não varia com o tempo, ou seja:

$$e[n] = SP - PV[n] \quad (15)$$

Contudo na prática o valor de *setpoint* também varia com o tempo. Enquanto a mudança na variável de processo é geralmente lenta e contínua a variação do *setpoint* é brusca e aleatória. Assim a equação ideal do PID Digital é pouco usada, pois o termo proporcional e o derivativo podem aumentar o erro do transiente devido a mudanças abruptas do *setpoint* resultando em um comportamento indesejado do controlador.

A contribuição do termo derivativo para o erro é no sentido inverso de diminuir o desvio caso ocorre uma modificação no *setpoint*. Para eliminar este problema retira-se a influência do *setpoint* deste termo, ou seja, utiliza-se a seguinte equação:

$$u[n] = u[n-1] + K_p \cdot (e[n] - e[n-1]) + K_i T \cdot e[n] + \frac{K_d}{T} \cdot (PV[n] - 2 \cdot PV[n-1] + PV[n-2]) \quad (16)$$

Onde o desvio é dado por:

$$e[n] = SP[n] - PV[n] \quad (17)$$

Esta é a equação mais utilizada por controladores logicamente programáveis. Sua resposta à variação do *setpoint* ainda é brusca, mas no sentido de diminuir o desvio. Em sistemas que mudanças repentinas na saída do PID não são aceitáveis, controladores deste tipo devem ser usados com cautela.

Para diminuir os efeitos do fator proporcional é comum a utilização da técnica de *setpoint tracking*. Esta consiste em aumentar ou diminuir o *setpoint* do PID gradualmente até atingir o valor solicitado.

É possível, ainda, eliminar este efeito retirando a contribuição do *setpoint* do termo proporcional, como foi feito no derivativo, resultando na seguinte equação:

$$u[n] = u[n-1] + K_p \cdot (PV[n] - PV[n-1]) + K_i T \cdot e[n] + \frac{K_d}{T} \cdot (PV[n] - 2 \cdot PV[n-1] + PV[n-2]) \quad (18)$$

3.3. Algoritmo PID

O algoritmo do PID foi elaborado baseado nas equações 14, 16 e 18 do PID digital deduzidas. Utilizando a linguagem de programação de CLP's denominada LADDER foram elaborados duas rotinas de controle PID. As duas só se distinguem pela forma de utilização dos recursos que a ferramenta de programação disponibiliza. Em uma são utilizados blocos de expressão denominados CPT onde toda a equação pode ser escrita no mesmo como ilustra a figura 18. A outra rotina, por sua vez, difere apenas na linha da equação que, em vez de utilizar um único bloco (o CPT) para calcular toda a expressão do PID, utiliza blocos básicos de operação matemática. A figura 20 ilustra como a equação (14) foi implementada.

A equação ideal (14) está comentado como tipo A, a equação com o *setpoint* eliminado apenas do termo derivativo (16) está comentado como tipo B e a equação com *setpoint* eliminado tanto do termo derivativo como do proporcional (18) está comentada como tipo C. Os comentários não foram baseados em nenhum padrão de notação nem foram baseados em qualquer literatura. São termos arbitrários apenas para que, de forma resumida, o leitor ou programador identifique os tipos implementados (ver figura 18).

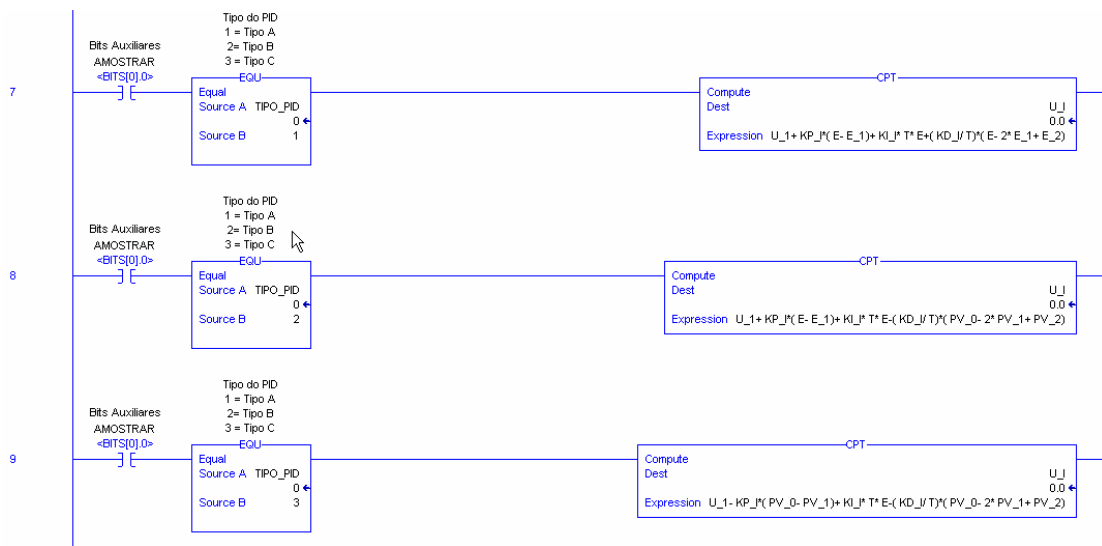


Figura 17 – Algoritmo do PID

Apesar de a linguagem de programação LADDER ser padronizada, cada fabricante de CLP disponibiliza recursos adicionais que os diferencia de um para outro. Assim vale observar que este algoritmo foi elaborado para CLP's da *Allen Bradley* utilizando o *software RSLogix5000*. Para serem utilizadas por outro fabricante as funções e chamadas de sub-rotina devem ser modificadas por seu equivalente.



Figura 18 – Bloco PID do RSLogix5000

O bloco PID disponibilizado pelo *software* (figura 19) pode ser configurado através de uma tela com várias opções como ilustram as figuras 21 e 22.

