

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Automação de um Forno de Reaquecimento de Barras da Belgo Mineira

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:
EEL 5901: Projeto de Fim de Curso*

Mario Andrei Cologni

Florianópolis, Maio de 1999

**Automação de um Forno de Reaquecimento
de Barras da Belgo Mineira**

Mario Andrei Cologni

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
EEL 5901: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial

Banca Examinadora:

Eng. Valter Luiz Knhis
Orientador na Empresa

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer
Orientador do Curso

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia
Responsável pela disciplina e Coordenador do Curso

Prof. Leonardo César Kammer, Avaliador

Júlio Feller Golin, Debatedor

Márcio Bittencourt Pires Júnior, Debatedor

Resumo

A presente monografia descreve o desenvolvimento e comissionamento de um *software* para automação do forno de reaquecimento de barras da siderúrgica Belgo Mineira, Piracicaba – SP.

A automação do forno está inserida num projeto de maiores dimensões que inclui a automação do sistema de laminação da mesma siderúrgica, estando diversas empresas envolvidas, dentre elas a WEG Automação, responsável pelo fornecimento de equipamentos elétricos e automação de ambos os sistemas.

Para o desenvolvimento do software em CLP foram utilizadas normas como a IEC-1131-3, foram desenvolvidas estratégias de controle para atender os requisitos de projeto, foram realizados testes modulares e de sistema, foi preparada uma estratégia para o comissionamento do *software* e sintonia dos controladores PID .

Na seqüência deste trabalho, é apresentada de forma estruturada e detalhada a caminhada que culminou com a concepção de um *software* de controle e instrumentação em CLP.

Abstract

The present monograph describes the software development and commissioning for the automation of the Belgo Mineira re-heating billet furnace, in Piracicaba - SP.

The furnace automation is part of a bigger project that includes the mill system automation. Several companies are involved, one of them is WEG Automação, responsible for providing the electrical equipment and automation for both systems.

Standards such as the IEC 1131-3 were used for the software development using PLC. Control strategies were developed to attend the project requirements, were done modular tests and system tests, was formulated a strategy for the software commissioning and PID controllers tuning.

Following, in a structured and detailed way, are the steps that culminated with the conception of the PLC control instrumentation software.

Sumário

1	Introdução.....	1
2	O Sistema de Laminação e Forno – Uma Visão Sistêmica.....	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Os Processos Siderúrgicos.....	4
2.3	O Projeto de Ampliação e Modernização da Siderúrgica Belgo Mineira.....	5
2.3.1	Empresas Envolvidas no Projeto.....	6
2.3.1.1	Morgan, Interfor, Simac.....	6
2.3.1.2	A Empresa WEG.....	7
2.4	Delimitação do Espaço Problema.....	9
2.5	Conclusão.....	9
3	Análise Detalhada do Funcionamento e Malhas de Controle do Forno de Reaquecimento.....	11
3.1	Introdução.....	11
3.2	Funcionamento do Forno.....	11
3.3	Arquitetura do Sistema.....	14
3.4	Características Técnicas dos <i>Softwares</i>	15
3.5	Análise das Malhas de Controle.....	16
3.5.1	Códigos de Referência.....	16
3.5.2	Características Gerais da Instrumentação.....	17
3.5.2.1	Medição de Vazão e Pressão.....	17
3.5.2.2	Medição de Temperatura com Termopares.....	18
3.5.2.3	Notas.....	18
3.5.3	Forno e Equipamentos.....	19
3.5.3.1	Descrição das Malhas de Controle.....	22
3.5.3.2	Lógica de Segurança do Forno.....	26
3.6	Análise Detalhada das Malhas de Controle.....	27
3.6.1	Controle das Zonas de Aquecimento.....	27

3.6.1.1	Controle da Temperatura na Zona.....	27
3.6.1.2	Controle da Vazão de Ar de Combustão.....	28
3.6.1.3	Controle de Vazão do Óleo Pesado.....	28
3.6.1.4	Controle de Ratio Ar / Combustível.....	29
3.6.1.5	Controle Cruzado de Vazão Ar / Combustível.....	29
3.6.2	Circuito de Pressão Ar de Combustão.....	31
3.6.3	Circuito Ar de Escape.....	32
3.6.4	Controle do Ar de Diluição.....	32
3.6.5	Controle de Mínima Temperatura dos Fumos Saída Recuperador.....	33
3.6.6	Controle de Pressão do Forno.....	33
3.6.7	Regulagem do Ar de Atomização.....	33
3.6.8	Alarmes.....	34
3.6.9	Entradas e Saídas.....	34
3.7	Conclusão.....	34
4	Implementação do Software.....	35
4.1	Introdução.....	35
4.2	Ferramentas Utilizadas.....	35
4.3	Metodologia de Desenvolvimento.....	36
4.3.1	Preparação.....	36
4.3.2	Programação.....	37
4.3.2.1	IEC 1131-3.....	37
4.3.2.2	Melhorias Iterativas.....	38
4.3.2.3	Nomenclatura de Variáveis.....	39
4.4	Estratégias.....	41
4.4.1	Controlador <i>On-Off</i>	41
4.4.2	Rampa.....	43
4.4.3	Controlador PID.....	47
4.4.3.1	Limites de Máxima e Mínima Abertura das Válvulas e Ajuste da Saturação da Ação Integral.....	49
4.4.3.2	<i>Bumpless</i> Manual / Automático e Automático / Manual	51
4.5	Generalidades.....	53

4.5.1	Comunicação via Rede.....	53
4.5.2	Segurança.....	54
4.5.2.1	Alarmes e Lógica de Bloqueio.....	54
4.5.2.2	Teste da Rede e <i>Watch-Dog</i>	54
4.5.3	Documentação.....	55
4.6	Conclusão.....	55
5	Testes e Comissionamento.....	56
5.1	Introdução.....	56
5.2	Validação e Testes.....	56
5.2.1	Teste de Fiação dos Painéis.....	56
5.2.2	Validação do <i>Software</i>	57
5.3	Sintonia de Controladores.....	60
5.3.1	O Método de Ziegler-Nichols.....	60
5.3.2	Caracterização de um Processo.....	62
5.3.3	Fórmulas de Ziegler-Nichols utilizando Parâmetros do Modelo de Primeira Ordem.....	65
5.3.4	Sintonia de Controladores com Dados Amostrados.....	66
5.4	Conclusão.....	67
6	Conclusão Geral.....	68
	Anexo 1 <i>Hardware</i> e <i>Software</i> de Programação.....	70
	Anexo 2 Lista de Pontos de Entrada e Saída.....	79
	Bibliografia.....	84

Capítulo 1: Introdução

Competição. Esta é a palavra que tem norteado a política de desenvolvimento da indústria brasileira desde a abertura de mercado para os produtos importados e a política de privatização, ambas iniciadas nesta década. A busca por competitividade tem levado a indústria nacional a perseguir excelência em qualidade e produtividade.

A siderúrgica Belgo Mineira não poderia tomar um rumo diferente e, em busca da qualidade e produtividade, tem investido na modernização e ampliação de seu setor de produção de aço laminado. Na unidade de Piracicaba – SP, está sendo implantado um novo trem de laminação. É parte deste grande projeto de ampliação a construção e comissionamento de um forno de reaquecimento de barras que alimentará a linha de laminação. Trata-se de um forno totalmente automatizado desde o intertravamento de operações de enforamento e desenforamento até o controle das variáveis de processo.

Nesta monografia são mostrados de forma estruturada os trabalhos desenvolvidos junto a empresa WEG Automação, responsável pela automação dos sistemas, que culminaram com a concepção de um software para CLP que efetuará o controle de vinte e duas malhas de controle PID e um controle *on-off*, atendendo a todos os requisitos de projeto.

A fim de atingir os objetivos propostos, este trabalho está dividido em seis capítulos (o primeiro é esta introdução), organizados da seguinte forma:

No segundo capítulo, procura-se apresentar uma visão sistêmica dos processos siderúrgicos e do projeto de modernização da laminação e forno de reaquecimento da siderúrgica Belgo Mineira, apresentando as empresas

envolvidas. Delimita-se o espaço problema deixando claro quais são as responsabilidades do formando e estagiário para com o projeto.

No capítulo três, descreve-se o funcionamento geral do forno de reaquecimento de barras. São apresentados os requisitos de *software* e *hardware* presentes na especificação técnica do projeto. São descritas detalhadamente as malhas de controle que compõem o projeto.

Em seguida, no capítulo quatro, são descritos os passos que foram seguidos para implementação do software de controle em CLP, destacando a metodologia empregada e as estratégias desenvolvidas para se cumprir os requisitos de projeto e de segurança.

No capítulo cinco, descreve-se os testes de *hardware* e de *software* realizados a fim de validar tanto os painéis elétricos que abrigam o CLP quanto o *software* de controle desenvolvido. Apresenta-se a estratégia que deverá ser utilizada para o comissionamento a frio e a quente do projeto. São explanadas as técnicas de sintonia de controladores PID que poderão ser utilizadas durante o comissionamento.

Por fim, é apresentada a conclusão que inclui uma revisão dos objetivos a serem alcançados e dos resultados obtidos. Abre-se perspectivas para novos trabalhos e faz-se uma análise crítica do que poderia ser aperfeiçoado. Procura-se evidenciar quais conhecimentos foram necessários para concepção do projeto mas que não são devidamente explorados no *curriculum* acadêmico.

Foram preparados apêndices onde se procura complementar as informações apresentadas nos capítulos. No apêndice um é feita uma breve descrição do *hardware* e do *software* de programação do CLP utilizado no projeto. No apêndice dois, é apresentada a lista dos pontos de entrada e saída utilizados no projeto de controle do forno de reaquecimento.

Telas desenvolvidas para o sistema supervisorio são apresentadas, no decorrer do trabalho, a título de ilustração.

ferro. Durante o processo é injetado oxigênio dentro da panela a fim de acelerar o processo de aquecimento. Coleta-se material ainda durante o processo de fundição. Este material é analisado e poucos minutos depois são adicionadas substâncias ao ferro fundido a fim de ajustar a composição química da batelada ao tipo de aço desejado.

2. O aço fundido é moldado continuamente em canaletas onde sofre um ligeira solidificação. Estas barras contínuas de aço alimentam o processo de lingotamento contínuo onde a barra é cortada em segmentos de aproximadamente 10 m de comprimento.
3. Estas barras, que têm uma seção transversal de 120mm x 120mm, devem alimentar o sistema de laminação. A laminação é um processo discreto de produção onde barras individuais são processadas. Porém, o processo anterior é um processo contínuo e se faz necessária a presença de um *buffer* a fim de que o ritmo de produção da laminação não interfira nos processos anteriores. Quando armazenadas, as barras resfriam. Sua temperatura cai a aproximadamente 300 °C. Como as barras precisam entrar no sistema de laminação a aproximadamente 1100 °C, precisa-se efetuar o reaquecimento das mesmas. Assim, o processo seguinte ao lingotamento contínuo é o reaquecimento das barras no forno de reaquecimento, que terá seu funcionamento detalhado mais adiante.
4. Saindo do forno de reaquecimento, as barras entram no trem de laminação. Na laminação, um sistema complexo de rolos (gaiolas) e tesouras se encarregam de estreitar, alongar e dar forma circular as barras. As barras, então, entram no leito de resfriamento onde sofrem novos processamentos. Em seguida, são armazenadas.

2.3 - O Projeto de Ampliação e Modernização da Siderúrgica Belgo Mineira

Fundada em 11 de dezembro de 1921, por meio de uma associação de empresários brasileiros com investidores europeus, a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira foi a primeira usina integrada a funcionar na América Latina. E, hoje, é líder de um conglomerado de 26 unidades, que está entre os 10 mais importantes grupos privados nacionais, com atuação nos setores de siderurgia e trefilação, mineração, reflorestamento e carvoejamento, arames especiais, cabos e serviços.

A usina siderúrgica Belgo Mineira, em Piracicaba, era a até pouco tempo controlada pelo grupo Dedini. Ao adquirir a usina, a Belgo se propôs a ampliar e modernizar sua linha de laminação visando o aumento de produtividade e qualidade e redução de custos de produção. A intenção da companhia com o projeto de modernização é aumentar a sua competitividade e incrementar a produção anual, estimada em 500 mil toneladas por ano. Nesta nova linha de produção, a Siderúrgica Belgo Mineira, vai fabricar vergalhões de aço liso e nervurado com bitolas de 6 a 32 mm, a uma velocidade de 32 m/s.

Hoje, está em fase final de construção, um novo forno de reaquecimento de barras e um novo trem de laminação que estão sendo construídos ao lado da linha antiga, que continua a produzir. Deste projeto estão de fora, por enquanto, a modernização da aciaria e do lingotamento contínuo por não se tratarem de gargalos na produção.

2.3.1 - Empresas envolvidas no Projeto

2.3.1.1 - Morgan, Interfor, Simac

A Morgan Construction Company, empresa americana, é um grande e respeitado fabricante de equipamentos mecânicos para siderurgia. Dentre seus equipamentos, destacam-se aqueles que são utilizados no processo de laminação. Além de fornecer estes equipamentos, fornecerá o *know-how* em laminação uma vez que já realizaram este tipo de projeto em vários outros países no mundo.

A Simac, empresa italiana, é responsável pelo fornecimento dos equipamentos mecânicos e automação do leito de resfriamento.

A Interfor, empresa localizada no estado de São Paulo, assumiu a responsabilidade pelo forno de reaquecimento. Ela é fornecedora tanto do *know-how*, quanto da estrutura física do forno, que tem tecnologia italiana.

2.3.1.2 – A Empresa WEG

Maior fabricante de motores elétricos da América Latina, a WEG foi fundada em setembro de 1961.

Sediada em Jaraguá do Sul (SC), dedica-se também aos segmentos de automação industrial, componentes elétricos, transformadores, geradores e tintas e vernizes industriais. Além de dois parques fabris em Jaraguá do Sul, há unidades fabris em Guaramirim (SC), Blumenau (SC) e Guarulhos (SP) e uma rede de revenda e assistentes técnicos distribuídos pelo Brasil e nos cinco continentes.

Visando a expansão e diversificação de produtos no ramo elétrico, eletrônico e químico e a fabricação de própria de componentes, em 1981, foi constituído o Grupo WEG, sendo participantes:

Sociedade de Comando:

- WEG SA.

Sociedades Controladas:

- WEG Motores Ltda.
- WEG Máquinas Ltda.
- WEG Acionamentos Ltda.
- WEG Automação Ltda.
- WEG Transformadores Ltda.
- WEG Química Ltda.
- WEG Exportadora S.A.

O compromisso com o desenvolvimento nos mercados interno e externo faz com que a WEG atue diretamente no fornecimento de pacotes industriais com integração de seus produtos.

E seguindo esta filosofia, a WEG é responsável pelo fornecimento do pacote elétrico para o projeto de modernização da Belgo Mineira. Fornecerá transformadores de 2000 KVA e 3000 KVA em 11,9 KV, motores CC de 23 KW, 55kW, 100kW, 400 KW e 750 KW, motores CA de 55 KW e 90 KW, conversores CA/CC de 125, 190, 256, 480, 1320, 1700 A, montados em painéis, conversores de frequência de 107 e 158 A, montados em painéis, controlador lógico programável com aproximadamente 2000 pontos de entradas e saídas, cubículos de média tensão de 11.9 KV, classe 15kV, centro de controle de motores e mesas de comando. Além destes produtos, a WEG, que está a frente do projeto, deverá fornecer todo o suporte em engenharia elétrica, instrumentação e integração dos equipamentos. Deste todo, a WEG Automação

está fornecendo os inversores, *drives*, painéis elétricos e automação, num pacote que envolve cerca de cinco milhões de dólares.

2.4 - Delimitação do Espaço Problema

O projeto de modernização da siderúrgica Belgo Mineira é algo com dimensões muito grandes em que um número elevado de técnicos, engenheiros e operários da construção civil estão envolvidos.

A parte deste projeto que está sobre responsabilidade da WEG Automação envolve cerca de 8 a 10 pessoas que estão trabalhando com dedicação exclusiva ao projeto a aproximadamente 7 meses, e outras 2 pessoas a 12 meses.

Existem três equipes com funções distintas: uma equipe que é responsável pela coordenação de todo o projeto. Outra equipe se dedica ao desenvolvimento dos *softwares* do supervisório, automação e controle do sistema de laminação. Uma terceira equipe é responsável pelo desenvolvimento dos *softwares* do sistema supervisório, automação e controle do forno de reaquecimento.

Dentro deste contexto, está sobre responsabilidade do acadêmico Mario Andrei Cologni o desenvolvimento do *software* para controle, em CLP, das malhas do forno de reaquecimento de barras da siderúrgica Belgo Mineira, unidade Piracicaba - SP.

2.5 – Conclusão

Apresentou-se o projeto de ampliação e modernização da siderúrgica Belgo Mineira, e as empresas envolvidas.

O espaço problema foi delimitado e as responsabilidades do acadêmico explicitadas.

Pode-se partir, agora, para a apresentação do forno de reaquecimento e para uma análise detalhada da instrumentação e controle do mesmo.

Capítulo 3: Análise Detalhada do Funcionamento e Malhas de Controle do Forno de Reaquecimento

3.1 - Introdução

Este capítulo inicia com uma descrição geral e rápida do funcionamento do forno de reaquecimento.

Em seguida, especifica e define as características principais dos *softwares* para controle de um forno de reaquecimento de tarugos de 90 t/h do tipo empurrador, para a Belgo Mineira, usina de Piracicaba - SP.

Baseia-se nas especificações técnicas da instrumentação e controle fornecidas pela Interfor, que por sua vez baseou-se na experiência acumulada pela empresa e nos dados existentes no Memorial Descritivo da Engenharia Básica, Rev. 0 , março 1998.

Cabe ressaltar que alguns dados são omitidos propositadamente em função do sigilo de informações sobre tecnologia industrial.

