

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Luiz Roberto Toledo de Oliveira e Souza

**SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO APLICADO
EM FORNO DE LEITO FLUIDIZADO**

São Carlos
2012

Luiz Roberto Toledo de Oliveira e Souza

**SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO APLICADO
EM FORNO DE LEITO FLUIDIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos
à obtenção do título de Engenheiro Eletricista,
na Escola de Engenharia de São Carlos,
da Universidade de São Paulo.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Dennis Brandão

**São Carlos
2012**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

T729s Toledo de Oliveira e Souza, Luiz Roberto
SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO APLICADO EM FORNO
DE LEITO FLUIDIZADO / Luiz Roberto Toledo de Oliveira e
Souza; orientador Dennis Brandão. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2012.

1. leito fluidizado. 2. CLP. 3. fluidização. 4.
IHM. 5. minério. 6. processo físico-químico. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Luiz Roberto Toledo de Oliveira e Souza

Título: “Sistema de Controle e Automação Aplicado em Forno de Leito Fluidizado”

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 27 / 11 / 2012,*

com NOTA 8,0 (oito, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Dennis Brandão (Orientador)
SEL/EESC/USP

Prof. Assistente Edson Gesualdo
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

Dedico esta monografia a meus pais, Paulo e Beatriz,
pelos inúmeros exemplos de força de vontade,
pelo eterno apoio e motivação,
pela presença constante.
Sem eles nada disso seria concretizado.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a meus familiares pelo constante apoio durante esta etapa da minha vida.

Agradeço ao meu irmão, Paulo, bem mais experiente que eu, por toda a instrução e apoio dados durante a construção da base para minha carreira. Muito obrigado.

Agradeço ao meu orientador e professor, Dennis Brandão, com quem tenho muito a aprender, pela motivação dada desde o início do curso para fazer o que faço agora e farei a partir de então. Talvez, sem suas disciplinas, não teria tomado gosto pela profissão e seguido este caminho.

Agradeço às amizades sinceras feitas durante a graduação. Vocês me apoiaram, suportaram e me levaram a diante. Sempre presentes nos momentos de dificuldade, assim como em todos aqueles nos quais nos divertimos, meus sinceros agradecimentos.

Agradeço as amizades São Carlenses. Antigas, sinceras e as quais dispensam comentários sobre o quanto de alívio geraram durante os momentos difíceis.

Agradeço ao amigo Guilherme (Cata), pelo apoio, ensinamentos e motivação para iniciar minhas atividades no Laboratório de Automação Industrial.

Agradeço à minha namorada e amiga, Johana Rosas, quem compartilhou momentos desta graduação desde o 3º ano e deu bom exemplo de seriedade para conclusão desta.

Agradeço aos professores que me apoiaram, mesmo que sem ciência disso. Sem algumas palavras sinceras e as dificuldades eu não teria construído o título que estou prestes a receber.

Agradeço também aos funcionários do Departamento por todo o trabalho realizado no intuito de permitir o bom andamento do Curso.

"A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido, não na vitória propriamente dita"

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

A evolução da indústria, no sentido de se tornar mais eficiente, é oriunda das necessidades de mercado. Este desenvolvimento está diretamente ligado ao conceito de Controle e Automação. Este projeto foi desenvolvido para controle de um forno de leito fluidizado, construído para a empresa Vale do Rio Doce com a finalidade de pesquisa e desenvolvimento de novos processos de sintetização de minérios. Inicialmente são apresentadas as motivações do projeto e seus principais objetivos, assim como as etapas do projeto. Num segundo momento são apresentados como revisão bibliográfica todos os conceitos envolvidos no projeto visando simplificar seu entendimento. Após a revisão dos conceitos, são descritos as diversas partes mecânicas, o funcionamento e enfim, os principais componentes elétricos utilizados para o controle; dentre estes os principais são: transdutores de temperatura, CLP, supervisório (SCADA) e IHM. Estes dois últimos itens têm como função no projeto a inserção de parâmetros desejáveis e a coleta de dados para uma correta supervisão, o que possibilita estudos de todos os dados, para fins de desenvolvimento do novo processo na mineradora. Finalmente, são apresentados os resultados da elaboração do projeto e a conclusão, onde mostra-se que foi conseguido o funcionamento e a operabilidade desejados inicialmente. As variáveis controladas mantiveram estabilidade e traduziram com clareza o que ocorria durante o processo.