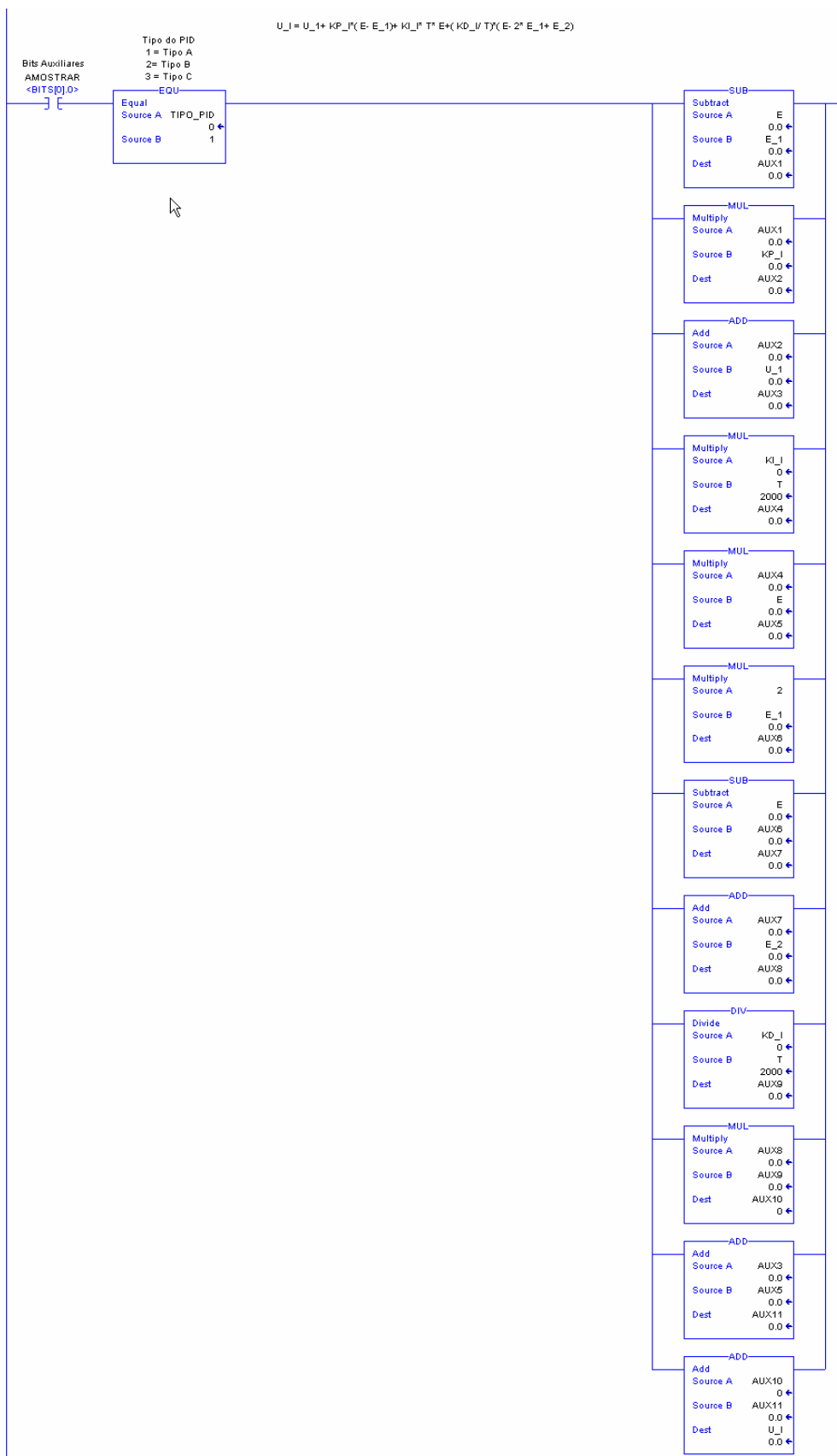


Figura 19 – Implementação com blocos básicos do PID tipo A

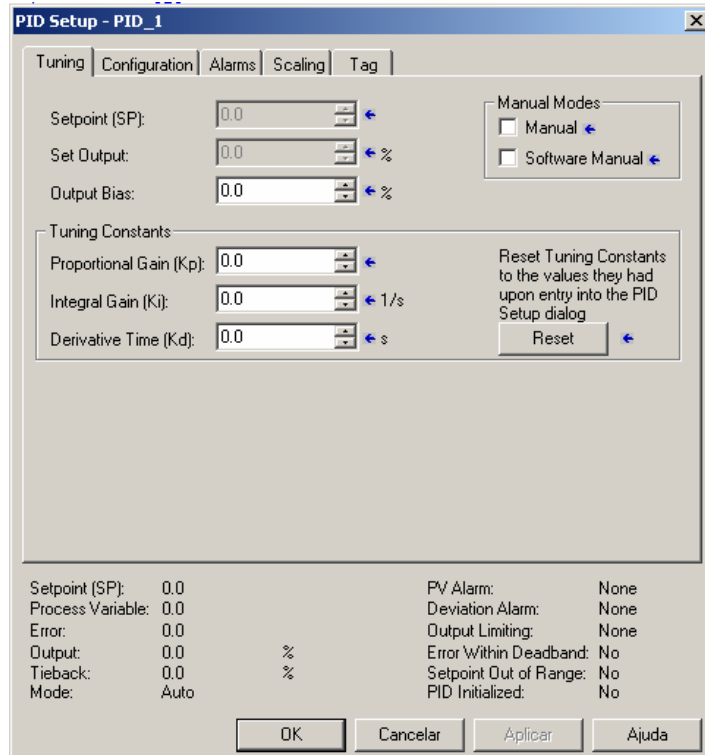
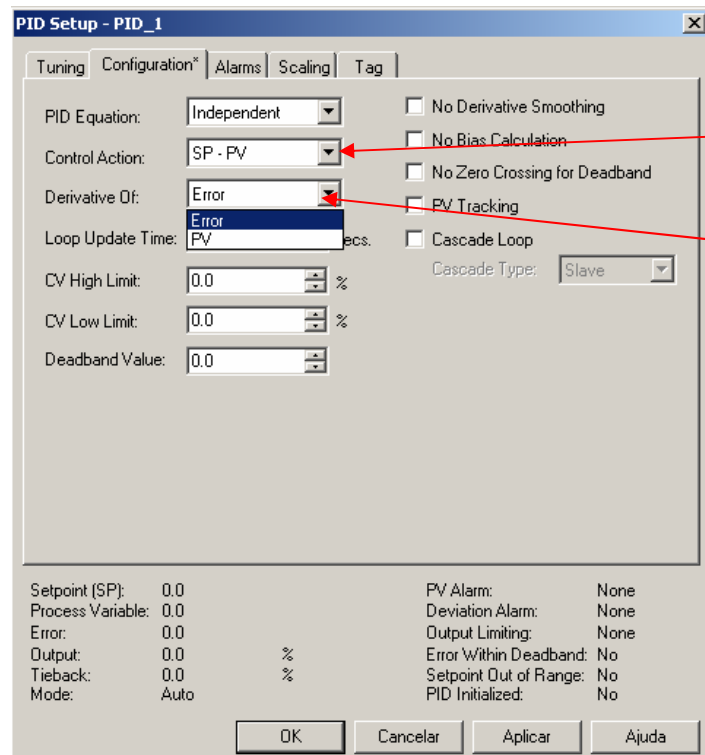