3.2 - Funcionamento do Forno

O material a ser movimentado é denominado de carga.

A carga a ser reaquecida no forno é constituída de tarugos (ou barras) com seção quadrada 120 x 120 mm, com comprimento de 9.000 a 10.000 mm, peso de cerca de 1100 kg, com temperatura de enforamento de 20 a 500 °C.

A ponte rolante deposita os tarugos a serem enfiados em uma mesa.

Para carregar a grelha de carregamento é utilizado o transferidor de tarugos que retira os tarugos da mesa e os deposita sobre a grelha em uma única fila.

Os tarugos depositados na grelha de enfiamento, são deslocados para as mesas de rolos por meio de correntes transportadoras arrastadoras tipo *dog beam*.

Os tarugos são encaminhados ao forno através das mesas de rolos.

As seguintes operações devem ser executadas no carregamento do forno:

- deslocamento dos tarugos de um passo pela grelha
- transferência dos tarugos para as mesas de rolos com o auxílio do mecanismo de espera
- posicionamento dos tarugos
- enfiamento pelo empurrador.

Ao enfiar um tarugo o empurrador desloca toda a carga existente dentro do forno. Existem 195 posições possíveis dentro do forno.

A temperatura é controlada. O forno é dividido em 3 zonas de aquecimento, cada qual com suas 5 malhas de controle PID. Existem ainda 6 malhas de controle PID e um *on-off* que fazem parte de uma zona comum.

O tarugo é aquecido e chega a região de desenfiamento onde são realizadas as seguintes operações:

- operação das portas de desenfiamento

- posicionamento transversal da *Peel Bar* (ou desenfornadeira)
- desenformamento pelo avanço da *Peel Bar*

A figura 3.1 é uma tela do sistema supervisor e ilustra uma visão geral do forno.

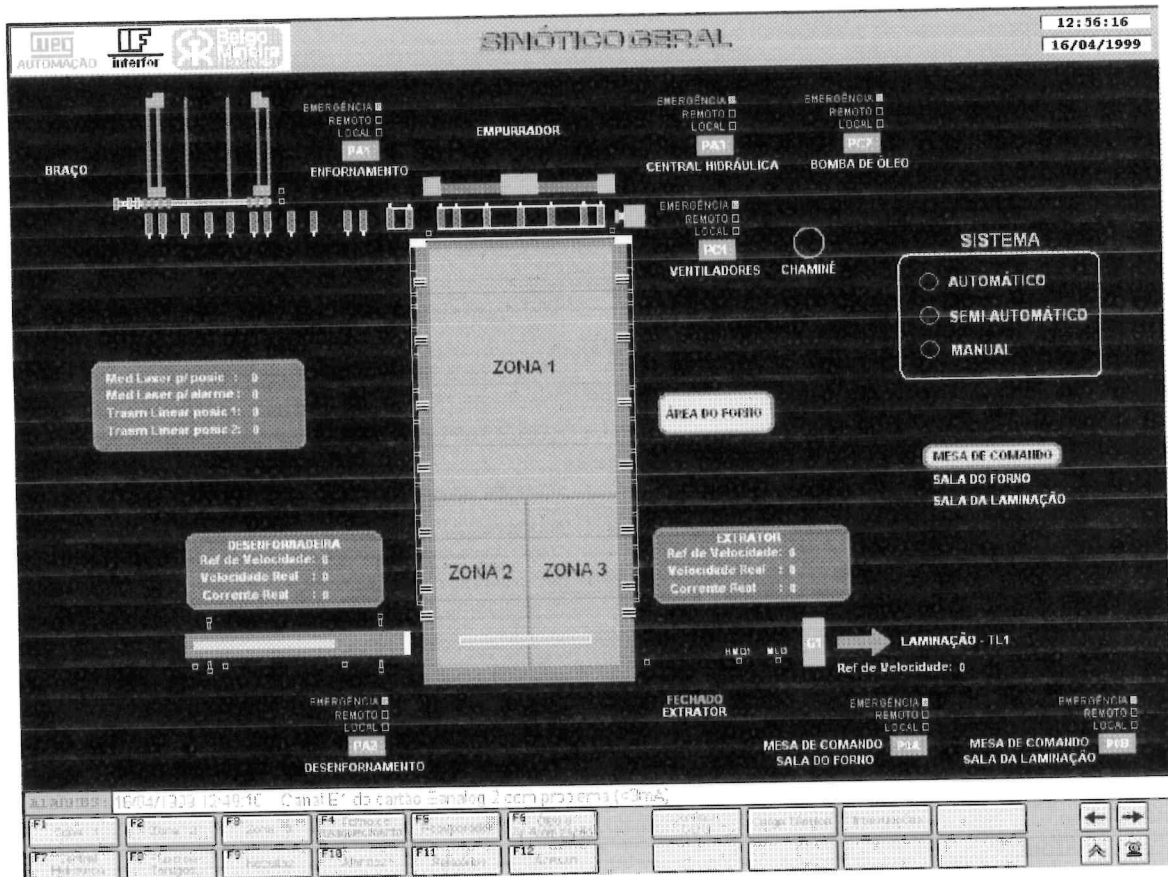


Figura 3.1: Sinótico Geral do Forno

Para automação deste sistema é utilizado um CLP Bosch CL 400, responsável basicamente pelas operações de intertravamento do sistema. Três CLP's Saia PCD2 são responsáveis pelo controle das malhas das zonas de aquecimento e da zona comum.

3.3 - Arquitetura do Sistema

Para a função de controle regulatório da instrumentação necessária à operação do forno, são utilizados três controladores Saia PCD2, que operam em conjunto com um controlador lógico programável Bosch CL 400, responsável pela automação, instalados em um Painel de Controle que também fornece alimentação para os transmissores da instrumentação.

Para permitir a supervisão e operação do controle é utilizado uma console, com elementos de comando para operação do forno em manual, contendo também um microcomputador IBM-PC compatível, com o software de supervisão. Esta console está instalada na sala de controle do forno. Uma segunda console semelhante a esta, porém sem o microcomputador, está instalada na sala de controle do laminador, com o intuito de permitir maior flexibilidade operacional. Apenas uma das consoles estará em operação.

Uma rede de comunicação de dados multi-mestre, padrão Profibus interliga os controladores, o PLC e as consoles.

É apresentado na figura 3.2 um diagrama mostrando a arquitetura proposta ao sistema de automação do forno. Uma rede Profibus FMS interliga os três CLP's Saia ao sistema supervisório e ao CLP Bosch CL 400 (responsável pelo controle do intertravamento de funcionamento do forno). Uma rede Profibus DP interliga as unidades remotas ao CLP Bosch CL 400. Conforme colocado anteriormente, é responsabilidade do acadêmico a programação dos três CLP's Saia que efetuaram o controle regulatório das malhas do forno.

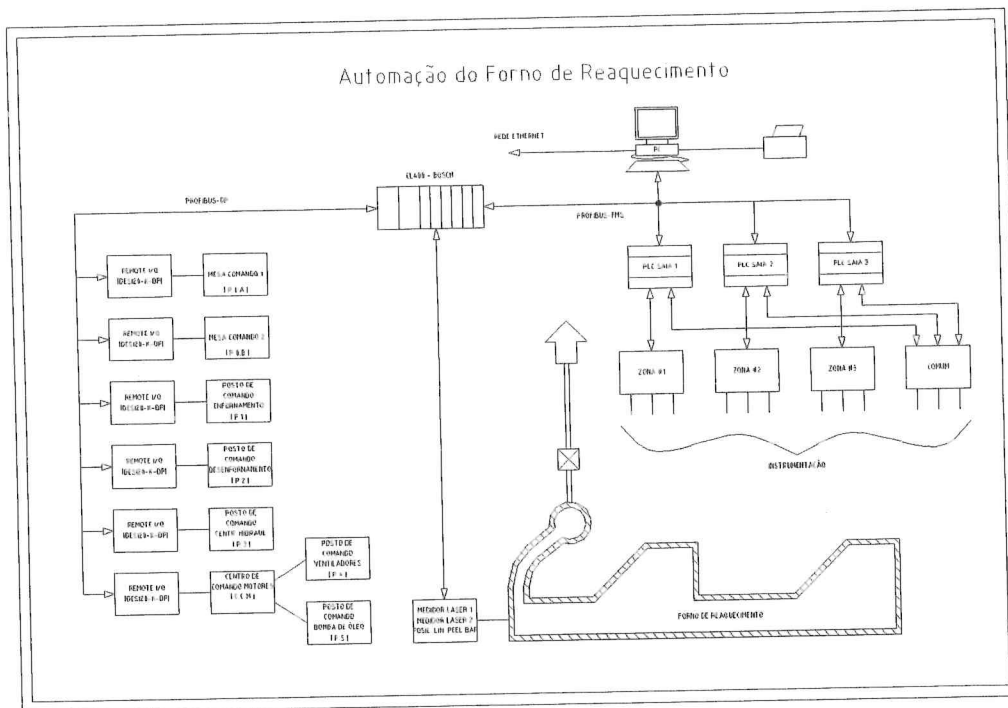


Figura 3.2: Arquitetura do Sistema

3.4 – Características Técnicas dos Softwares

O software básico deve ser do tipo com blocos funcionais de controle, e além de atender a especificação técnica deve possuir:

- Extração de raiz quadrada das entradas analógicas
- Totalização de pulsos para algumas entradas digitais
- Linearização
- Controle PID
- Compensação de pressão e temperatura
- Blocos aritméticos permitindo as 4 operações
- Totalização
- Controle ON-OFF
- Seletor de maior e menor
- Temporização

- Limitação de variáveis com alarme
- Alarme
- Seleção local / remoto
- Estação automático / manual.

Os CLP's Saia devem efetuar o controle das variáveis provenientes do campo, executando o controle regulatório do processo.

3.5 – Análise das Malhas de Controle

Todas as funções de controle são executadas em PLC e o operador, auxiliado por um sistema supervisório, pode controlar e comandar todo o equipamento.

3.5.1 - Códigos de Referência

Todos os instrumentos e malhas de controle e regulação estão numerados pelo procedimento da tabela 3.1.

Os instrumentos são assim identificados:

AAA X YY, onde:

AAA Código do Instrumento (Campo Alfa numérico)¹

X Item do Forno (Campo Numérico)

YY Número Progressivo (Campo Numérico)

Exemplos - TIC - 1.01 Controlador de temperatura da zona 1

¹ O significado deste código pode ser encontrado em manuais ou livros que tratam de códigos utilizados em instrumentação.

- FIC – 2.02 Controlador de vazão de ar de atomização zona 2
- PIC – 4.01 Controlador de pressão do forno
- TE - 1.01 Termopar da zona 1
- PT – 4.02 Transmissor de pressão do ar de combustão

ITEM	DESCRIÇÃO
1	Zona 1 – Aquecimento
2	Zona 2 - Encharque Direita (do fluxo de material)
3	Zona 3 - Encharque Esquerda (do fluxo de material)
4	Pressão do Forno, Canal de Fumos e Ar de Combustão/Diluição/Indução
5	Óleo Pesado e Diesel
6	Ar Comprimido Instrumentação / Atomização
7	Água de Resfriamento
8	Gás Natural
9	Outros

Tabela 3.1: Códigos de Referência da Instrumentação

3.5.2 - Características Gerais da Instrumentação

3.5.2.1 - Medição de Vazão e Pressão

As medições de vazão de Ar e Gás Natural são executadas por placas de orifício conectadas a transmissores de ΔP . A extração da raiz quadrada é feita no transmissor.

O sinal de saída do transmissor é 4 a 20 mA (técnica a dois fios).

As medições de vazão de óleo pesado são executadas por medidores volumétricos com sinal de saída de 4 a 20 mA.

As medições de pressão são executadas com transmissores de pressão manométrica, com sinal de saída de 4 a 20 mA.

O transmissor de pressão do forno é de banda baixa e mede diferencial de pressão ΔP com saída de 4 a 20 mA.

3.5.2.2 - Medição de Temperatura com Termopares

O sinal proveniente do termopar em mV chega ao transmissor de temperatura de campo, por meio de uma junta fria compensada que converte os mV em um sinal de 4 a 20 mA.

- Termopares tipo S (para a faixa de 0 até 1.600 °C) para as zonas do forno e fumos antes do recuperador;
- Termopares tipo K (para a faixa de 0 até 1.000 °C) para os fumos após recuperador e ar de combustão ;
- Termoresistência Pt 100 Ω (para a faixa de 0 até 300 °C) para óleo pesado e ar comprimido atomização.

3.5.2.3 - Notas

1. No caso de ruptura de termopar, o sinal proveniente do transmissor de temperatura vai até o fundo de escala ($I > 20$ mA). O sistema de controle identifica a ocorrência da falha e dá alarme de ruptura do termopar.
2. Os contatos de campo, referentes aos bloqueios e alarmes, em condições normais de operação estão fechados . Quando alarmados estão abertos.

3.5.3 - Forno e Equipamentos

O forno é dividido nos seguintes circuitos:

1. Sistema de Controle de Combustão (método de controle de temperatura) em cascata com o controle da razão (*ratio*) de combustão com duplo limite cruzado ;
2. Controle da Pressão do Forno;
3. Controle da Temperatura dos Fumos, pela regulação do ar de diluição;
4. Controle da Pressão Ar de Combustão;
5. *By-Pass* Recuperador de Ar por Baixa Temperatura dos Fumos;
6. Ar de Escape por Alta Temperatura do Ar de Combustão;
7. Controle da Temperatura Ar Atomização;
8. Controle da Temperatura Óleo Pesado Linha;
9. Controle da Temperatura Óleo Pesado Tanque;
10. Controle de Temperatura do Ar de Atomização.

As figuras 3.3 e 3.4 ilustram telas do sistema supervisório com as malhas que compõem a zona comum.

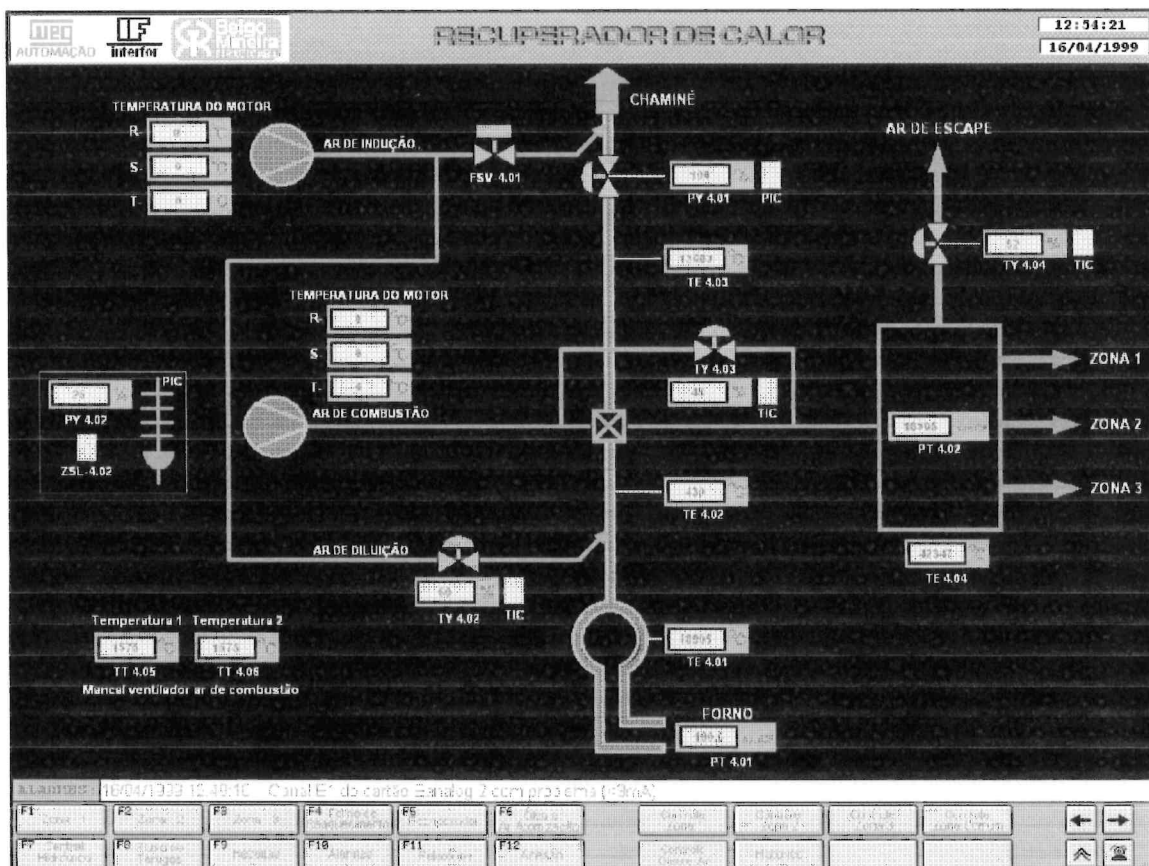


Figura 3.3: Malhas da Zona Comum – Recuperador de Calor

As zonas de Aquecimento do Forno são:

- Zona 1 – Pré-aquecimento
- Zona 2 - Encharque Direita
- Zona 3 - Encharque Esquerda

Cada zona é constituída de tubulação independente para:

1. Ar de Combustão Aquecido;
2. Ar Comprimido de Atomização;
3. Óleo Pesado;
4. Gás Natural.

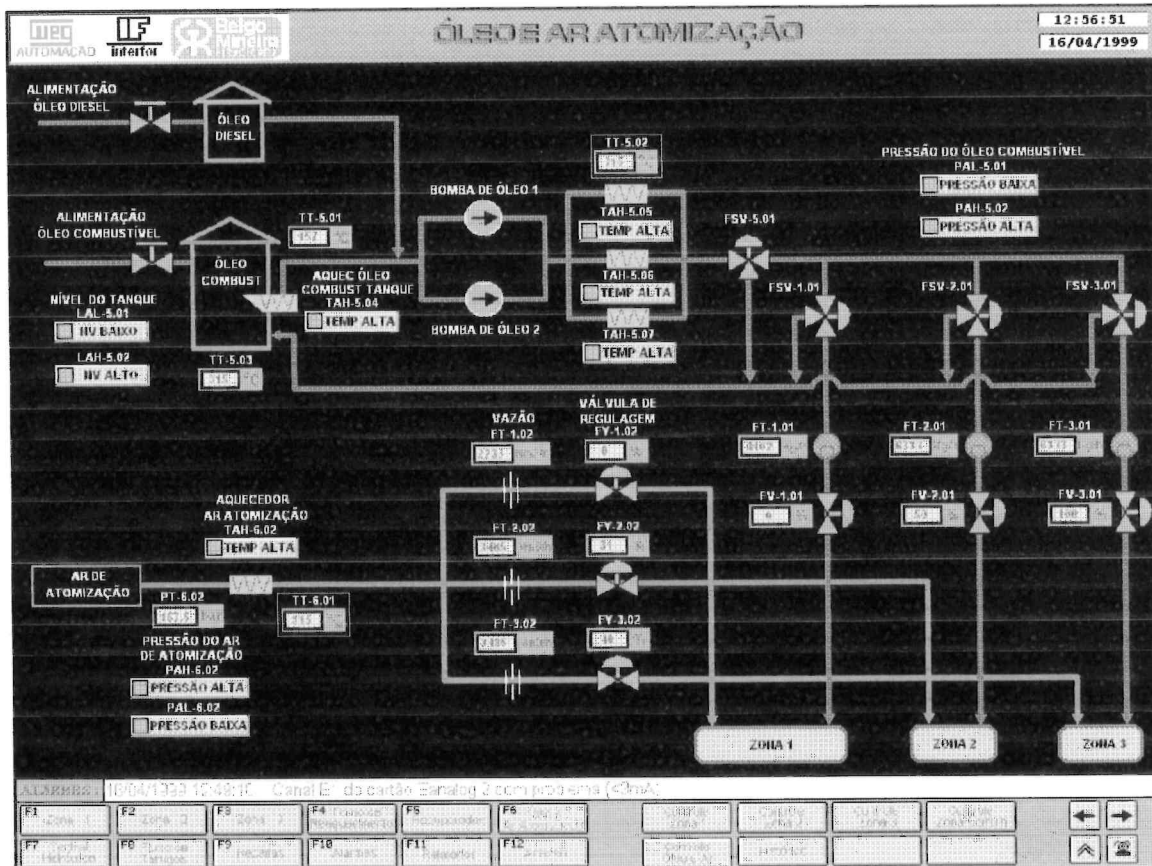


Figura 3.4: Zona Comum – Óleo e Ar de Atomização

Nota: Inicialmente é previsto o funcionamento do forno somente com óleo e em futuro próximo ele operará com gás natural e poderá operar em emergência com óleo leve OC4. O forno operará com um único combustível de cada vez em cada uma das zonas.

A figura 3.5 ilustra uma tela do sistema supervisorío que representa as malhas da zona 1 de aquecimento.

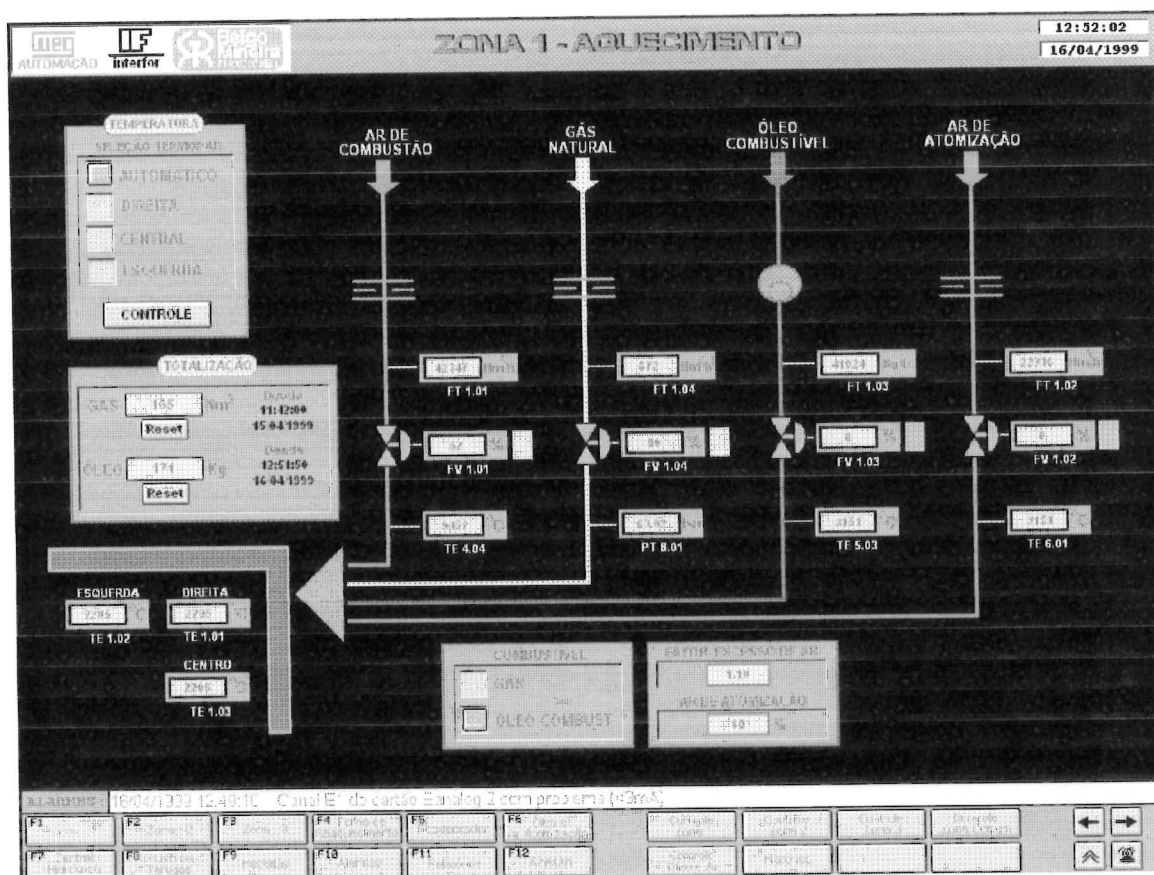


Figura 3.5: Zona 1 - Aquecimento

3.5.3.1 - Descrição das Malhas de Controle

a) Circuito Ar de Combustão

Consiste de:

- 1 ventilador ar de combustão;
- 1 *damper* de controle de pressão do ar (PV - 4.02) equipado com atuador pneumático e com sensor de indicação de *damper* fechado;
- 1 transmissor de pressão do ar de combustão (PT - 4.02) calibrado em 0 a 1.200 mm.ca.;

- 1 válvula de controle de *by-pass* (TV - 4.03), equipada com atuador pneumático;
- 1 termopar tipo K (TE - 4.03).
- 1 transmissor de temperatura (TT - 4.03)
- 1 controlador de temperatura com algoritmo PID (TIC - 4.03)
- 1 controlador de pressão com algoritmo PID (PIC - 4.02)

b) Circuito Ar de Escape

Consiste de:

- 1 termopar tipo K (TE - 4.04);
- 1 transmissor de temperatura (TT - 4.04);
- 1 válvula de controle (TV - 4.04) equipada com atuador pneumático.
- 1 controlador de temperatura com algoritmo PID (TIC - 4.04)

c) Circuito Ar de Diluição

Consiste de:

- 2 termopares tipo S (TE - 4.01/4.02);
- 2 transmissores de temperatura (TT - 4.01/4.02);
- 1 válvula de controle (TV - 4.02) equipada com atuador pneumático;
- 1 controlador de temperatura com algoritmo PID (TIC - 4.02).

d) Pressão Forno

Consiste de:

- 1 transmissor de pressão forno (PT - 4.01) com saída 4 a 20 mA e a dois fios;

- 1 válvula de controle pressão forno (PV - 4.01) equipada com atuador pneumático;
- 1 controlador de pressão com algoritmo PID (PIC - 4.01).

e) Ar de Atomização

Consiste de:

- 1 termoresistência (TE - 6.01);
- 1 transmissor de temperatura (TT - 6.01);
- 1 controlador de temperatura com algoritmo PID (TIC - 6.01);
- 1 conversor estático para regulação do aquecimento das resistências elétricas (no Painel Elétrico de Força);
- 1 transmissor de pressão (PT - 6.02);

f) Óleo Pesado Tanque

Consiste de:

- 1 termoresistência (TE - 5.01);
- 1 transmissor de temperatura (TT - 5.01);
- 1 controlador de temperatura ON-OFF (TIC - 5.01);

g) Óleo Pesado Linha

Consiste de:

- 1 termoresistência (TE - 5.02);
- 1 transmissor de temperatura (TT - 5.02);
- 1 controlador de temperatura com algoritmo PID (TIC - 5.02);

- 1 conversor estático para regulagem do aquecimento das resistências elétricas (no Painel Elétrico de Força);

h) Equipamentos para as zonas de Controle

Para a zona 1 são utilizados os seguintes instrumentos:

- 3 termopares tipo S (TE - 1.01/1.02/1.03);
- 3 transmissores de temperatura (TT - 1.01/1.02/1.03);
- 1 controlador de temperatura com algoritmo PID (TIC -1.01);
- 1 placa de orifício de medição ar de combustão (FE - 1.01);
- 1 transmissor de vazão do ar de combustão a dois fios e saída 4 a 20 mA (FT - 1.01);
- 1 controlador de vazão ar de combustão com algoritmo PID (FIC - 1.01);
- 1 válvula de controle de ar de combustão (FV - 1.01) equipada com atuador pneumático e conversor I/P (FY - 1.01);
- 1 placa de orifício de medição do ar comprimido (FE - 1.02)
- 1 transmissor de vazão do ar comprimido a dois fios e saída 4 a 20 mA (FT - 1.02);
- 1 controlador de vazão do ar comprimido com algoritmo PID (FIC - 1.02);
- 1 válvula de controle de ar comprimido (FV - 1.02) equipada com atuador pneumático e conversor I/P (FY - 1.02);
- 1 medidor volumétrico para óleo pesado (FE - 1.03)
- 1 controlador de vazão de óleo pesado com algoritmo PID (FIC - 1.03)
- 1 válvula de controle de óleo pesado (FV - 1.03) equipada com atuador pneumático e conversor I/P (FY - 1.03);
- 1 placa de orifício de medição de gás natural (FE - 1.04);

- 1 transmissor de vazão do gás natural a dois fios e saída 4 a 20 mA (FT - 1.04);
- 1 controlador de vazão gás natural com algoritmo PID (FIC - 1.04);
- 1 válvula de controle de gás natural (FV - 1.04) equipada com atuador pneumático e conversor I/P (FY - 1.04);

As zonas 2 e 3 possuem 2 termopares. Cada termopar tem um transmissor de temperatura. Os demais instrumentos das zonas 2 e 3 são análogos aos da zona 1.

Os termopares TE - 1.03, TE - 2.02, TE - 3.02 são utilizados para indicação da temperatura no meio de cada uma das zonas físicas do forno. Estes termopares estão montados no teto do forno.

Os controladores de *ratio* para combustível e ar de combustão (FIC - 1.03/ FIC -1.04 e FIC - 1.01), são interligados entre si por meio de um software de “duplo limite cruzado” que não permite a abertura das válvulas dos combustíveis independentemente da do ar de combustão. Assim durante a variação da demanda energética aos queimadores assegura-se que sempre uma mistura com excesso de ar chegue aos queimadores, excluindo-se a possibilidade que gases não queimados cheguem ao forno.

A lógica de bloqueio intervém para fechar automaticamente as válvulas de ar e combustível.

3.5.3.2 - Lógica de Segurança do Forno

A lógica de segurança do forno é totalmente automática e executada nos *softwares* dos CLP's.

Existe uma tabela de bloqueios que indica em que situações (alarmes) uma determinada válvula deve ser fechada ou aberta.

3.6 - Análise Detalhada das Malhas de Controle

3.6.1 - Controle das Zonas de Aquecimento

3.6.1.1 - Controle da Temperatura da Zona

O controle da temperatura da zona é executado por meio de três termopares na zona 1 e por dois termopares nas zonas 2 e 3.

O termopar de controle é automaticamente selecionado através de um seletor de máximo sinal. A seleção também pode ser feita pelo operador através do seletor manual.

No caso de falha de um termopar, o seletor comuta o sinal para o proveniente do termopar operacional.

O controlador de temperatura TIC utiliza algoritmo PID de modo a manter a temperatura no *set point* estabelecido pelo operador.

A operação pode ser manual ou automática.

O sinal de saída do controlador TIC correspondendo à demanda energética da zona, entra como *set point* de vazão no limite cruzado de ar e combustível, em cascata com o controlador de temperatura.

Os controladores deverão conter as seguintes funções:

1. Algoritmo PID ajustável on-line;

2. Limites ajustáveis on-line, de mínima e máxima abertura das válvulas de controle;
3. Limites ajustáveis on-line, do ajuste de saturação da integral;
4. Taxa de variação do *set point* ajustável permitindo um aquecimento sem choques no material e agilizando as operações, evitando assim, taxas de aquecimento não previstas para os refratários e o próprio material;
5. No caso do bloqueio do forno o sinal de saída do controlador deve ser forçado a zero;
6. A passagem “automático – manual” e “manual – automático” nos controladores deve ser *bumpless*;
7. Alarme de desvio de *set point*;
8. Alarme de temperatura alta

3.6.1.2 - Controle da Vazão de Ar de Combustão

A medição da vazão do ar de combustão é obtida através de placa de orifício calculada a uma pressão e temperatura de referência.

A pressão do ar de combustão é mantida constante por meio do controle de pressão do ar de combustão.

A temperatura do ar é variável (de 20 a 460 °C) e portanto deve ser corrigida no CLP.

3.6.1.3 - Controle de Vazão do Óleo Pesado

A medição da vazão do óleo pesado em cada zona é executado por meio de medidor volumétrico com transmissor incorporado.

3.6.1.4 - Controle de *Ratio* Ar/Combustível

A relação estequiométrica segue uma curva calculada automaticamente em função da vazão.

O operador entra com um valor entre 0 e 50% indicativos de excesso de ar.

3.6.1.5 - Controle Cruzado de Vazão Ar/ Combustível

Este controle operara conforme à seguir:

Ratio

Os controles de vazão de ar e combustível são ligados entre si de acordo com uma relação acessível ao operador.

Notas:

A posição fechada da válvula de controle de vazão do ar de combustão é limitada no controlador de modo a permitir uma mínima vazão de ar mesmo com a válvula fechada.

A posição fechada das válvulas de controle de vazão de combustível são limitadas no controlador de modo a permitir uma vazão mínima e assim prevenir o retorno de chama.

Limite Cruzado

A medição da vazão do ar de combustão para a relação ar/combustível é comparada com o *set point* de vazão ar da zona. O resultado desta comparação determina o *set point* do controlador de vazão do combustível.

A medição de vazão dos combustíveis é comparada com o *set point* da vazão de combustível da zona. O resultado desta comparação determina o *set point* do controlador de vazão do ar de combustão.

Os controladores de ar e combustível estão em cascata com o controlador de temperatura da zona.

Modos de Operação

As zonas do forno operam nos seguintes modos:

- Modo Automático;
- Modo Manual.

Zona em Operação Automática

Uma zona opera em automático quando todos os controladores (temperatura, vazões de ar de combustão e de atomização, e vazão de combustível) estiverem em automático.

Em caso de seleção manual de somente um dos controladores de vazão de ar ou combustível, o controlador que permanecer em automático, seguirá o que foi selecionado em manual, seguindo a lógica de limite cruzado e as relações estequiométricas.

A figura 3.6 ilustra os controladores da zona 1 de aquecimento.

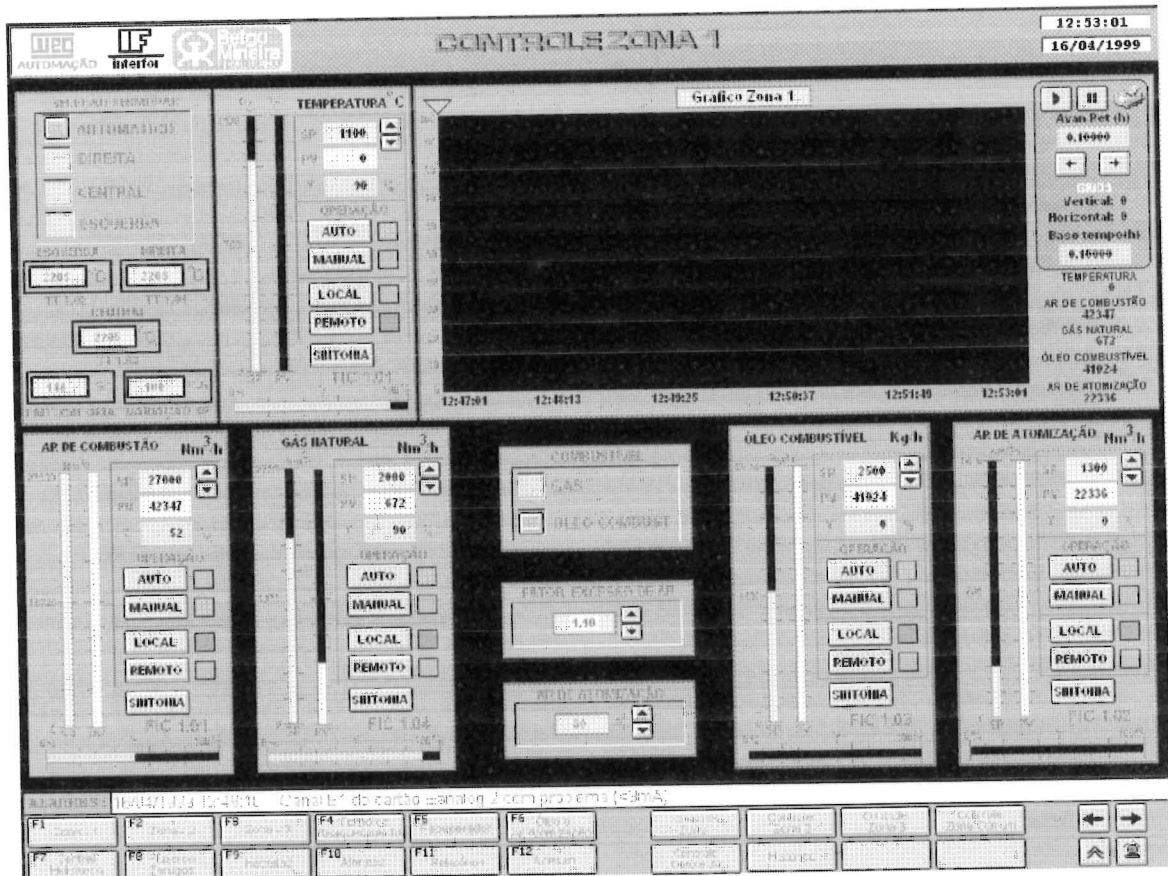


Figura 3.6: Controle da Zona 1

3.6.2 - Circuito de Pressão Ar de Combustão

Somente é possível partir o ventilador quando o *damper* na sucção estiver fechado (ZSL - 4.02 fechado).