Palavras-chave: leito fluidizado, fluidização, minério, CLP, IHM, processo físico-químico.

ABSTRACT

The evolution of the industry to become more efficient is derived from market needs. This development is directly linked with the idea of Control and Automation. The proposed project deals with the control of a fluidized bed oven built for the company Vale do Rio Doce for the purpose of research and development of new processes for synthesizing ores. Initially we present the motivations of the project and its main objectives, as well as the steps of the project. Secondly will be presented a literature review of all the concepts involved in the project to simplify its understanding. After reviewing the concepts, various mechanical parts, operation and major electrical components are described. In this context were primarily used temperature transducers, PLC, supervisory (SCADA) and HMI to make possible the insertion of desired parameters and data collection for proper supervision and also further analysis of the data. Finally it is presented design and conclusion, these being the closure of the initial goals of the project. Finally the results of project are presented and also conclusion, where it is shown that the operation and operability initially desired were both achieved. The controlled variables remained stable and show with clarity what happened during the process.

Keywords: fluidized bed, fluidization, ore, PLC, HMI, physical-chemical process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de blocos geral dos processos automatizados	1
Figura 2: Exemplos de Controladores Lógicos Programáveis	4
Figura 3: Operação OR em <i>Ladder</i>	5
Figura 4: Exemplos de IHMs	6
Figura 5: Representação de um motor CC escovado	6
Figura 6: Representação da Lei de Fleming.....	7
Figura 7: Representação de um motor CC sem escovas	8
Figura 8: Tensão de Seebeck.....	9
Figura 9: Termopar tipo K	9
Figura 10: Exemplos de células de carga.....	10
Figura 11: Fluxômetro mássico Alicat.....	11
Figura 12: Exemplo de aplicação em SCADA.....	12
Figura 13: Reator de leito fluidizado.....	14
Figura 14: Visão geral do forno com reator de leito fluidizado	16
Figura 15: Pré-aquecedor de gases.....	17
Figura 16: Alimentador de material	18
Figura 17: Retorta	19
Figura 18: Balança principal	19
Figura 19: Conjunto ciclone.....	20
Figura 20: Micrologix 1400 e cartões de expansão para termopar	23
Figura 21: Interface RSLogix 500.....	23
Figura 22: Panel View Component C1000.....	24
Figura 23: PanelView Design	25
Figura 24: Organizer	26
Figura 25: Forno finalizado.....	27
Figura 26: Fluxograma de funcionamento	28
Figura 27: Tela Controle de Temperatura	31
Figura 28: Tela Controle Geral	31
Figura 29: Tela de configuração da balança e alimentador	32
Figura 30: Tela de gráfico de temperatura	32
Figura 31: Tela principal do supervísório	33
Figura 32: Tela de edição de receitas	33
Figura 33: Comunicação de supervisão	34
Figura 34: Painel elétrico	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características de alguns termopares	9
Tabela 2: Variáveis de Entradas e Saídas.....	29
Tabela 3: Variáveis supervisionadas	29