Figura 20 – Tela de sintonia do bloco PID do RSLogix5000



Tipo de ação de controle

Tipo de equação a ser utilizada (Tipo A ou B)

Figura 21 – Tela de configuração do bloco PID

Na figura 22 vemos a tela de configuração do bloco PID. Nela é possível selecionar o tipo de ação de controle como destacado. O equivalente em LADDER seria o correspondente a linha do algoritmo ilustrada na figura 23 onde a seleção é realizada através do *bit* ACAO.

Na mesma figura ainda é destacado o campo de seleção do tipo de equação a ser utilizado. Nestes controladores é possível utilizar os PID's tipo A e tipo B. Se o campo contiver *Erro*, então será tipo A. No algoritmo deste trabalho corresponderá a atribuir o valor 1 ao endereço TIPO_PID como ilustra a figura 18. Se, do contrário o campo contiver *PV*, então a equação utilizada será tipo B correspondendo ao valor 2 em TIPO_PID.

A saída do bloco PID é dada em percentual e existe a opção de escalonamento (ver figura 24). Já no algoritmo elaborado a saída deve ser limitada por um valor mínimo e máximo como ilustra a figura 25.

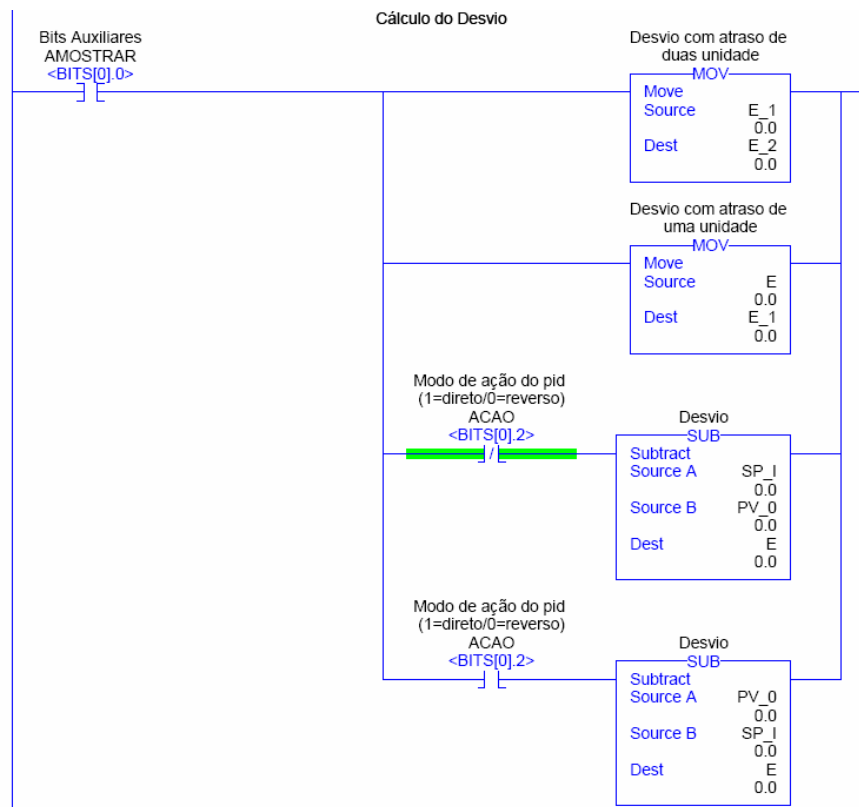


Figura 22 – Seleção do tipo de ação do PID

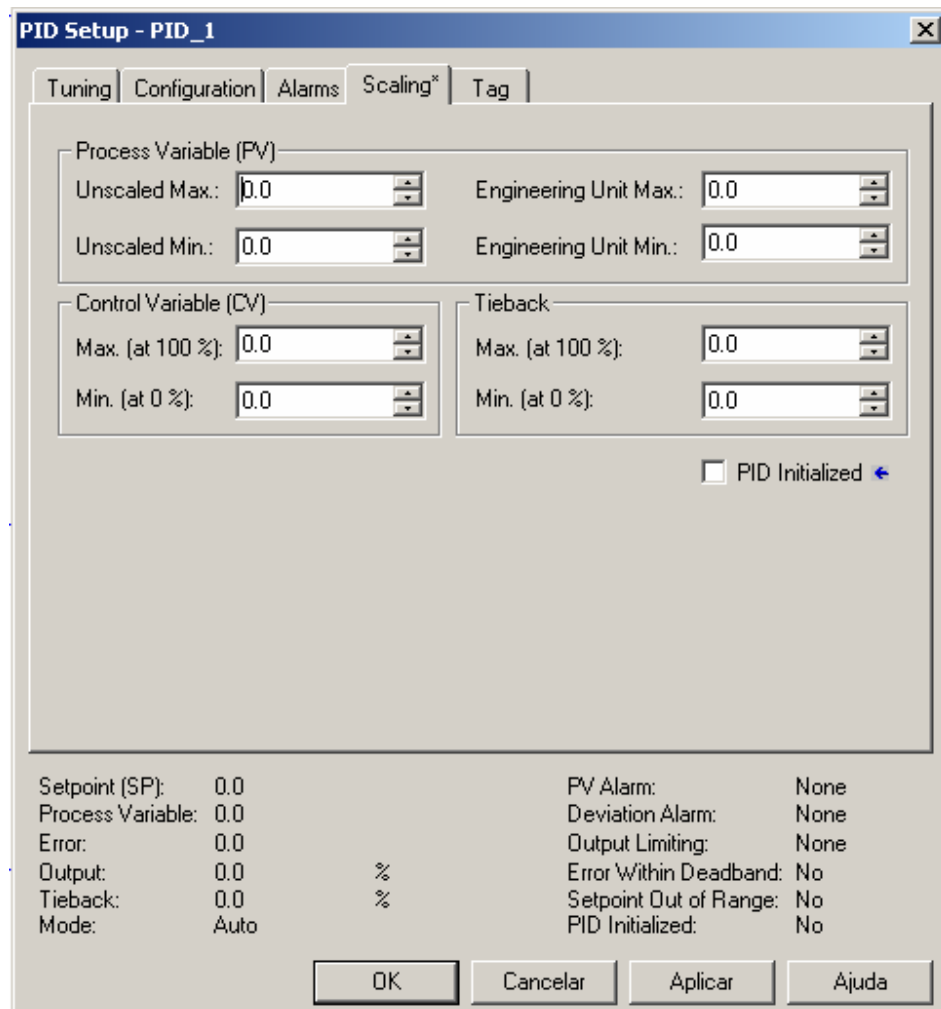


Figura 23 – Tela de escalonamento do PID

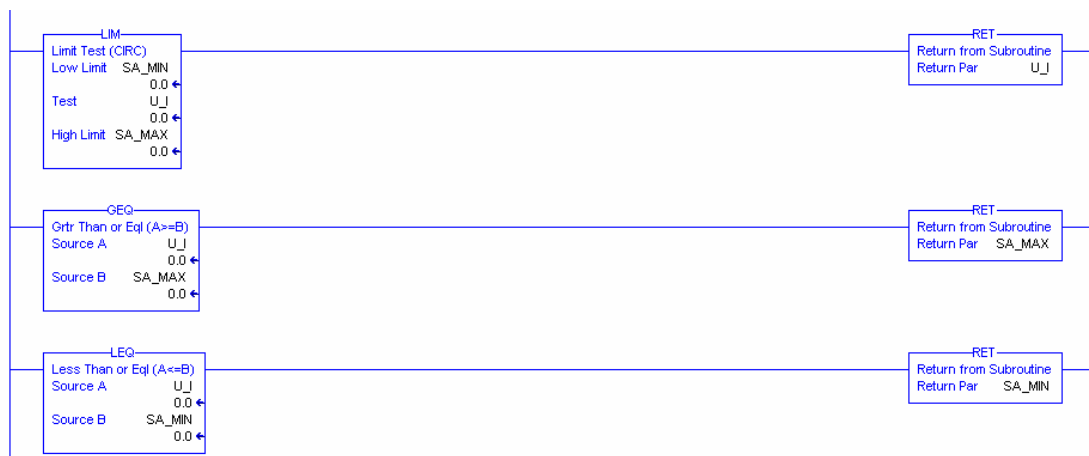


Figura 24 – Limites de segurança da variável de saída

3.4. Considerações Finais

A discretização do PID leva a uma equação com um parâmetro a mais a ser observado que é o tempo de amostragem T que pode ser observado na equação (14). Ao elaborar o algoritmo do PID deve-se levar em consideração este tempo. Deve-se garantir que este tempo seja de duração fixa. Deve-se observar se o CLP a ser utilizado possui recursos que possibilitem ter o controle do *scan cycle* ou do próprio programa ou da rotina que contém o algoritmo (item 2.4).