A pressão do ar de combustão deve ser sempre mantida constante.

O sinal proveniente do transmissor de pressão do ar de combustão (PT - 4.02), é enviado diretamente ao controlador da pressão do ar de combustão (PIC - 4.02).

O sinal de saída do controlador atua através de conversores eletro-pneumáticos (PY-4.02), e o movimento do cilindro pneumático, coloca o *damper* na posição percentual de abertura correta .

3.6.3 - Circuito Ar de Escape

A proteção do recuperador de calor contra sobre-temperatura de aquecimento do ar é feita permitindo a passagem adicional de ar frio pelo recuperador de calor do ar de combustão.

Um termopar (TE - 4.04), é montados no coletor de ar.

O sinal de controle é enviado ao controlador de temperatura (TIC - 4.04), o qual dá a posição da válvula de controle (TV - 4.04) necessária à segurança do recuperador.

O sinal de temperatura é enviado aos controles das zonas para a correção das vazões de ar.

3.6.4 - Controle do Ar de Diluição

A proteção do recuperador de calor contra sobre-temperatura dos gases queimados é feita injetando-se ar frio no canal de fumos, antes do recuperador, proveniente de um ventilador centrífugo também usado para indução da chaminé.

Um termopar (TE - 4.02), montado no canal de gases queimados, manda o sinal a um controlador de temperatura (TIC - 4.02) que fornece a posição desejada da válvula (TV - 4.02) de acordo com o *set point* de temperatura.

3.6.5 - Controle de Mínima Temperatura Fumos Saída Recuperador

A proteção do recuperador para baixas temperaturas dos gases queimados serve para evitar a corrosão do mesmo.

O termopar (TE - 4.03), montado no canal de gases queimados após o recuperador de ar, manda o sinal a um controlador de temperatura (TIC - 4.03) que fornece a posição desejada da válvula de *by-pass* (TV - 4.03) de acordo com o *set point* de temperatura.

3.6.6 – Controle de Pressão do Forno

Este controle é necessário para ter-se uma pressão levemente positiva dentro do forno (alguns mmca)., para evitar a entrada de ar frio.

A pressão interna do forno é mantida constante a aproximadamente + 2 mm.ca., por meio de uma malha de controle que contém um transmissor de pressão (PT - 4.01), um controlador de pressão (PIC - 4.01) e uma válvula de controle (PV - 4.01), localizada antes da chaminé e após o recuperador de calor.

3.6.7 - Regulagem Ar de Atomização

O ar de atomização é o ar utilizado para borrifar o óleo pesado nos queimadores.

O controle da vazão do ar de atomização durante a operação com óleo pesado é executado caracterizando o sinal de vazão de óleo e enviando-o como *set point* do controlador da vazão do ar de atomização.

O *set point* de vazão do ar de atomização é função da vazão de óleo pesado multiplicado por um fator de ajuste do ar de atomização.

Novamente, assim como ocorrera com a vazão de ar de combustão, a leitura de vazão do ar de atomização deve ser corrigida em função da temperatura e pressão do mesmo.

3.6.8 - Alarmes

Acompanha cada malha de controle apresentada uma série de alarmes que devem ser detectados e devem ser disponibilizados a todo o sistema a fim de se tomar as ações necessárias. Alguns alarmes são entradas digitais no CLP e outros são provenientes de alguma lógica que deve ser implementada no CLP.

3.6.9 - Entradas e Saídas

Os pontos de entrada e saída para se efetuar o controle do forno são apresentados em anexo. Formam um total de aproximadamente 70 pontos analógicos e 40 digitais.

3.7 - Conclusão

Apresentou-se neste capítulo uma descrição detalhada das malhas de controle que constituem o sistema forno de reaquecimento de barras. Juntamente, foram apresentado os requisitos que devem se satisfeitos pelo sistema de controle.

Pode-se dizer que as especificações fornecidas pela empresa Interfor são praticamente completas e favorecem a implementação do respectivo *software* até mesmo para quem não domina o processo.

Capítulo 4: Implementação do *Software*

4.1 - Introdução

No capítulo anterior abordou-se a especificação técnica do projeto. Os requisitos de *software* e de controle foram colocados. Neste capítulo apresenta-se a metodologia empregada e as técnicas desenvolvidas para se atingir esses requisitos de projeto.

A estratégia de controle PID e *on-off* será colocada. Apresentar-se-á, também as técnicas utilizadas para implementação da rampa e para se resolver o problema da saturação da ação integral do controlador PID.

4.2 – Ferramentas Utilizadas

Para realizar as tarefas relacionadas ao controle das malhas do forno de reaquecimento foi escolhido, pela empresa WEG Automação, o CLP Saia (ver anexo 1) .

Trata-se de um CLP bastante confiável para aplicações de médio porte. Sua grande vantagem em relação aos CLP's de outros fabricantes está na vantajosa relação custo / benefício.

Como se isso não bastasse, trata-se de um CLP muito poderoso no aspecto de manipulação de variáveis analógicas.

A ferramenta de programação do CLP Saia tem um ambiente bastante agradável de se trabalhar. Conta com uma grande biblioteca de blocos de

função (um requisito de projeto) que contemplam todos os requisitos de software tais como tratamento de variáveis do tipo booleanas, tipo inteiro e ponto-flutuante, extração de raiz quadrada, etc.

A documentação gerada pelo ambiente de programação é completa, contendo o programa propriamente dito, cabeçalho (onde constam o nome da empresa, nome do programador, nome do programa, data, etc.), comentários tanto das páginas de programação como dos blocos de função utilizados e uma lista de recursos (variáveis utilizadas).

O CLP Saia é capaz de se comunicar com os outros equipamentos presentes no projeto (PC contendo *software* supervisorio, CLP Bosch e demais CLP's Saia) via rede Profibus FMS.

4.3 – Metodologia de Desenvolvimento

4.3.1 – Preparação

A preparação para o início dos trabalhos compreendeu um estudo da política de qualidade utilizada pela empresa e um estudo das normas internas e procedimentos para o projeto, elaboração e confecção de *softwares* [Nomas Weg 96].

Em seguida, estudou-se a norma IEC 1131-3 que discursa sobre a padronização das técnicas de programação em CLP's [Lewis 95].

O passo seguinte de preparação foi a concepção de uma bancada de testes contendo fonte, chaves e botões. Estes equipamento poderia abrigar um CLP Saia e mostrou-se bastante útil no treinamento realizado para programação do mesmo.

O passo seguinte consistiu num estudo detalhado da especificação técnica visando o conhecimento do sistema a ser automatizado. Buscou-se o entendimento das diversas malhas de controle no que diz respeito a estratégias e instrumentação utilizadas.

4.3.2 – Programação

Os requisitos dos controles industriais mudaram bastante, aumentando as exigências para os softwares que não mais possuem 100 linhas e sim 10000 linhas. Este fato aumenta a possibilidade da existência de erros e torna os teste completos praticamente impossíveis. Criar um programa deixou de ser uma tarefa executada por apenas uma pessoa e passou a ser responsabilidade de uma equipe multi-disciplinar. Com o aumento de requisitos, a instalação, a manutenção, as melhorias e os aperfeiçoamentos se tornaram uma parte essencial do ciclo de vida do controle, e o software ocupa uma posição de importância em tudo isso [PLCopening 98].

O software tem representado um fator de grande importância para a qualidade de um produto. Erros de software podem acarretar uma grande perda nos investimentos e uma grande perda de tempo.

4.3.2.1 - IEC 1131-3

IEC 1131-3 é a única padronização global de programação para controle industrial [PLCopening 98].

A IEC 1131-3 direciona a maneira com que as pessoas projetam e operam o software pela normalização de uma interface de programação. Uma interface de programação normalizada permite que pessoas com diferentes habilidades e conhecimentos criem diferentes elementos de um programa durante as diferentes fases do ciclo de vida de um software: especificação,

projeto, implementação, teste, instalação e manutenção. Permite que todas as partes se encaixem em uma estrutura comum e que funcionem juntas de maneira harmoniosa.

O padrão inclui a definição da linguagem Grafcet (*Sequential Function Chart - SFC*), usada para organizar a estrutura interna de um programa, e mais quatro linguagens interoperacionais: Lista de Instruções (*Instruction List - IL*), Diagrama de Escadas (*Ladder Diagram – LD*), Blocos de Função (*Function Block - FB*) and Texto Estruturado (*Structured Text - ST*) [Lewis 95].

Pela decomposição em elementos lógicos, modularização e modernas técnicas de software, cada programa elaborado utilizando o padrão IEC 1131-3 é bastante estruturado, aumentando a re-usabilidade, reduzindo erros a aumentando a eficiência do programa e do usuário [PLCopening 98].

Para este projeto foi utilizada a programação em blocos de função, conforme solicitado na especificação do projeto.

4.3.2.2 – Melhoria Iterativas

Os requisitos para o projeto não estavam completamente decididos antes de se iniciar o desenvolvimento do *software*.

Este fato levou que, naturalmente, fosse adotada o método de melhorias iterativas para o desenvolvimento do *software*.

O método de melhoria iterativas baseia-se na idéia do desenvolvimento incremental do software; cada incremento adiciona alguma funcionalidade. A cada passo, extensões e modificações de projeto podem ser feitas [Pressman 95].

A vantagem do método está no ponto de vista do teste, pois é mais fácil testar cada pedaço que o software inteiro. Uma outra vantagem: o incremento fornece *feedback* ao cliente como na prototipagem e permite melhorar requisitos [Pressman 95].

Inicialmente, partiu-se para implementação de parte do problema total (aspectos chaves do problema, fáceis de entender e implementar).

Planejou-se os passos a serem seguidos. Criou-se uma lista de controle de projeto que contenha todas as tarefas a serem realizadas até a implementação final.

Para o desenvolvimento do *software* do projeto, cada passo foi detalhadamente planejado. Partindo-se das funções básicas que eram desenvolvidas e depois integradas, chegou-se a um software que contempla os requisitos macro do projeto (*bottom-up*) [Pressman 95].

Importante salientar que a cada passo, testes modulares eram realizados simulando todas as situações possíveis de funcionamento.

4.3.2.3 – Nomenclatura de Variáveis

Visando a padronização dos *softwares* do projeto, utilizou-se a seguinte nomenclatura para a formação do nome das variáveis programadas [Documentação WEG]:

<Função> <Tipo> <Endereço> <Descrição>

onde:

<Função>

I – Entrada (*Input*)

Q – Saída (*Output*)

M – Marcador Interno

<Tipo>

X – *Bit*

B – *Byte*

W – *Word*

D – *Double Word*

L – *Long Word*

<Endereço>

Endereço de memória ou I/O que está sendo utilizado (*software*).

Exemplos

Entrada Digital 10 – CLP SAIA

IX10_M12On sendo que:

Função → I – *Input*

Tipo → X – *Bit*

Endereço → 10 - *Entrada Digital 10*

Descrição → _ - *Caractere de separação (Não é obrigatório, mas se não existir deve ser colocado após o endereço sempre uma letra) ; M12On – Motor 12 ON, quando a entrada 10 estiver com nível lógico 1 o motor estará acionado (Lógica Positiva).*

Obs.: O CLP SAIA pode receber nomes de variáveis com até 10 caracteres.

Saída Analógica 20 – CLP SAIA

QD20VelM12 sendo que:

Função → Q – Saída

Tipo → D – *Double Word* (O SAIA usa sempre registradores de 32 bits)

Endereço → 20 – Registrador 20

Descrição → VelM12 – Ref. De velocidade do Motor 12

4.4 - Estratégias

Para atingir os requisitos de projeto foram desenvolvidas estratégias de controle *on-off*, controle PID, rampa, ajuste da saturação da integral e *bumpless*.

4.4.1 – Controlador *On-Off*

O controlador *on-off* pode assumir apenas dois estados: ou ligado, ou desligado. Não é um controlador indicado para processos em que se exige um baixo grau de variabilidade. No projeto ele é utilizado para controle de temperatura do óleo combustível no reservatório e controle de temperatura do ar de atomização.

Existem diversas estratégias que podem ser utilizadas para regulação via controle *on-off*. Para o projeto foi escolhida uma estratégia que é apresentada à seguir [Documentação WEG].

O controle está relacionado com uma base de tempo pré-definida que recalcula o tempo de ativação da saída, ciclicamente.

$$TempoLigado = BaseTempo * \frac{Dif}{Dt}$$

Onde: $Dif = SP_{Superior} - PV$, $Dt = SP_{Superior} - SP_{Inferior}$

Existe ainda um controle para evitar transição com frequência alta na saída do controlador para deste modo proteger o equipamento (um aquecedor elétrico, por exemplo) .

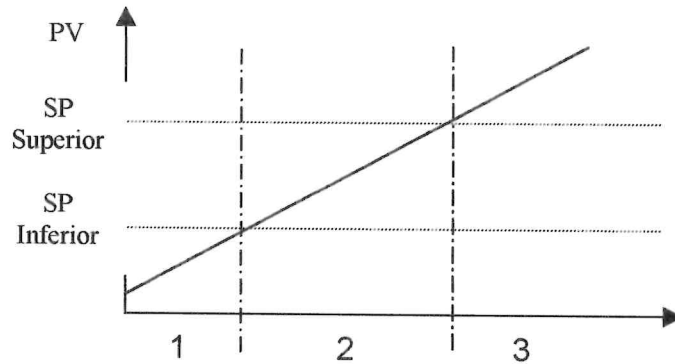


Figura 4.1: Estratégia de Controle On-Off

Na figura 4.1, pode-se observar as três posições possíveis que a variável controlada (PV) pode ocupar em relação aos *set point* superior e inferior. Se o sinal proveniente do sensor de campo (PV) for menor que o *set point* (SP) inferior (região 1 da figura) a saída ficará ativada por todo o ciclo. Se PV estiver numa região entre os valores superior e inferior (região 2), então a saída será ativada por um tempo determinado pela fórmula dada acima. Se PV estiver acima do *set point* superior (região 3), a saída não será ativada no ciclo atual. Valores típicos para o SP superior e inferior são valores 5% acima e abaixo do *set point* desejado.

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram duas páginas do ambiente de programação onde foi implementada a estratégia proposta de controle *on-off*.

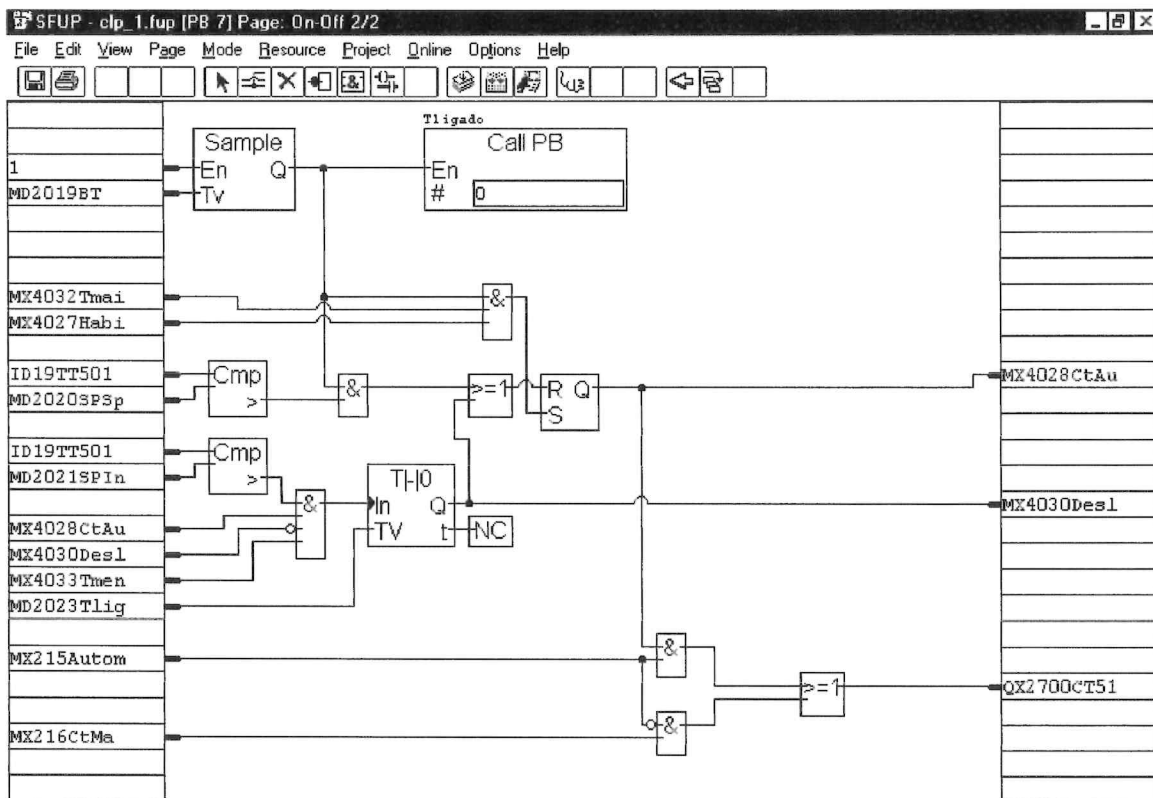


Figura 4.2: Controle On-Off

4.4.2 - Rampa²

Limitar a variação do *set point* do controlador de temperatura das zonas de aquecimento é um requisito de projeto. Porém a biblioteca de blocos de função do *software* de programação do CLP Saia não dispõe de um bloco tipo rampa. Utilizou-se, então, uma estratégia de implementação da rampa utilizando-se o bloco de controle PID.