O algoritmo do PID elaborado possui poucas linhas (ver apêndice A) e utiliza apenas operações básicas de cálculo. Vê-se que o bloco pré-definido do PID é bastante completo e existem muitos recursos. Entretanto tudo pode ser implementado através do LADDER. O principal, em termos de funcionalidade, é a equação do PID e suas variações. Os recursos adicionais são disponibilizados com a finalidade de diminuir o trabalho do programador e evitar erros que levem a danos em equipamento ou injúria às pessoas. Deve-se, apenas, observar a periodicidade da execução da rotina de maneira a manter o tempo de amostragem fixo.

4. Aplicação do PID Digital ao Tratador de Óleo

4.1. Modelo Matemático do Sistema

O tratador de óleo neste trabalho foi modelado como um sistema de segunda ordem obedecendo à equação (19) no domínio da frequência.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p \cdot e^{-Ls}}{(\tau_1 \cdot s + 1)(\tau_2 \cdot s + 1)} \quad (19)$$

Pode-se observar na equação que existem quatro parâmetros a serem definidos que são: o ganho estático, K_p , as duas constantes de tempo, τ_1 e τ_2 , e o atraso de transporte, L . Os valores adotados para estes parâmetros são ilustrativos. A determinação destes deve ser feita através de métodos de análise da resposta do sistema a estímulos em sua entrada. Dentre os possíveis métodos, existe o de Mollenkamp e o de Smith.

Realizando a transformada inversa de Laplace obtém-se a equação (20) no domínio do tempo. Com os parâmetros definidos, o diagrama do modelo ilustrado na figura 26 foi elaborado utilizando a biblioteca *Scicos* do software *Scilab*.

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{K_p}{\tau_1 \cdot \tau_2} u(t - L) - \frac{1}{\tau_1 \cdot \tau_2} \left(y(t) + (\tau_1 + \tau_2) \cdot \frac{dy(t)}{dt} \right) \quad (20)$$

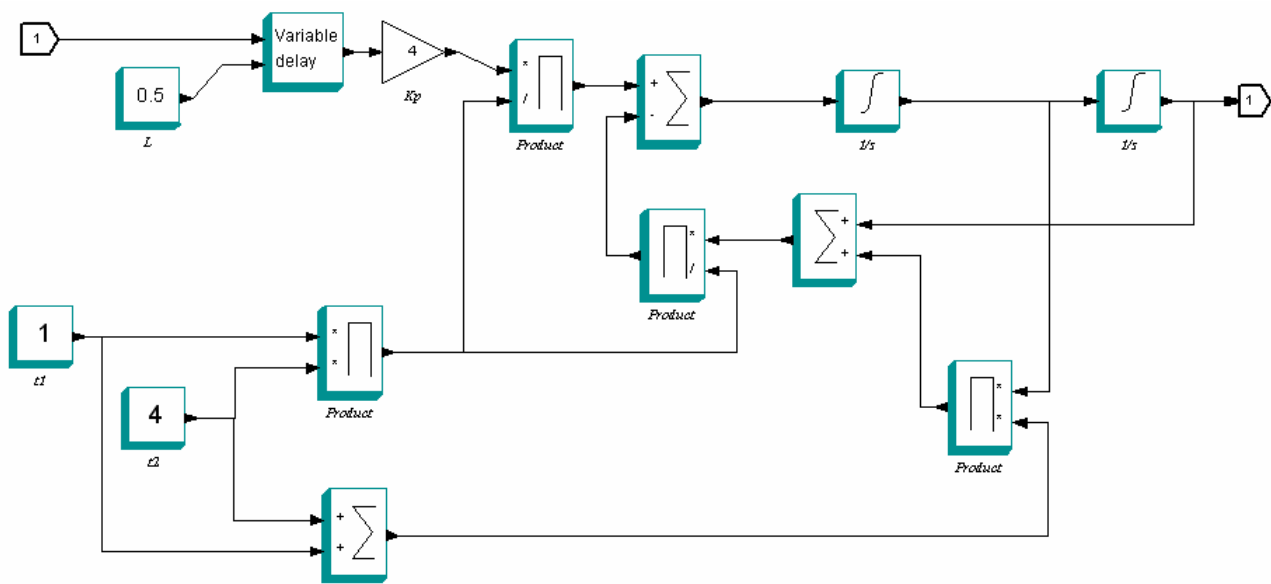


Figura 25 - Diagrama do modelo do Tratador de Óleo

A resposta do modelo a um degrau unitário foi simulada e está ilustrada na figura 27.

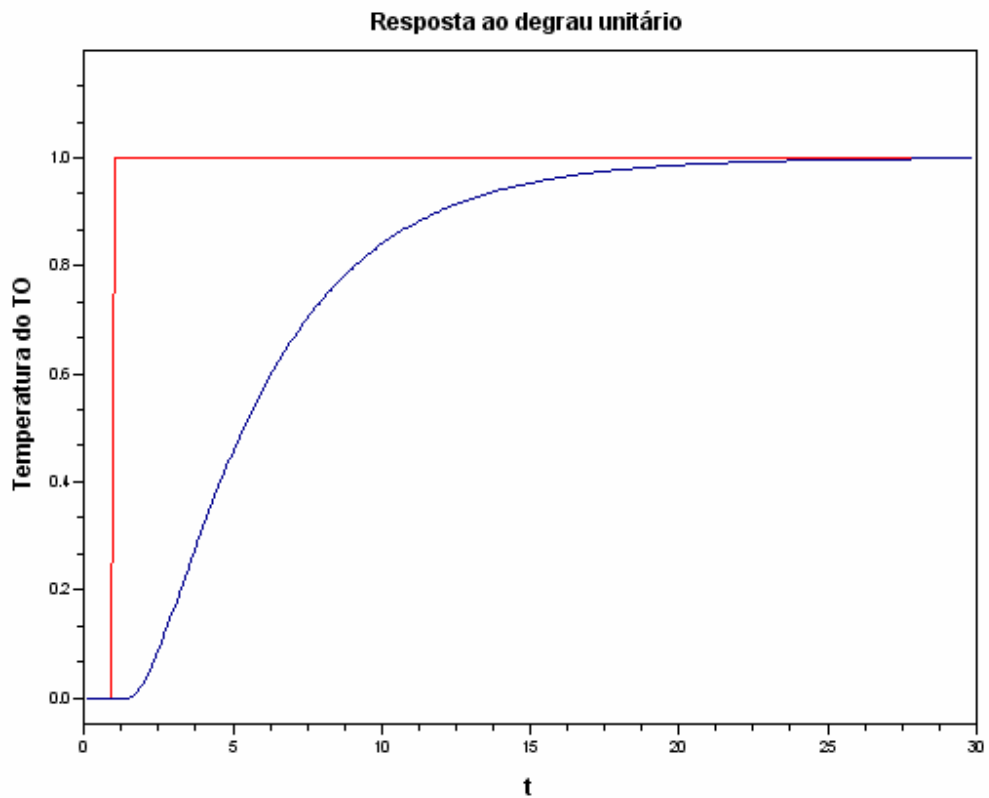


Figura 26 - Resposta do modelo adotado a uma onda degrau

4.2. Sintonia do PID

Se o sistema puder ser modelado matematicamente, então é possível aplicar técnicas de projeto para determinar os parâmetros do controlador. Por outro lado, se o sistema for complexo de maneira que não seja possível modelá-lo, então não é possível analisar analiticamente o problema. Deve-se, portanto, recorrer a abordagens experimentais de sintonia do controlador.

Como na maioria das situações não há disponibilidade de informações suficientes para elaborar um modelo, neste trabalho a sintonia do PID será realizada utilizando um método baseado em informações experimentais.

Existem inúmeros métodos para cálculo dos parâmetros do controlador. Uma das primeiras propostas para sintonia foi a de Ziegler-Nichols[1]. Ela leva em conta que a resposta do sistema a uma entrada em degrau unitário deve possuir um aspecto de um S como ilustra a figura 27. Este método considera que o sistema pode ser aproximado pela equação (21) de primeira ordem.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{\tau \cdot s + 1} \quad (21)$$

Vale observar neste ponto que a equação do modelo é de segunda ordem. Dessa maneira a aproximação resultará em um erro que pode ocorrer no caso prático quando o modelo matemático do sistema não é conhecido.

A análise da resposta ao degrau é feita como ilustra a figura 27. A curva em formato de S pode ser caracterizada por duas constantes, que são o atraso L e a constante de tempo T. Estes parâmetros são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva obtendo, assim, os pontos de intersecção desta linha com o eixo dos tempos e com a linha $g(t)=1$.