Pode-se representar a implementação da estratégia desenvolvida através do fluxograma apresentado na figura 4.4.

² Estratégia desenvolvida em conjunto com o orientador na empresa

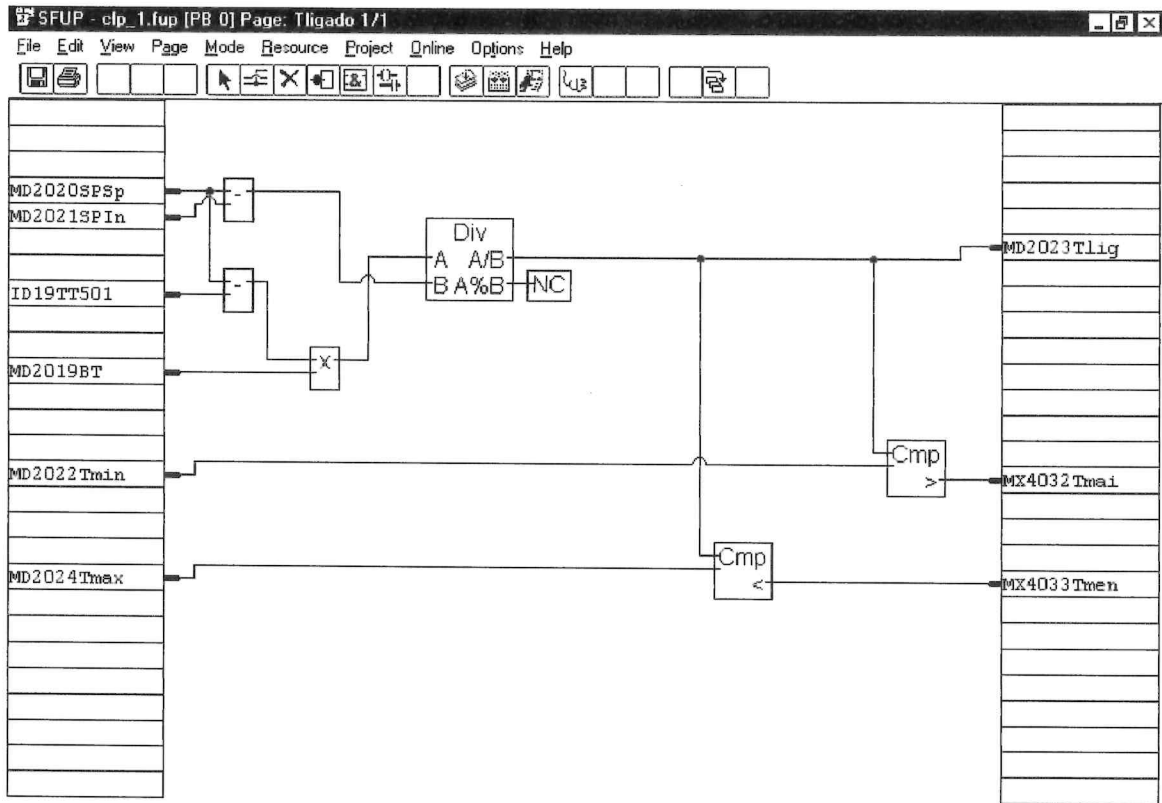


Figura 4.3: Cálculo do Tempo Ligado-Desligado

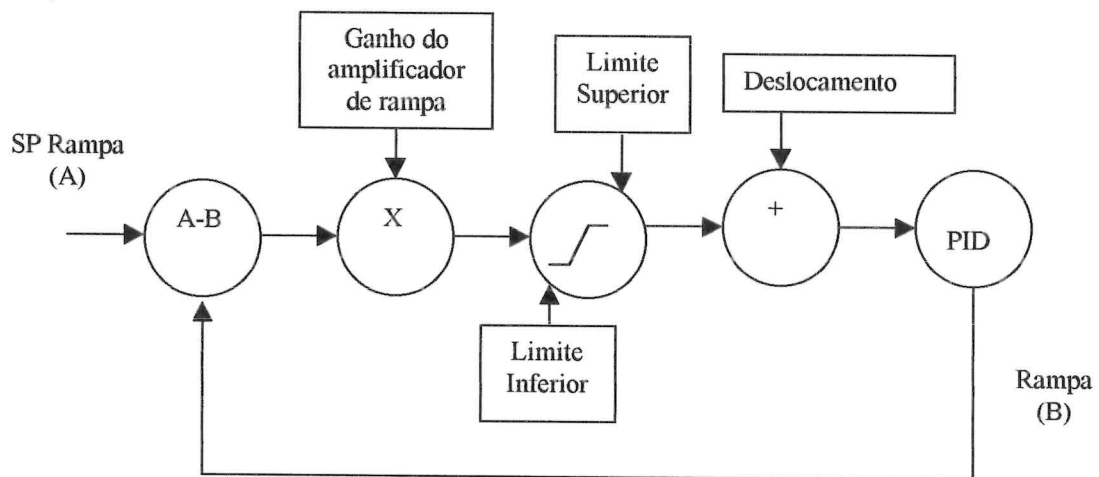


Figura 4.4: Fluxograma da Rampa

Basicamente, o que se fez foi realimentar a saída do bloco de controle PID³. Além disso foram realizadas algumas operações antes da realimentação do sinal a fim de melhor as características da rampa. A implementação no ambiente de programação pode ser visualizada na figura 4.5.

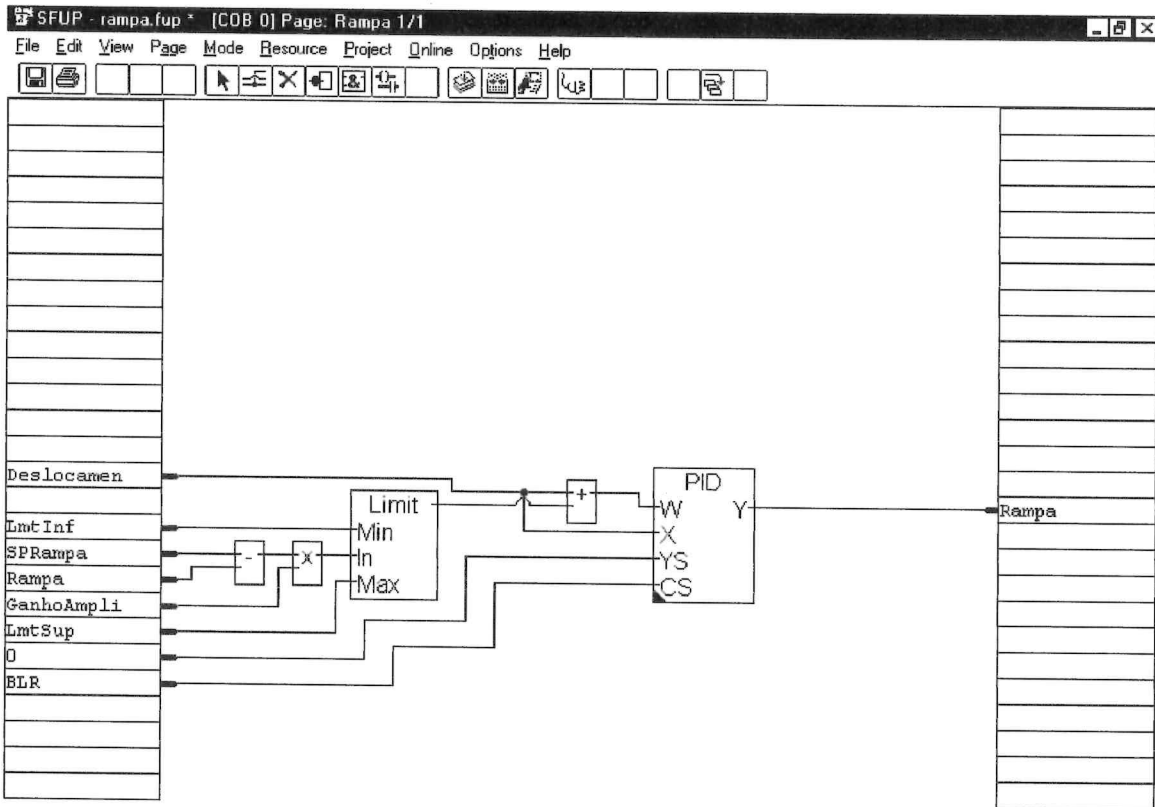


Figura 4.5: Implementação da Rampa

Inicialmente é comparado o *set point* da rampa com o seu valor atual. O erro resultante é multiplicado por um ganho denominado amplificador de erro. Em seguida o sinal é limitado superiormente e inferiormente e logo depois somado a uma constante denominada deslocamento de sinal. O sinal entra, então, no bloco de controle PID.

³ O bloco de controle PID é apresentado mais adiante neste capítulo.

O tempo de rampa desejado pode ser atingido alterando-se o ganho integral do bloco de controle PID, alterando-se os limites máximo e mínimo impostos a realimentação do sinal ou alterando-se o tempo de amostragem do controlador PID.

O ganho do amplificador de erro tem por finalidade dar uma forma reta à rampa. A resposta do bloco PID realimentado, sem este ganho, teria a forma de resposta de um sistema de primeira ordem (ou seja, a resposta não apresentaria uma taxa de variação constante). O objetivo do ganho é aproveitar apenas um pedaço da excursão do sinal e, de certa forma, “espichá-lo”. Assim trabalha-se apenas com uma faixa de excursão do sinal que tem variação de inclinação desprezível (quase nula).

Esse sinal amplificado é então limitado. Impondo-se ao sinal um limite inferior diferente do limite inferior, pode-se obter tempos de subida diferentes do tempo de descida.

O deslocamento do sinal por uma constante tem por objetivo fazer com que a rampa atue tanto no sentido de descida quanto subida.

Testes utilizando osciloscópio foram realizados e conseguiu-se estabelecer uma relação para os tempos de rampa e os parâmetros passíveis de serem ajustados. Pode-se conseguir através de um arranjo adequado desses parâmetros tempos de rampa (variação 0-100%) da ordem de 60 ms a algumas horas ou dias.

A rampa também está sendo utilizada no projeto para o controle em modo manual.

Essa estratégia tornou-se uma nota técnica e está sendo utilizada também em outros projetos na empresa.

4.4.3 – Controlador PID⁴

O bloco controlador PID presente na biblioteca de programação do CLP Saia pode ser representado pelo diagrama da figura 4.6:

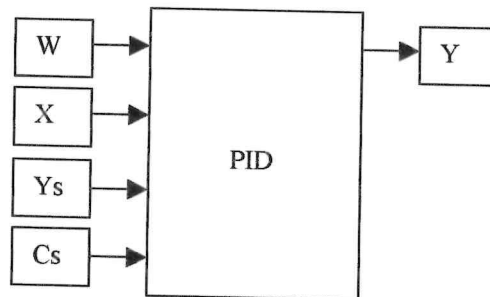


Figura 4.6: Representação em Bloco do Controlador PID

Onde: W (inteiro) é o *set point*, X (inteiro) é a variável controlada, Y_s (inteiro) é o *set point* do *cold start*, C_s (binário) é o sinal que habilita o *cold start* e Y (inteiro) é a saída do controlador.

Quando C_s é ativado (nível alto), Y assume o valor Y_s enquanto C_s estiver em nível alto. Na transição alto / baixo do sinal C_s , o controlador PID passa a atuar novamente e evolui à partir do valor Y_s ⁵.

Pode-se ainda configurar internamente o tempo de amostragem do sinal (T_0), os parâmetros PID e uma zona morta.

O algoritmo de controle PID é mostrado na tabela 4.1.

⁴ Uma explicação básica sobre os controladores PID pode ser encontrada em [Ogata 93] e em [Dorf 95].

⁵ Esta é uma informação importante para compreensão da estratégia *bumpless* apresentada mais adiante.

$$Y_n = \frac{F_P}{256} * \{(W_n - X_n) + \frac{F_I}{256} * Z_s + \frac{F_D}{256} * [(W_n - W_{n-1}) - (X_n - X_{n-1})]\}$$

onde:

F_P é o fator proporcional

F_I é o fator integral

F_D é o fator derivativo

$$Z_s = Z_{s-1} + (W_n - X_n)$$

Tabela 4.1: Algoritmo PID do CLP Saia

Os fatores proporcional, integral e derivativo guardam a seguinte relação com o ganho proporcional (K_c), tempo integral (T_i) e derivativo (T_d) que são mais usuais na literatura:

$$K_c = \frac{F_P}{256}$$

$$T_i = \frac{T_0}{F_I} * 256$$

$$T_d = \frac{T_0}{256} * F_D$$

Pode-se notar na tabela 4.1 que o ganho proporcional está em série com os ganhos integral e derivativo.

Na figura 4.7 pode-se visualizar a estrutura do controlador PID da biblioteca de programação do CLP Saia na forma de um diagrama de blocos.

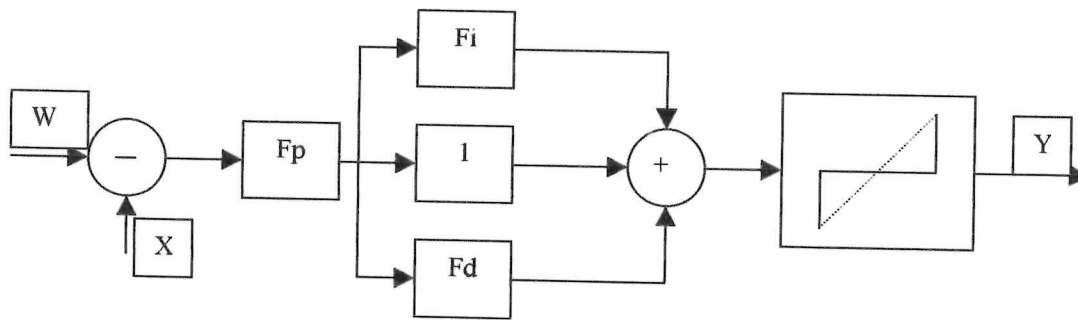


Figura 4.7: Diagrama de Blocos do Controlador PID

Apresentado o controlador PID do CLP Saia, parte-se, agora, para a apresentação das estratégias utilizadas para cumprimento dos requisitos de projeto.

4.4.3.1 – Limites de Mínima e Máxima Abertura das Válvulas de Controle e Ajuste da Saturação da Ação Integral

Limitar a máxima e a mínima abertura das válvulas de controle significa limitar a saída Y do controlador PID. Isso é facilmente implementável no ambiente de programação do CLP Saia com a utilização de bloco limitador em série com a saída do bloco controlador.

Porém limitar superiormente a ação de controle pela utilização de um bloco limitador causaria um problema de saturação da ação integral.

A figura 4.8 mostra este problema num exemplo fictício (não se preocupou em representar fielmente a forma da saída do controlador nem a resposta do sistema).

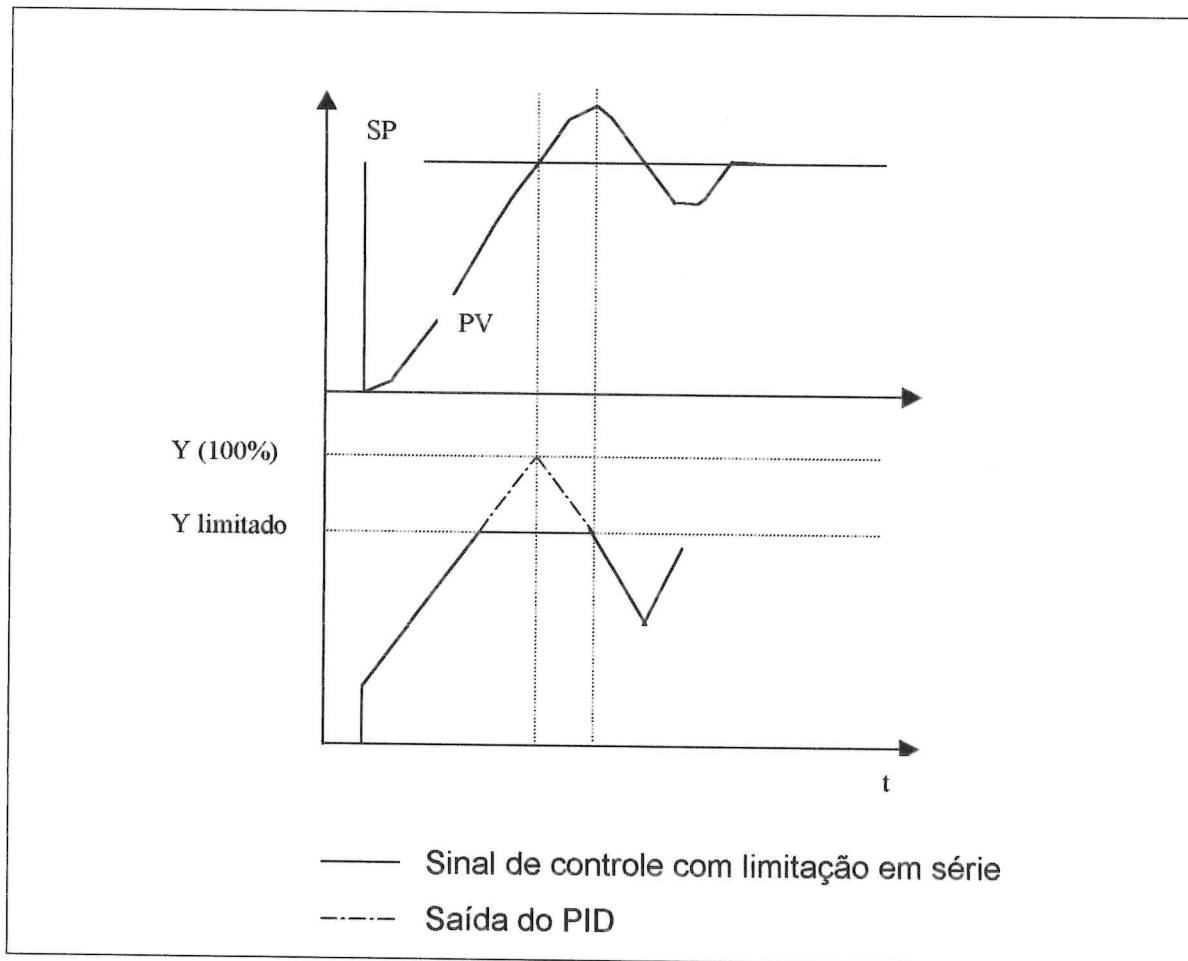


Figura 4.8: Saturação da Integral

Note que a limitação superior em série com o bloco controlador PID causa um atraso na resposta efetiva do mesmo. Qualquer alteração na saída do controlador que esteja na faixa acima da limitação imposta não será efetivamente passada ao sistema.

Para resolver este problema optou-se por fazer a limitação superior do sinal de controle utilizando-se um ganho (menor que um) em série com o controlador. Desta forma, limita-se todo o sinal, resolvendo o problema da saturação da integral.

Na figura 4.9 pode-se visualizar a implementação da estratégia proposta. O bloco limite continua limitando o sinal inferiormente, porém a limitação superior é feita pelo ganho no sinal.

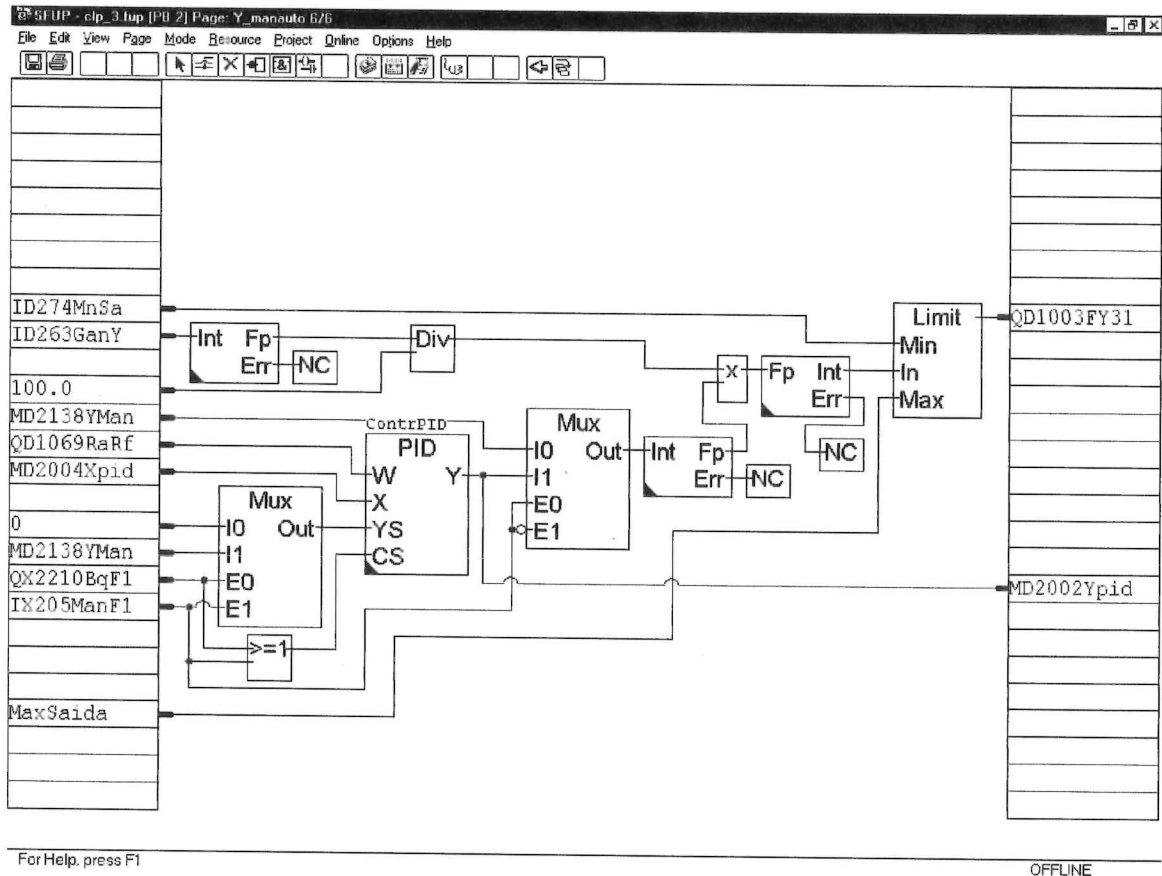


Figura 4.9: Controlador PID

4.4.3.2 – *Bumpless* Manual / Automático e Automático / Manual

Dizer que a passagem de controle manual para automático e automático para manual é *bumpless* significa que, na troca do modo de operação do controlador, a saída do mesmo não sofre qualquer tipo de alteração brusca. Ou seja, se num determinado momento da operação em automático (ou manual) o modo de operação for alterado para manual (ou automático) a saída do controlador PID deve evoluir à partir do sinal anterior.

Conseguiu-se atingir o requisito acima pela utilização adequada das entradas Cs e Ys do bloco controlador PID utilizado tanto no controle automático quanto na rampa do controle manual.

A figura 4.9 apresentada anteriormente e a figura 4.10 ilustram a implementação da estratégia *bumpless*.

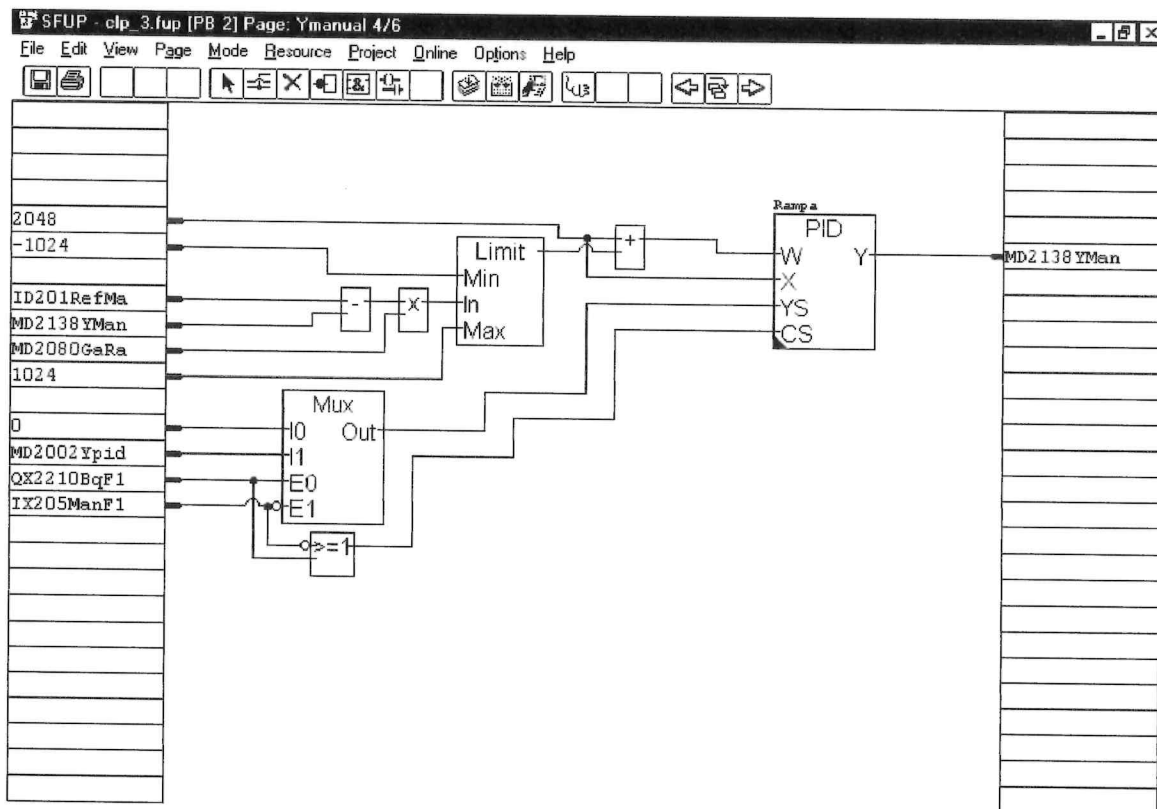


Figura 4.10: Controle Manual

4.5 - Generalidades

4.5.1 – Comunicação via Rede

A rede de comunicação Profibus FMS interliga o CLP CL 400 da Bosch, o sistema supervisório e os três CLP's Saia e possibilita a troca de informações entre eles.

A tabela 4.2 mostra a ordem em que estão ligados os equipamentos à rede.

Equipamentos da Rede (Conforme passagem do cabo)
1 – SAIA 1
2 – SAIA 2
3 – SAIA 3
4 – STATION 1 (SALA DE COMANDO)
5 – CL400 (FORNO)

Tabela 4.2: Rede Profibus FMS

Em relação aos CLP's Saia, são aproximadamente 500 informações diferentes que fluem através da rede. Quase que a totalidade das informações trocadas são com o sistema supervisório e permitem o funcionamento de todo o sistema de controle.

4.5.2 – Segurança

O forno de reaquecimento é um sistema até certo ponto perigoso e que necessita de alguns procedimentos que garantam a segurança da sua operação.

4.5.2.1 – Alarmes e Lógica de Bloqueio

Existe uma série de alarmes compõem a especificação técnica do projeto e que são acionados por intermédio de uma lógica executada pelo CLP (compara-se o valor atual da variável controlada com o valor de ajuste do alarme). São exemplos de alarmes: rompimento de termopar, queda no sinal do sensor (rompimento de fio), máximas temperaturas, máximas pressões, etc.

Uma lógica de bloqueio automático intervém sempre que alguma variável monitorada do forno atinja certos limites máximos de segurança.

A lógica de bloqueio é parte integrante da especificação técnica do projeto e determina que ação (fechar, abrir ou continuar regulando) deve ser tomada sobre uma determinada válvula na presença de determinado evento (alarme).

4.5.2.2 – Teste da Rede, *Watch-Dog*

A lógica de segurança (lógica de bloqueio) do forno está presente em todos os sub-sistemas (zona 1, 2, 3 e zona comum) e, portanto, está distribuída nos três CLP's Saia. Porém as informações que servem como estradas para esta lógica não estão presentes fisicamente (não são *hard-wired*) em todos os CLP's, a menos da entrada correspondente ao sinal de emergência.

As informações necessárias a lógica de bloqueio são levadas via rede de comunicação. Para garantir a segurança no funcionamento do forno de

reaquecimento o funcionamento da rede é constante monitorado e na presença de alguma falha de comunicação que perdure por um determinado tempo é acionada a lógica de bloqueio do forno.

Para monitorar o a segurança do *software* existe uma rotina que é executada ciclicamente, o *watch-dog*, e que tem por função detectar alguma falha de varredura do programa (*looping*, por exemplo). Na detecção de alguma falha de varredura, toma-se a devida ação de correção possível: desligar a alimentação do CLP Saia e assim forçar o fechamento das válvulas de controle.

4.5.3 - Documentação

Documentar o *software* é uma tarefa importante uma vez que possibilita uma adequada manutenção do mesmo.

O ambiente de programação do CLP Saia gera uma documentação bastante completa. Para o *software* desenvolvido foi gerada uma documentação com aproximadamente 350 páginas onde se pode encontrar comentários sobre as variáveis do programa, blocos de função, estratégias de implementação, etc.

4.6 - Conclusão

Neste capítulo pode-se verificar a metodologia e as estratégias aplicadas na implementação do *software*.

Para a elaboração do *software* foi necessário um grande período de preparação e estudos do *hardware* e *software* de programação além das estratégia de controle PID.

Pode-se dizer, ao final, que todos os requisitos foram levados em consideração na implementação.

Capítulo 5: Testes e Comissionamento

5.1 – Introdução

Neste capítulo, são apresentados os trabalhos desenvolvidos para validação do *hardware* e *software*.

Faz-se também uma apresentação das técnicas de sintonia de controladores PID que poderão vir a ser utilizadas durante o comissionamento do projeto.

5.2 - Validação e Testes

5.2.1 - Teste de Fiação dos Painéis

No fim do mês de dezembro, nas dependências da WEG Automação, contando com a presença de representantes da Interfor, foram realizados testes do painel elétrico que aloja os três CLP's Saia. Nestes testes procurava-se verificar a correta ligação da fiação proveniente dos *bornes* do painel até os cartões de entrada e saída nos CLP's.

Para verificação dos sinais de entrada digitais, injetava-se 24V no *born* e observava-se no CLP a mudança de estado da respectiva entrada. Já as saídas digitais eram forçadas no CLP e observava-se o sinal no *born* correspondente.

Para os sinais analógicos, verificava-se três pontos: 4mA, 12mA e 20mA. Deste modo se poderia observar o correto funcionamento da conversão analógico / digital dos cartões de entrada e a conversão digital / analógica dos cartões de saída.

Ao final dos testes, ficou constatada a conformidade de todo *hardware* do painel.

5.2.2 - Validação do Software

Em meados do mês de março foram realizados os testes para validação do *software*, ainda na WEG. Estavam presentes representantes da Belgo Mineira e da Interfor.

Foram realizados os seguintes testes:

Zonas 1 à 3

1. Simulação dos sinais dos termopares.
 - Verificação do seletor de máxima e seleção manual;
 - Verificação da ação a ser tomada em caso de ruptura do termopar selecionado.

2. Controle da funcionalidade do controlador de temperatura e limitador de calor.
 - Verificação da ação direta do controlador.

3. Controle do alarme de temperatura máxima e ruptura do termopar.

4. Controle da vazão do ar de combustão.
 - Verificação da correção da vazão do ar, com simulação da temperatura do ar.

5. Controle da vazão gás.

6. Medição da vazão de ar de atomização.
 - Verificação da correção da vazão em função da temperatura e pressão do ar de atomização.
7. Controle da comutação gás / óleo.
8. Controle do duplo-cruzado.
 - Simulação da vazão de ar / gás / óleo e verificação saídas para válvulas de gás e óleo;
 - Verificação do controle em automático da regulagem de temperatura e das vazões de ar e combustível, inicialmente com proporção um (ar / combustível) e depois variando a proporção.
9. Verificação dos fundos de escala e unidades de engenharia.

Controladores Gerais

1. Controle da regulagem de pressão do forno, com verificação dos alarmes, regulagem e saída para a válvula;
2. Controle de pressão do ar de combustão, com verificação dos alarmes, regulagem e saída para a válvula;
3. Controle do *by-pass* de ar no recuperador de calor, com verificação dos alarmes, regulagem e saída para a válvula;
4. Controle do ar de diluição, com verificação do *set point* de segurança;
5. Controle do ar de escape, com verificação dos alarmes, regulagem e saída para a válvula;
6. Verificação de todos os sinais de alarme;
7. Verificação dos fundos de escala e unidades de engenharia;
8. Verificação dos controladores de temperatura dos aquecedores de óleo e ar de atomização.

Lógica de Bloqueio

1. Verificação de todos os sinais de entrada e as relações de causa e efeito nas saídas. Simulação com *jumpers* nos *bornes* e para cada teste um *jumper* é retirado;
2. Verificação no caso de bloqueio se os sinais de saída são forçados a zero;
3. Verificação se os contatos de campo são normalmente fechados.

Geral

1. Verificação dos controladores, em particular se a saturação da integral é ajustável;
2. Verificação da passagem automático / manual e manual / automático *bumpless*;
3. Verificação da operação em emergência.

Este foi um roteiro de testes fornecido pelo cliente e que foi rigorosamente seguido.

Para o teste de funcionalidade dos controladores, fazia-se $PV > SP$, $PV = SP$ e $PV < SP$. Pôde-se, dessa forma, observar a funcionalidade dos controladores PID.

Cabe ressaltar que estes testes foram realizados com o sistema supervisor e o CLP CL 400 já conectados em rede com os CLP's Saia.

Os testes foram realizados em duas etapas: na primeira delas, alguns erros cometidos, tanto na especificação dos clientes quanto no desenvolvimento do *software*, foram detectados e corrigidos para a segunda etapa, onde o *software* do CLP foi completamente validado.

5.3 - Sintonia de Controladores [Smith 85]

Sintonizar um controlador é o ato de ajustar seus parâmetros a fim de se obter a resposta desejada em malha fechada.

Algumas malhas de controle possuem repostas relativamente rápidas. Muitas são relativamente lentas e faz-se necessário esperar alguns minutos, ou até mesmo horas, para se observar a resposta resultante de uma sintonia de parâmetros. Este fato torna o ajuste dos controladores por tentativa e erro uma tarefa tediosa que consome muito tempo.