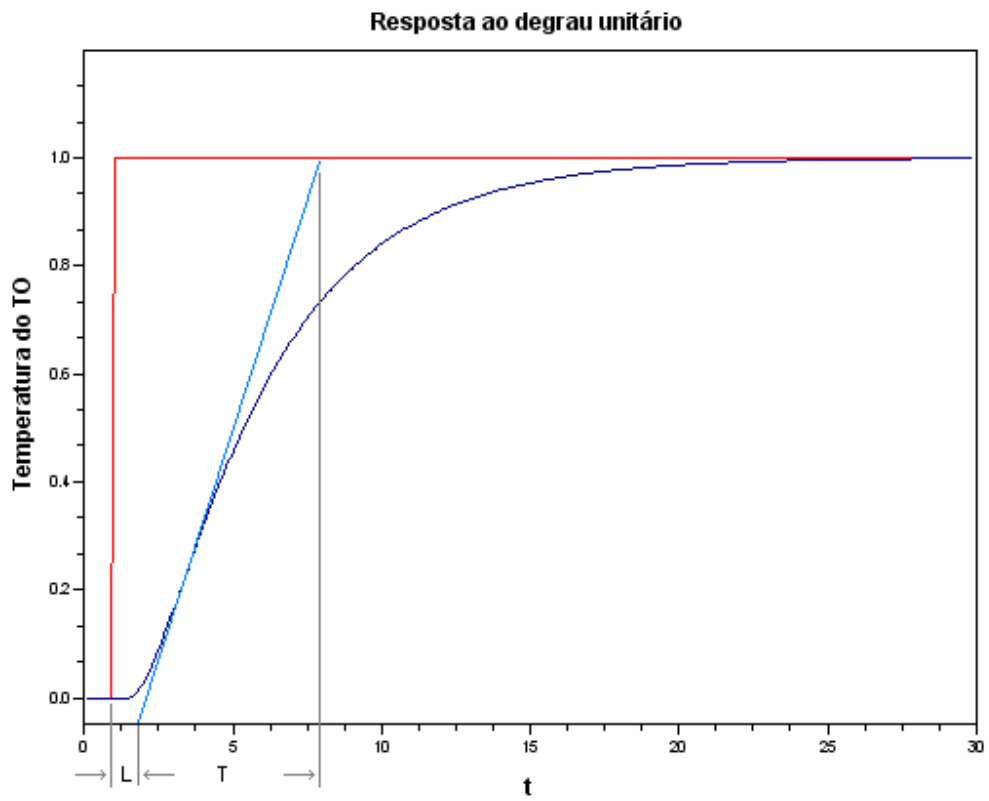


Figura 27 - Sintonia do PID

Tendo obtido as constantes L e T o cálculo dos parâmetros dos controladores P, PI e PID podem ser feitos observando a tabela 1.

Tabela 1 - Regra de Sintonia de Ziegler-Nichols

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9 \cdot T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 \cdot T/L$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$

Para o sistema em questão temos que L é igual a 1 e T igual a 6. Os valores dos parâmetros do PID obtidos a partir destas constantes estão listados na tabela 2.

Tabela 2 – Constantes do Modelo

Parâmetro	Valor
K_p	7,2
T_i	2,0
T_d	0,5

4.3. Simulação e Resultados Obtidos

O *hardware* da simulação consiste basicamente de um CLP *ControlLogix* da *Allen Bradley* e um PC. A comunicação é realizada utilizando o servidor OPC (*OLE for Process Control*) denominado *RSLinx* para realizar a comunicação entre o CLP e o software de simulação do sistema.

O algoritmo PID implementado neste trabalho possui os parâmetros que qualquer bloco PID, independente do fabricante do CLP, possui. Estes parâmetros são o ganho proporcional, integral e derivativo além dos limites de máximo e mínimo na saída do PID. Existe ainda a possibilidade de definir se a ação do PID será direta ou reversa.

Dependendo do fabricante o bloco pode disponibilizar ainda outros recursos de controle.

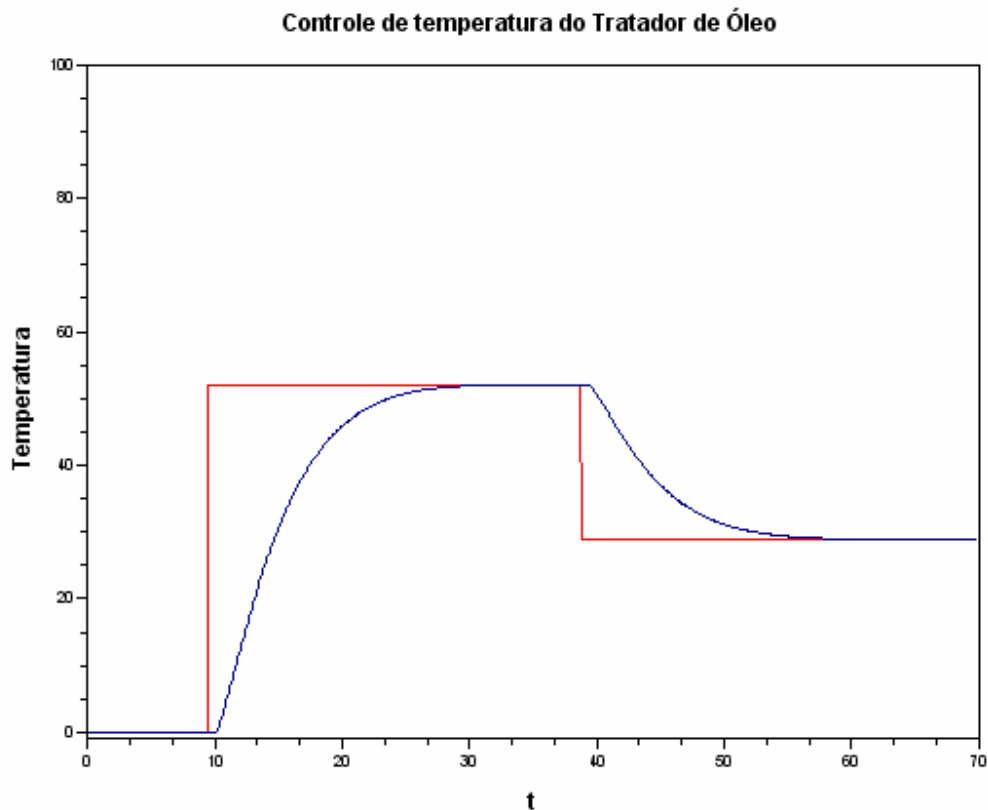


Figura 28 – Simulação com algoritmo A

Observando as figuras 28 e 29 vemos a diferença da resposta entre as equações (14) e (16).

A partir deste ponto iremos denominar PID tipo A aquele que utiliza a equação (14) para realizar o controle já o tipo B será aquele que utiliza a equação (16) e o tipo C a (18).