Um grande número de procedimentos para a sintonia de controladores pode ser encontrado em bibliografia. Está-se particularmente interessado nos procedimentos onde não se faz necessário o conhecimento da dinâmica exata (função de transferência) do sistema. Métodos como o de Ziegler-Nichols e métodos onde se estima os parâmetros do controladores através de uma aproximação do processo por um modelo de 1º ordem são explorados nesta parte do trabalho. Importante salientar que nenhum desses métodos representa sempre o melhor ajuste para todas as situações em controle de processos.

5.3.1 - O Método de Ziegler-Nichols

Este método pioneiro, também conhecido como reposta com um quarto de taxa de decrescimento, foi proposto por Ziegler e Nichols em 1942. Consiste de dois passos, assim como todos os outros procedimentos de sintonia:

Passo 1. Determinação da característica dinâmica ou personalidade da malha de controle.

Passo 2. Estimação dos parâmetros do controlador que reproduzem a resposta desejada para as características dinâmicas determinadas no primeiro passo –

em outras palavras, a combinação da personalidade do controlador com a personalidade do processo.

Neste método os parâmetros pelos quais é representada a característica dinâmica do processo são o ganho crítico do controlador proporcional, e o período crítico de oscilação. Para se levantar tais parâmetros pode-se seguir o seguinte procedimento:

1. Desabilite a ação integral e derivativa do controlador a fim de se obter um controlador apenas proporcional.
2. Com o controlador em automático (ou seja, malha fechada), aumente o ganho proporcional até que a malha oscile com amplitude constante. Chame de K_{cr} (ganho crítico) a este valor de ganho. Neste passo, o ganho deve ser incrementado em pequenos degraus. Os incrementos no ganho devem ser menores a medida que se aproxima do ganho crítico.
3. Da resposta dinâmica do sistema, pode-se determinar o período das oscilações críticas T_{cr} .

Para a resposta desejada do sistema em malha fechada, Ziegler e Nichols especificaram uma taxa de decaimento de um quarto para duas oscilações sucessivas. Esta taxa deveria ser independente da entrada do sistema e dependente somente das raízes da equação característica da malha.

Uma vez que o ganho crítico e o período crítico estão determinados, são utilizados na tabela 5.1 para calcular os parâmetros do controlador que fornecem um resposta em malha fechada com taxa de um quarto de decaimento para oscilações sucessivas.

Note que a introdução da ação integral força a redução do ganho em 10% quando comparado ao controlador proporcional. A ação derivativa, por outro lado, permite um aumento tanto do ganho quanto da ação integral do controlador

PID quando comparado ao controlador PI. Isto se explica pelo fato da ação integral introduzir um atraso na operação do controlador enquanto que a ação derivativa introduz um avanço.

Tipo de controlador	Ganho proporcional K_c	Tempo Integral T_i	Tempo Derivativo T_d
P	$K_{cr} / 2$	-	-
PI	$K_{cr} / 2.2$	$T_{cr} / 1.2$	-
PID	$K_{cr} / 1.7$	$T_{cr} / 2$	$T_{cr} / 8$

Tabela 5.1: Fórmulas de Ziegler

5.3.2 - Caracterização de um Processo

A maioria dos métodos de sintonia de controladores se utiliza de uma aproximação do processo por um modelo simples de primeira ou segunda ordem com atraso de transporte. Nesta aproximação são incluídas não só as características do processo mas também o comportamento dinâmico das válvulas e sensores / transmissores. O modelo mais comum utilizado para a caracterização de processos é o modelo de primeira ordem dado na tabela 5.2.

$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1}$
<p>onde,</p> <p style="text-align: center;">K = ganho em regime</p> <p style="text-align: center;">t_0 = atraso de transporte</p> <p style="text-align: center;">τ = constante de tempo do processo</p>

Tabela 5.2: Modelo de Primeira Ordem

Este modelo caracteriza o processo por três parâmetros: o ganho K , o atraso de transporte t_0 , e a constante de tempo τ . Estes parâmetros podem ser obtidos de modo simples por meio de um teste de resposta ao degrau.

O teste de resposta ao degrau é feito da seguinte forma:

1. Com o controlador em manual (isto é, em malha aberta) uma variação do tipo degrau na saída do controlador é aplicada ao processo. A amplitude do degrau deve ser grande o bastante para que a conseqüente mudança no processo seja mensurável pelo respectivo transmissor, mas não tão grande a fim de não causar distorções na resposta provocadas pelas não linearidades inerentes ao processo.
2. A resposta do sistema é gravada com as devidas escalas de tempo e amplitude.

O passo seguinte consiste em analisar a curva de reação do processo e determinar os parâmetros que a aproximam o processo por um modelo de primeira ordem.

O valor do ganho em regime é dado por:

$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta m}$$

onde: Δm é a variação da saída do controlador (entrada do processo) e Δc_s é a variação da variável controlada.

A determinação do atraso de transporte e da constante de tempo pode ser obtida por pelo menos três métodos, cada qual resultando em diferentes valores para t_0 e τ .

Primeiro método. Este método faz uso de uma reta tangente a curva de reação do processo no ponto de maior taxa de variação. O atraso de transporte e a constante de tempo do processo e podem ser obtidos da seguinte forma: o atraso de transporte t_0 é o tempo em que a reta tangente intercepta o eixo do tempo e a constante de tempo τ é a diferença entre o tempo t em que a reta tangente intercepta a linha imaginária Δc_s . Ver figura 5.1.

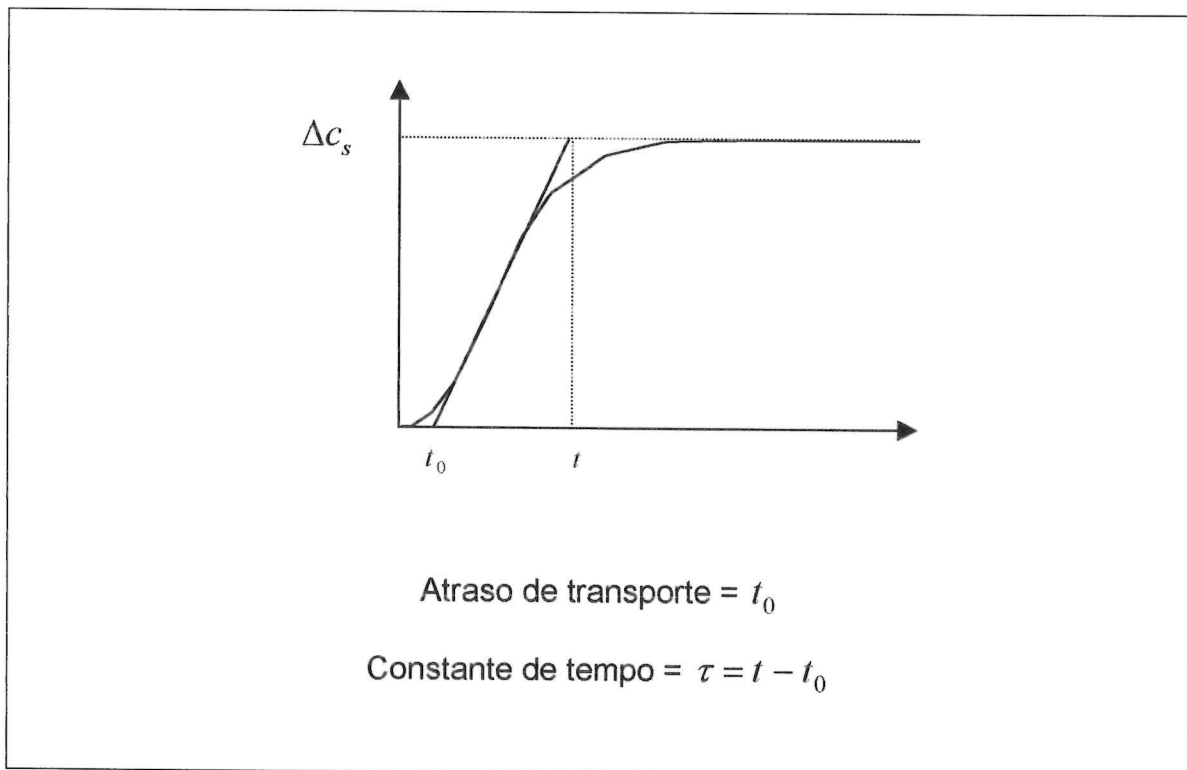


Figura 5.1: Primeiro Método para Aproximação por Modelo de Primeira Ordem

Segundo método. Neste método o atraso de transporte t_0 é determinado assim como no método anterior. A constante de tempo τ é o tempo em que o processo alcança $0,632 \Delta c(t)$.

Terceiro método. Os dois métodos anteriores utilizam-se da reta tangente ao ponto de maior taxa de variação da curva de reação do processo. Já este, utiliza-se das seguintes fórmulas:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1)$$

$$t_0 = t_2 - \tau$$

onde: $t_1 = 0.283\Delta c_s$ e $t_2 = 0.632\Delta c_s$

5.3.3 - Fórmulas de Ziegler and Nichols utilizando parâmetros do modelo de primeira ordem.

A tabela 5.3 determina os valores do ganho, tempo integral e tempo derivativo para os controladores do tipo P, PI e PID utilizando os parâmetros do modelo de primeira ordem.

Tipo de controlador	Ganho proporcional K_c	Tempo Integral T_i	Tempo Derivativo T_d
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1}$	$3.33 t_0$	-
PID	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1}$	$2 t_0$	$0.5 t_0$

Tabela 5.3: Fórmulas de Ziegler and Nichols utilizando Parâmetros do Modelo de Primeira Ordem

As fórmulas para o ganho mostram que o ganho em malha fechada é inversamente proporcional a razão do atraso de transporte sobre a constante de tempo dominante.

Ao utilizar estas fórmulas deve-se ter em mente que elas são empíricas e se aplicam a um *range* limitado de valores para a razão atraso de transporte sobre constante de tempo. Valores para o *range* $\frac{t_0}{\tau}$ não devem extrapolar o intervalo de 0.1 a 1.

5.3.4 - Sintonia de Controladores com Dados Amostrados.

Uma característica dos controladores digitais é que os cálculos de controle são efetuados em intervalos regulares de tempo T_0 , o tempo de amostragem.

A característica discreta de operação dos computadores exige que a cada instante de amostragem o sinal dos transmissores seja amostrado, a variável manipulada seja calculada e a saída do controlador seja atualizada. A saída do controlador é então mantida constante por um tempo completo de amostragem até a nova atualização. Como era de se esperar, esta operação tem um efeito na performance do controlador e, deste modo, nos parâmetros de sintonia do controlador.

Uma boa regra para determinação do tempo de amostragem do controlador é assumi-la como um décimo a um vinte avos da constante de tempo dominante do processo. Quando o tempo de amostragem é desta ordem de magnitude, seus efeitos podem ser levados em consideração nas fórmulas de ajuste de controladores adicionando metade do tempo de amostragem ao atraso de transporte do processo e, então, utilizando este tempo correto de atraso de transporte nas fórmulas de sintonia de controladores contínuos.

Os métodos de sintonia de controladores em malha fechada incorporam automaticamente os efeitos da amostragem quando são determinados o ganho crítico e o período crítico.

5.4 – Conclusão

Neste capítulo apresentou-se os testes realizados para validação do *hardware* e do *software* do projeto. Ambos foram aprovados após teste rigorosos e detalhados.

Apresentou-se uma revisão bibliográfica de métodos de sintonia de controladores PID. Estes métodos, aliado ao conhecimento dos especialistas do processo forno de reaquecimento, poderão vir a ser utilizados para ajuste das malhas de controle.

Capítulo 6: Conclusão

Procurou-se abordar neste trabalho o desenvolvimento de um *software* para controle, via CLP, de um forno de reaquecimento de barras da siderúrgica Belgo Mineira, unidade Piracicaba - SP.

Seguindo uma metodologia e desenvolvendo-se estratégias que buscam o cumprimento dos requisitos do projeto, concebeu-se um *software* que cobre toda a especificação técnica fornecida pelo cliente.

O comissionamento do projeto está programado para o final do mês de abril do presente ano e deve-se estender por alguns meses, onde procurar-se-á empregar métodos de sintonia de controladores PID a fim de controlar as malhas constituintes do sistema forno de reaquecimento.

Em busca de excelência em qualidade e produtividade, a siderúrgica Belgo Mineira decidiu modernizar e ampliar seu forno de reaquecimento de barras e seu trem de laminação. Contratou, para tanto, a empresa WEG Automação para integrar e automatizar o processo, além de fornecer boa parte dos equipamentos elétricos. Hoje pode-se afirmar que o sistema de laminação e forno de reaquecimento contarão com sistemas automatizados com alto grau de tecnologia empregada e de grande confiabilidade. Pode-se dizer que se está vencendo o desafio de ser a primeira empresa nacional a prestar este tipo de serviço ao setor siderúrgico.

Para melhoria do software proposto, pode-se desenvolver os seguintes trabalhos:

- Aperfeiçoar as estratégias desenvolvidas para elaboração das rampas que não são 100% precisas devido a não linearidade observada;
- Utilização das novas ferramentas para a programação do CLP Saia que incluem, entre outras coisas, controladores PID com mais recursos;
- Otimização de algumas rotinas;
- Elaboração de comentários mais detalhados no código fonte.

Toda a técnica estudada para a concepção de *softwares* em CLP, assim como o estudo aprofundado da técnica de controle PID se somaram aos conhecimentos acadêmicos adquiridos anteriormente.

Cabem aqui algumas críticas construtivas ao *curriculum* básico do curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina:

- Deveria-se dar mais ênfase aos métodos empíricos de sintonia de controladores PID. Deveria-se estimular, de alguma forma, o *feeling* dos alunos para o ajuste dos parâmetros de controladores;
- Poderia-se incluir no *curriculum*, em alguma cadeira do curso, noções básicas sobre projetos elétricos, principalmente com relação a simbologia utilizada, o que facilitaria a interpretação dos mesmos;

Anexo 1: Hardware e Software de Programação

A Saia-Burgess Eletronics é um grupo de companhias com unidades de produção na Alemanha, Inglaterra e Suíça.

Produz motores, chaves e controladores. Tem-se destacado pelo alto grau de tecnologia empregado em seus produtos.

Hardware do CLP Saia [Saia 97]

O CLP da Saia-Burgess é um CLP bastante compacto. Sua família compreende desde controladores para aplicações de pequeno, médio e grande porte.

O CLP utilizado no projeto foi o de modelo PCD2.

Dados Técnicos do CLP Saia – PCD2:

Alimentação	24 VDC +/- 20%
Consumo de energia	15 W com 64 I/O 20 W com 128 I/O
Resistência a interferência	Acima do mínimo recomendado pela norma IEC1131-2
Temperatura ambiente	Durante operação: 0 .. 55°C (montagem vertical) 0 .. 40°C (montagem horizontal) Armazenagem: -25.. 70°C
Umidade do ar	95% sem condensação
Resistência mecânica	Segue norma IEC 1131

Conexões	Cartões de I/O, cartões auxiliares e alimentação via Terminais <i>pug-in</i> com parafuso para fios de 1.5mm ² (o fabricante garante a qualidade do contato dos terminais a até 20 operações de conectar / desconectar)
Número de I/Os	8, 12, 16 cartões para 64, 96, 128 I/Os respectivamente ou número equivalente de cartões de I/O analógicos
Processador	1 CPU com microcontrolador 68340
Tempo de processamento	Processamento de <i>bit</i> : 3.6 .. 6 μ s Processamento de <i>word</i> : 20 to 40 μ s
Memória do usuário	Contém programas, textos e blocos de dados. CLP básico consiste de 32 Kbytes RAM, que pode ser expandido a 152 Kbytes de RAM ou EPROM.
Flags	8192 x 1 <i>bit</i> (pode ser programado pelo usuário como volátil ou não-volátil)
Registros de dados	4096 x 32 <i>bit</i> (não volátil)
Temporizadores e contadores	1600 Temporizadores voláteis e contadores não-voláteis Relação temporizadores / contadores programável
Faixa de contagem	31 <i>bits</i> sem sinal (0 .. 2147483647 pulsos da base de tempo)
Faixa de tempo	31 <i>bits</i> sem sinal (0 .. 2147483647 pulsos da base de tempo)
Base de tempo	Programável de 10ms a 10s
Faixa de cálculos	Inteiros: -2E31 .. 2E31 Ponto flutuante: -9.22337E18 .. -5.42101E-20 +9.22337E18 .. +5.42101E-20 Unidades: decimal, binário, BCD, hexadecimal, ponto flutuante
Data / tempo	Precisão: melhor que 15 s/mês Duração da bateria: 1 a 5 anos

Interface de comunicação	Máximo de 4 interfaces. Interface PGU inclusa. Interfaces RS 232, RS 422 e RS 485 possíveis.
Redes LAN	S-BUS (protocolo da Saia), redes LAC, LAN1, MODBUS, PROFBUS
Dispositivo de programação	<i>Teach pendant</i> disponível para programação via PGU

Cartão de Entradas Digitais (PCD2.E611)

Cartão com um tempo bastante reduzido de entrada. É aplicável a maioria das aplicações elétricas e eletro-mecânicas a 24 V.

Dados Técnicos:

Total de entradas por cartão	8, eletricamente isoladas por optoacopladores
Modo de operação	Configurável lógica positiva ou lógica negativa
Tensão de alimentação	24 VDC
Corrente de entrada (a 24 VDC)	Lógica positiva: 5.0 mA Lógica negativa: 3.7 mA
Típico atraso de entrada	0.2 / 1.0 ms
Consumo interno de corrente	1 a 24 mA

Cartão de Saídas Digitais (PCD2.A410)

Cartão de saídas com 8 transistores MOSFET.

Dados Técnicos:

Total de saídas por cartão	8, eletricamente isoladas
Corrente de saída	1 .. 500 mA
Corrente total por cartão	4 A
Modo de operação	Lógica positiva
Típico atraso de saída	10 μ s – atraso liga 500 μ s – atraso desliga
Consumo interno de corrente	1 a 24 mA

Cartão de Entradas Analógicas

Cartão rápido para aplicações gerais para registro de sinais analógicos, com tempo de conversão menor que 30 micros e 12 *bits* de resolução.

Existem quatro canais para sinais de 0 .. 20 mA. Configurável via *jumper* como unipolar ou bipolar:

Unipolar: 0 .. 20 mA ou -20 .. 0 mA

Bipolar: -20 .. 20 mA

No projeto o cartão foi configurado para operar no modo unipolar 0 .. 20 mA.

Dados técnicos:

Princípio de medição	Diferencial
Impedância de entrada	100 Ohms
Precisão a 25°C	+/- 0.2%

Proteção de sobre-voltagem	+/- 50 mA
Constante de tempo do filtro de entrada	3 ms
Consumo de corrente	Interno do barramento de 5V: 45 mA Interno do barramento de 24V: 15mA

Valores Analógico / Digital

Sinal unipolar positivo
0 mA -> 0
10 mA -> 2047
20 mA -> 4095

Cartão de Saídas Analógicas

Cartão de saída rápido, com 4 canais de 8 *bits*. Próprio para processos com grande número de atuadores.

Cada uma das 4 saídas pode ser configurada independentemente para atuar nas faixas de 0 .. 10V, 0 .. 20 mA, 4 .. 20 mA.

Para o projeto, utilizou-se a configuração 4 .. 20 mA.

Dados Técnicos:

Tempo de conversão D/A	5 micro s
Impedância	4 .. 20 mA: 0 .. 500 Ohms
Precisão	1% +/- 0.2 mA
Consumo de corrente	Interno do barramento de 5V: 45 mA Interno do barramento de 24V: 15mA

Valores Digital / Analógico

Sinal unipolar positivo
0 -> 0 mA
128 -> 10 mA
255 -> 20 mA

Ambiente de Programação do CLP Saia [Saia 97]

O software de programação do CLP Saia é o PG4 v 1.4. Trata-se de um ambiente bastante amigável de programação onde se pode configurar e desenvolver o *software*.

Trata-se de uma ferramenta que possibilita a edição e monitoramento de *softwares* programados utilizando blocos de função, lista de instruções, diagramas *ladder* ou GRAFTEC.

Pode-se, basicamente, através do ambiente de programação:

- Configurar a distribuição dos recursos (*flags*, registros, contadores e temporizadores) na memória do CLP;
- Adaptar programa ao *hardware* (por exemplo, determinar que está sendo utilizada expansão de memória RAM ou EPROM);

- Configurar portas seriais no PC para *download* de programas;
- Editar o programa;
- Compilar, montar (*make*) e “linkar” os programas;
- Carregar o programa no CLP;
- Monitorar os programas;
- Fazer depuração (*debugger*);
- Consultar arquivos de ajuda;
- Configurar a rede de comunicação;
- Inserir comentários tanto para as variáveis quanto para as páginas de programação;
- Imprimir documentação parcial ou completa;
- Etc.

Blocos de Função

A norma IEC 1131-3 discursa sobre a padronização das técnicas de programação de *softwares* para controle em CLP's.

As quatro técnicas de programação utilizadas são:

1. Lista de Instruções (*Instruction List*): linguagem de baixo nível, bastante parecida com o assembler.
2. Texto Estruturado (*Structured Text*): bastante parecido com a linguagem de programação Pascal.
3. Diagrama de Escadas (*Ladder Diagram*): baseado na idéia de relês.
4. Blocos de Função (*Function Blocks*): “caixas pretas”.

Destas linguagens de programação, a mais utilizada é o diagrama de escadas, justamente por sua similaridade com a lógica de relês. Abaixo, algumas limitações da programação em ladder [Lewis 95]:

- a linguagem *ladder* e não é encapsulada;
- existe uma grande variedade de ferramentas no mercado que não são compatíveis, normalmente;
- redundância de procedimentos;
- pobre estruturação dos dados - *single bit*
- difícil sequenciamento;
- limitado controle de execução;
- difícil execução de operações aritméticas.

Justamente por estas limitações, a programação via blocos de função é uma técnica de programação em CLP's que, atualmente, tem se tornado uma exigência de clientes por ser bastante "amigável" e por possibilitar fácil compreensão do fluxo de informações no programa.

Os blocos de função (FB) são baseados na idéia da "caixa preta". Ou seja, dadas determinadas entradas a um bloco, obtém-se como saída uma informação processada.

Os blocos podem ser simples como aqueles que executam alguma lógica binária, mas também podem ser complexos a ponto de contemplarem um algoritmo PID para controle.

Em seguida, pode-se visualizar algumas telas onde foram programadas algumas instruções utilizando-se blocos de função. Pode-se notar a utilização de blocos que executam operações simples com variáveis binárias, operações aritméticas com inteiros ou variáveis do tipo ponto flutuante, blocos de controle PID, multiplexadores, etc.

Os blocos de função estão divididos em famílias no PG4. As principais famílias são as seguintes:

- *Analog module*: são blocos onde pode-se configurar a posição ocupada pelos cartões de entrada e saída analógicos nos *slots* do CLP.
- *Binary*: funções binárias tais como E, OU lógicos.
- *Flip-Flop*: contem *flip-flops* do tipo RS, SR, JK, D, etc.
- *Counter*: contadores *up-down*, etc.
- *Time related*: atraso de transições *up-down*, cronômetros, etc.
- *Blinker*: geradores de onda quadrada com tempo programável.
- *Integer*: aritmética inteira.
- *Floating point*: aritmética de ponto flutuante.
- *Converter*: conversão de tipos (inteiro - ponto flutuante - binário).
- *Indirect*: leitura e cópia de marcadores.
- *Regulation* : controlador PID.
- *Graftec*: transições, estados, etc.

Os FB's são distribuídos em páginas dentro de arquivos. Pode-se determinar a seqüência que estas páginas serão varridas pelo ciclo de *scan* do CLP. Existem COB's (*ciclyc organization block*) que arquivos varridos ciclicamente, seguindo uma ordem de numeração. Existem PB's (*program blocks*) que são executados condicionalmente. As páginas são varridas em seqüência de numeração. Dentro de uma página a varredura se dá de cima para baixo e da esquerda para a direita, seguindo sempre o fluxo da informação.

O programa feito em FB, quando compilado, é transformado em um programa em lista de instruções, mas que é transparente ao programador.

Anexo 2: Lista de Pontos de Entrada e Saída

ENTRADAS ANALÓGICAS

Zona 1

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Faixa</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 1	TT - 1.01	Temperatura Forno Direita	0 a 1.400 °C	4 a 20 mA
SAIA 1	TT - 1.02	Temperatura Forno Esquerda	0 a 1.400 °C	4 a 20 mA
SAIA 1	TT - 1.03	Temperatura Centro Forno	0 a 1.400 °C	4 a 20 mA
SAIA 1	FT - 1.04	Vazão de Gás Natural	0 a 2.750 Nm ³ /h	4 a 20 mA
SAIA 1	FT - 1.02	Vazão de Ar Comprimido	0 a 1410 Nm ³ /h	4 a 20 mA
SAIA 1	FT - 1.03	Vazão Óleo Pesado	0 a 2.604 Kg/h	4 a 20 mA
SAIA 1	FT - 1.01	Vazão Ar de Combustão	0 a 27.500 Nm ³ /h	4 a 20 mA
SAIA 1	TT - 6.01	Temperatura Ar Atomização	0 a 200 °C	4 a 20 mA
SAIA 1	TT - 4.04	Temperatura Ar de Combust	0 a 600 °C	4 a 20 mA

Zona 2

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Faixa</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 2	TT - 2.01	Temperatura Forno	0 a 1.400 °C	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 2.02	Temperatura Centro Forno	0 a 1.400 °C	4 a 20 mA
SAIA 2	FT - 2.04	Vazão de Gás Natural	0 a 425 Nm ³ /h	4 a 20 mA
SAIA 2	FT - 2.02	Vazão de Ar Comprimido	0 a 220 Nm ³ /h	4 a 20 mA
SAIA 2	FT - 2.03	Vazão Óleo Pesado	0 a 402 Kg/h	4 a 20 mA
SAIA 2	FT - 2.01	Vazão Ar de Combustão	0 a 4.250 Nm ³ /h	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 6.01	Temperatura Ar Atomização	0 a 200 °C	4 a 20 mA
SAIA 2	PT - 6.02	Pressão Ar de Atomização	0 a 10 Bar	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 4.04	Temperatura Ar de Combust	0 a 600 °C	4 a 20 mA

Zona 3

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Faixa</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 3	TT - 3.01	Temperatura Forno	0 a 1.400 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 3.02	Temperatura Centro Forno	0 a 1.400 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	FT - 3.04	Vazão de Gás Natural	0 a 425 Nm3/h	4 a 20 mA
SAIA 3	FT - 3.02	Vazão de Ar Comprimido	0 a 220 Nm3/h	4 a 20 mA
SAIA 3	FT - 3.03	Vazão Óleo Pesado	0 a 402 Kg/h	4 a 20 mA
SAIA 3	FT - 3.01	Vazão Ar de Combustão	0 a 4.250 Nm3/h	4 a 20 mA
SAIA 3	PT - 6.02	Pressão Ar de Atomização	0 a 10 Bar	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 5.02	Temp. Óleo Saída do Tanque	0 a 150 °C	4 a 20 mA

Comum

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Faixa</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 3	PT - 4.02	Pressão Ar de Combustão	0 a 1.200 mm.ca.	4 a 20 mA
SAIA 3	PT - 4.01	Pressão Forno	-6,25 +6,25 mm.ca	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 4.01	Temperatura Fumos Saída Forno	0 a 1.200 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 4.02	Temp. Fumos Entr. Recuper. Ar	0 a 1.200 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 4.03	Temp. Fumos Saída Recuper. Ar	0 a 800 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 4.04	Temperatura Ar de Combustão	0 a 600 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 4.05	T. 1 Mancal Vent. Ar Combustão	0 a 100°C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 4.06	T. 2 Mancal Vent. Ar Combustão	0 a 100°C	4 a 20 mA
SAIA 1	TT - 5.01	Temp. Óleo Pesado Tanque	0 a 100 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 5.03	Temp. Óleo Desc. Aquec. Linha	0 a 200 °C	4 a 20 mA
SAIA 3	TT - 6.01	Temperatura Ar Atomização	0 a 200 °C	4 a 20 mA
SAIA 1	PT - 6.02	Pressão Ar de Atomização	0 a 10 Bar	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 7.01	Temperatura água resfriamento	0 a 100°C	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 7.02	Temperatura água resfriamento	0 a 100°C	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 7.03	Temperatura água resfriamento	0 a 100°C	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 7.04	Temperatura água resfriamento	0 a 100°C	4 a 20 mA
SAIA 2	TT - 7.05	Temperatura água resfriamento	0 a 100°C	4 a 20 mA
SAIA 2	PT - 8.01	Pressão Gás Natural	0 a 4 Bar	4 a 20 mA

SAÍDAS ANALÓGICAS

Zona 1

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 1	FY - 1.03	Comando Válvula Regulagem Óleo Pesado	4 a 20 mA
SAIA 1	FY - 1.02	Comando Válvula Regulagem Ar Atomização	4 a 20 mA
SAIA 1	FY - 1.04	Comando Válvula Regulagem Gás Natural	4 a 20 mA
SAIA 1	FY - 1.01	Comando Válvula Regulagem Ar de Combustão	4 a 20 mA

Zona 2

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 2	FY - 2.03	Controle Válvula Regulagem Óleo Pesado	4 a 20 mA
SAIA 2	FY - 2.02	Controle Válvula Regulagem Ar Atomização	4 a 20 mA
SAIA 2	FY - 2.04	Controle Válvula Regulagem Gás Natural	4 a 20 mA
SAIA 2	FY - 2.01	Controle Válvula Regulagem Ar de Combustão	4 a 20 mA

Zona 3

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 3	FY - 3.03	Controle Válvula Regulagem Óleo Pesado	4 a 20 mA
SAIA 3	FY - 3.02	Controle Válvula Regulagem Ar Atomização	4 a 20 mA
SAIA 3	FY - 3.04	Controle Válvula Regulagem Gás Natural	4 a 20 mA
SAIA 3	FY - 3.01	Controle Válvula Regulagem Ar de Combustão	4 a 20 mA

Comum

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 3	PY -4.02	Contr Válvula Regulagem Pressão Ar de Combustão	4 a 20 mA
SAIA 3	TY - 4.02	Controle Válvula de Diluição Recuperador Ar	4 a 20 mA
SAIA 3	PY - 4.01	Controle Válvula de Pressão Forno	4 a 20 mA
SAIA 3	TY - 4.04	Controle Válvula Ar de Escape	4 a 20 mA
SAIA 3	TY - 4.03	Controle Válvula <i>by-pass</i>	4 a 20 mA
SAIA 3	TY - 5.02	Contr Conversor Estático Aquec. Tq. Óleo de Linha	4 a 20 mA
SAIA 3	TY - 6.01	Controle Conversor Estático Aquec. Ar Atomização	4 a 20 mA

ENTRADAS DIGITAIS

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 3	PSL - 4.04	Pressostato Mínima Pressão Ar de Diluição/Indução	
SAIA 3	PSLL-4.03	Pressostato Muito Baixa Pressão Ar de Combustão	
SAIA 1	PSL - 5.01	Pressostato Mínima Pressão Óleo Pesado	
SAIA 1	PSH- 5.02	Pressostato Máxima Pressão Óleo Pesado	
SAIA 1	LSL - 5.01	Nível Mínimo Tanque Óleo Pesado	
SAIA 1	LSH - 5.02	Nível Máximo Tanque Óleo Pesado	
SAIA 1	TSH - 5.04	Termostato Máx Temp Aquec. Óleo Pesado Tanque	
SAIA 1	TSH - 5.05	Termostato Máx Temp Aquecedor Óleo Pesado 1	
SAIA 1	TSH - 5.06	Termostato Máx Temp Aquecedor Óleo Pesado 2	
SAIA 1	TSH - 5.07	Termostato Máx Temp Aquecedor Óleo Pesado 3	
SAIA 1	TSH - 6.02	Termostato Máx. Temp. Aquecedor de ar Atomização	
SAIA 1	PSL - 6.03	Pressostato Mínima Pressão Ar de Atomização	
SAIA 1	PSL - 6.01	Pressostato Mín Pres Ar Comprimido Instrumentação	
SAIA 2	PSL - 7.01	Pressostato Mín. pres. Água de Resfriam.sem contato	
SAIA 2	FSL - 7.01	Fluxostato Água de Resfriamento	
SAIA 2	PSL-7.02	Pressostato Mín pres Água de Resfriam.com contato	
SAIA 2	PSL - 8.02	Pressostato Mínima Pressão Gás Natural	
SAIA 2	PSH- 8.03	Pressostato Máxima Pressão Gás Natural	
SAIA 1, 2 e 3	PB - 9.01	Bloqueio de Emergência.	

(comum aos três SAIA)		(O mesmo botão da automação)	
SAIA 2	VF - 9.01	Falta de Tensão	
SAIA 1 [rev. 7]	SAIA 3.20	Sinal digital proveniente do SAIA 3 indicativo de BLOQUEIO	
SAIA 2 [rev. 7]	SAIA 3.20	Sinal digital proveniente do SAIA 3 indicativo de BLOQUEIO	

SAÍDAS DIGITAIS

<u>Ponto de Conexão</u>	<u>TAG</u>	<u>Função</u>	<u>Sinal</u>
SAIA 1	FSV - 1.01	Válvula de Bloqueio Óleo Pesado Zona 1	
SAIA 1	FSV - 1.02	Válvula de Bloqueio Gás Natural Zona 1	
SAIA 2	FSV - 2.01	Válvula de Bloqueio Óleo Pesado Zona 1	
SAIA 2	FSV - 2.02	Válvula de Bloqueio Gás Natural Zona 1	
SAIA 3	FSV - 3.01	Válvula de Bloqueio Óleo Pesado Zona 1	
SAIA 3	FSV - 3.02	Válvula de Bloqueio Gás Natural Zona 1	
SAIA 1	FSV - 5.01	Válvula de Bloqueio de Óleo Pesado	
SAIA 1 (obs.: válvulas ligadas na mesma saída em paralelo)	FSV - 8.01 FSV - 8.02 FSV - 8.03	Válvula de Bloqueio de Gás Válvula de Bloqueio de Gás Válvula de Bloqueio de Gás	
SAIA 3 [rev. 7]	SAIA 1.16 SAIA 2.15	Ligada a uma entrada digital do SAIA1 e uma entrada digital do SAIA2 tem a função de informar BLOQUEIO	

Bibliografia

[Documentação WEG] Documentação e Notas Técnicas WEG.

[Dorf 95] Dorf, Richard C. Modern Control Systems. Addison Wesley Publishing Company, Inc, USA, 1995.

[Lewis 95] Lewis, R. W. Programming Industrial Control Systems using IEC 1131-3. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1995.

[Norma WEG 96] Manuais de Procedimentos e Normas de Qualidade WEG. 1996.

[Ogata 93] Ogata, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. Editora Prentice Hall do Brasil LTDA, Rio de Janeiro, 1993.

[PLCopening 98] PLCopening. Standardization in Industrial Control Programming. October, 1998.

[Pressman 95] Pressman, Roger S.. Engenharia de Software. Makron Books, 1995.

[Saia 97] Saia-Burgess Electronics Ltd. Saia PCD Reference Guide. Edition 26/733 E6 – 07. 97.

[Smith 85] Smith, Carlos A.. Principles and Practice of Automatic Process Control. John Wiley & Sons, Inc., 1985.