Na mudança de setpoint o valor da variável de processo do PID tipo A muda abruptamente enquanto que na do tipo B cresce gradualmente. Processos de produção que não permitem variações rápidas na saída do PID, seja por motivo de segurança ou devido ao comprometimento da estrutura física (desgaste acelerado), devem utilizar o PID tipo B.

Observando o resultado da simulação do algoritmo do PID tipo C (figura 32) vê-se que para este processo ele não se diferencia muito do tipo B.

Controle de temperatura do Tratador de Óleo

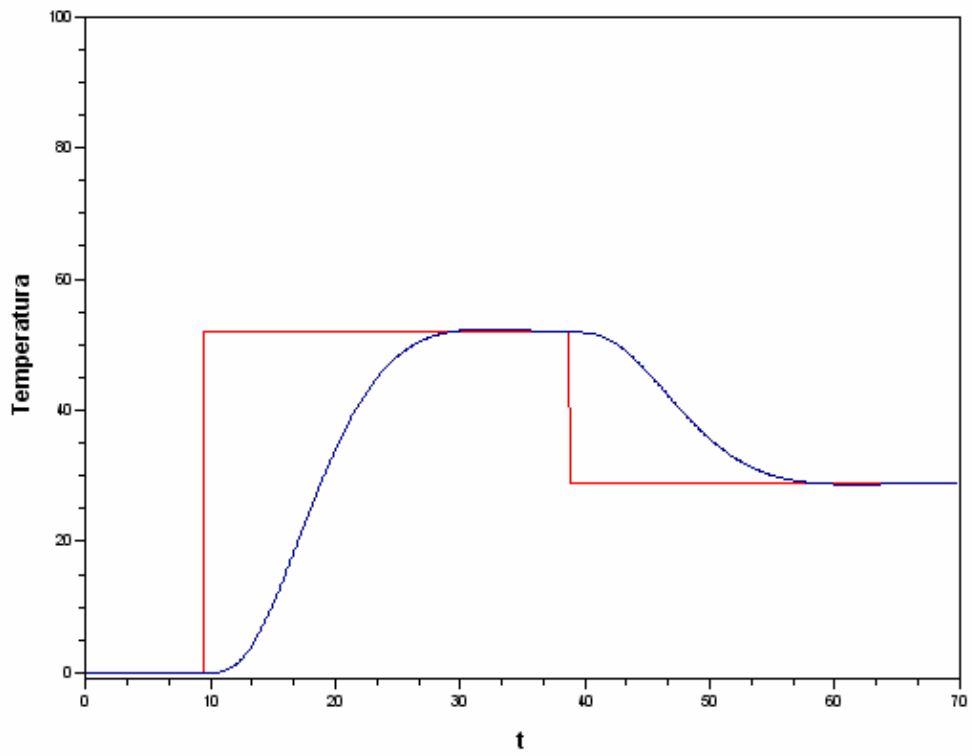


Figura 29 – Simulação com algoritmo B

Controle de temperatura do Tratador de Óleo

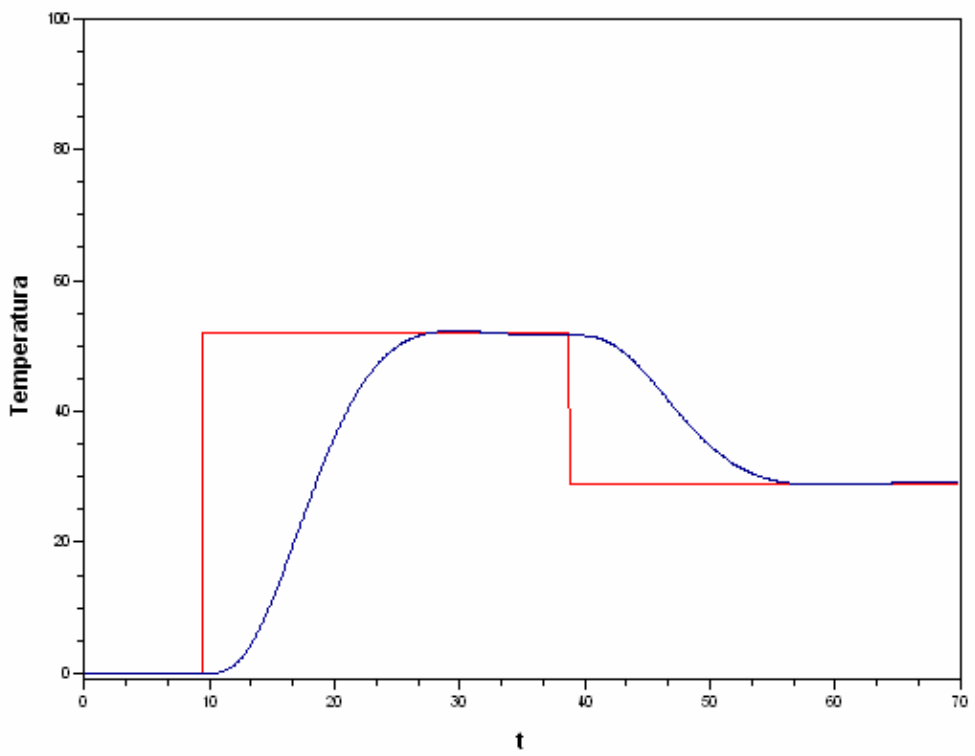


Figura 30 – Simulação com algoritmo C

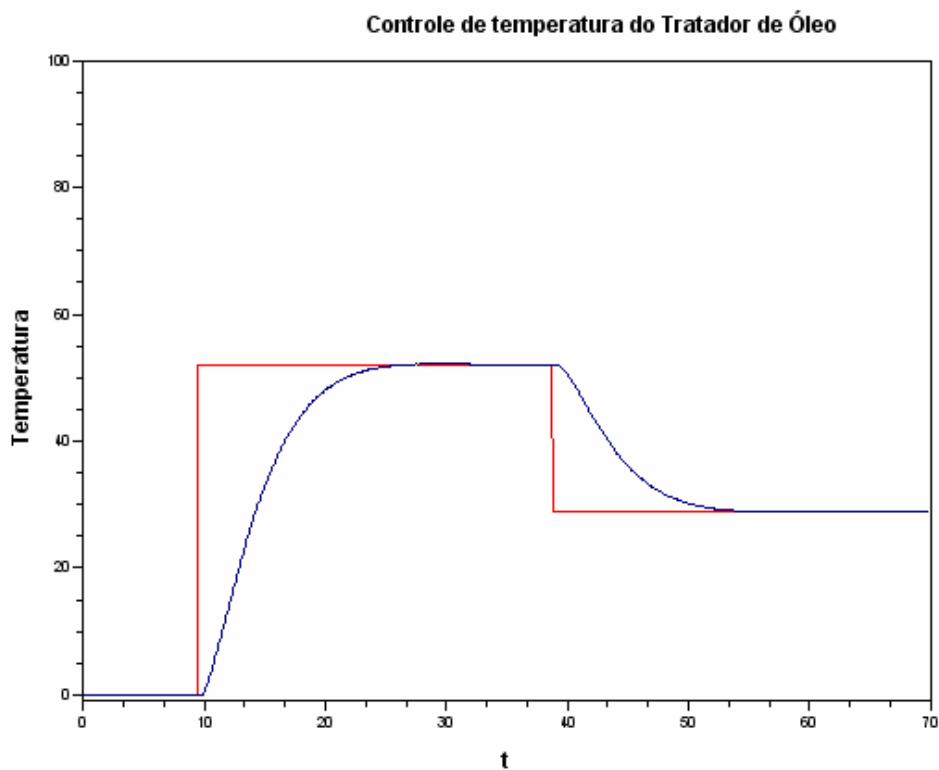


Figura 31 – Simulação com bloco PID já pronto

Observando o resultado da simulação com o bloco pronto do PID e comparando com os resultados anteriores, conclui-se que o bloco utiliza o algoritmo do PID digital com o fator derivativo sendo calculado através do desvio e não da variável de processo. Em outras palavras ele utiliza a equação do tipo A.

4.4. Considerações Finais

O objetivo inicial deste trabalho era simular o controle de temperatura de um Tratador de Óleo de maneira mais real possível. Isto incluía a utilização de um CLP, para realizar o controle com o PID digital elaborado, que se comunicaria com um computador através de um servidor OPC (*OLE for Process Control*), que simularia o Tratador de Óleo utilizando o software *Scicos*.

Para atingir este objetivo era necessário obter um modelo matemático real do sistema. Foi utilizado então um modelo de segunda ordem que simula com boa aproximação o sistema do Tratador de Óleo. Não houve sucesso, porém, na comunicação entre CLP e o computador. Assim a simulação toda foi realizada no *Scicos* obtendo resultados bastante satisfatórios como foi observado anteriormente.

5. Conclusão

Durante a realização do trabalho houve grande dificuldade para encontrar um modelo a ser utilizado na simulação. Como foi difícil obter uma literatura técnica que disponibilizasse um modelo mais realístico do sistema então foi adotado o modelo genérico de segunda ordem como foi descrito anteriormente. Este apesar de genérico tem um comportamento semelhante à maioria dos sistemas de aquecimento práticos.

O Tratador de Óleo é de extrema importância no processo de extração de petróleo, seja em poços marítimos, seja em poços terrestres. Se a ocorrência simultânea de gás e óleo na tubulação, por um lado, diminui a energia hidrostática da coluna bifásica que se estabelece entre o reservatório e a superfície, por outro aumenta a energia dissipada no escoamento, induz oscilações de pressão e vazão neste escoamento. Assim aplicação do Tratador de Óleo é fundamental sempre que a co-existência das fases no escoamento implicarem na operação inadequada de equipamentos ou incrementar processos indesejáveis, como a perda de carga ou a oscilação de variáveis operacionais (vazão, pressão, temperatura, etc.) no sistema de transporte de fluidos. Assim um sistema de controle eficiente é fundamental para que o processo produtivo ocorra da melhor e mais segura maneira possível.

A temperatura no Tratador de Óleo é a sua principal variável no processo de separação dos fluidos imiscíveis. As outras variáveis como nível são mais utilizadas para segurança e análise quantitativa da produção do que para estabelecer um ambiente adequado à separação. Como foi apresentado neste trabalho, o controlador PID se mostrou uma opção eficiente para realizar o controle da temperatura deste sistema.

Dada a grande praticidade na sintonia, a sua simplicidade, baixo custo de implementação e versatilidade o PID se tornou uma ferramenta largamente empregada na indústria moderna. E neste trabalho foi comprovado que é possível implementar este tipo de controle em CLP que não disponibilizam um bloco PID pronto.

5.1. Trabalhos Futuros

Uma proposta para um trabalho futuro seria realizar testes com modelos mais realísticos. Poder-se-ia analisar as diferentes formas de sintonia para o PID de maneira a determinar o método mais adequado ao sistema. Além de implementar algoritmos de auto-sintonia (*Autotuning*) para verificar se é viável aplicá-lo ao Tratador de Óleo.

Uma configuração com uso menos freqüente é a utilização do PID em cascata, ou seja, utilizar a saída de um PID como entrada para o outro. Poder-se-ia analisar a

complexidade, o método de sintonia e principalmente a estabilidade e eficiência deste controlador.

Uma outra proposta seria a implementação de um controle por lógica nebulosa (lógica *fuzzy*).

6. Apêndice A

Neste apêndice encontra-se o algoritmo do PID utilizado neste trabalho escrito na linguagem LADDER.

7. Referências Bibliográficas

- [1] Katsuhiko Ogata, ``Engenharia de Controle Moderno'', Prentice Hall, 2003.
- [2] Digital Controllers, ``Digital controllers - Part 8: The full PID controller and response to setpoint or load changes'',
<http://instrumentation.co.za/regular.aspx?pkRegularid=936&pkCategoryID=54>
- [3] Robson Dourado, ``PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO'',
http://www.fadepe.com.br/restrito/conteudo_pos/petro2_Processamento%20Primario.pdf
- [4] Buckley, Luyben e Shunta, ``Design of Distillation column control system'', Edward Arnold, 1985
- [5] ``Analogue interfaces Zelio Analog''
<http://ecatalog.schneider-electric.com/dsmapp/data/pdf/en/TL4/14011-EN.pdf>
- [6] ``Termopares Convencionais''
<http://www.salcas.com.br/catalogo/4-Termopares%20Convencionais.pdf>
- [7] Telemecanique, ``Twido programmable controllers - Software Reference Guide''