LISTA DE SIGLAS

CLP – Controlador Lógico Programável

PID – Proporcional Integrativo Derivativo

IHM – Interface Homem Máquina

CC – Corrente Contínua

PWM – *Pulse Width Modulation* (em português, Modulação por Largura de Pulso)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Resumo de Atividades.....	3
2 CONCEITOS E MATERIAIS INTEGRADOS.....	4
2.1 Controlador Lógico Programável.....	4
2.2 Interface Homem Máquina.....	5
2.3 Motor CC	6
2.4 Transdutores	8
2.4.1 Termopar	8
2.4.2 Célula de carga	9
2.4.3 Fluxômetro Mássico.....	10
2.5 Supervisório	11
2.6 Controle PID	12
2.7 Óxido-redução.....	13
2.8 Leito Fluidizado	14
3 O FORNO E EQUIPAMENTOS DE AUTOMAÇÃO.....	16
3.1 Memorial Descritivo	16
3.2 Materiais de automação.....	21
3.2.1 Controlador Lógico Programável.....	22
3.2.2 Interface Homem Máquina.....	24
3.2.3 Supervisório	25
4 RESULTADOS	27
4.1 Variáveis Controladas	28
4.2 Medição.....	29
4.3 Controle.....	30
4.4 Supervisão	30
4.5 Rede de comunicação e ligação elétrica.....	34
5 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
ANEXO 1: Esquema elétrico controle.....	38
ANEXO 2: Esquema elétrico CLP.....	39

1 INTRODUÇÃO

O anseio pelo uso de ferramentas que possam substituir o trabalho do homem não é sentimento atual e sim dos primórdios da civilização ou até mesmo antes, quando nossos ancestrais procuravam objetos para realizar tarefas que poderiam ser difíceis ou então irrealizáveis (RIBEIRO, 2001).

Ao final da Idade Média a ideia de substituição do homem pela máquina para realizar tais tarefas ganhou força e fomentou o desenvolvimento e a busca por um autômato que fosse capaz de realizar as funções operárias do homem com mais rapidez, maior precisão, menor custo, com melhor qualidade e em um menor espaço de tempo.

Nos últimos anos a globalização fez com que as empresas evoluíssem e investissem no sentido de se tornarem cada vez mais eficientes. Esse crescimento das empresas foi impulsionado por necessidades competitivas para um mercado com produtos de mais baixo custo e melhor qualidade. O conjunto de instrumentos, ferramentas e técnicas adotadas nas fábricas para minimizar a mão-de-obra na produção recebe o nome de Automação. No contexto histórico a automação está diretamente ligada à mecanização de processos como, por exemplo, a utilização da roda que data da época de, aproximadamente, 3500 a.C. Nessa época o intuito era exatamente o mesmo que hoje, minimizar o esforço do homem e realizar as tarefas de forma mais eficiente. Segundo Rosário (2005), a automação industrial integra três áreas: a eletrônica constituinte do *hardware*, a mecânica representada pelos atuadores e a informática responsável pelo *software* que controla todo o sistema.

Os sistemas automatizados assumem diversas formas e tamanhos, podendo representar um único equipamento ou então toda a planta de uma indústria. Porém, independentemente do tamanho do sistema automatizado, a lógica do processo pode ser representada, de forma geral como na Figura 1. Em resumo, o sensor coleta informações do processo, envia ao controlador para que estas sejam processadas, o controlador emite uma saída ao atuador e este realiza alguma ação no processo no sentido de corrigi-lo.

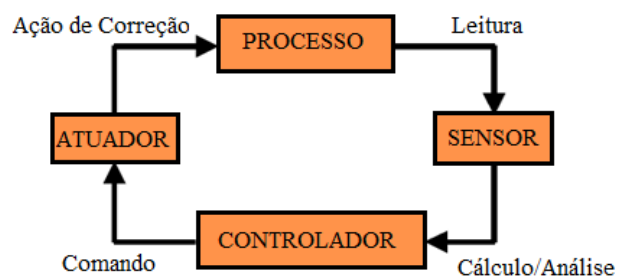


Figura 1: Diagrama de blocos geral dos processos automatizados

No projeto do qual este trabalho trata não foi diferente, havia um processo a ser controlado, sensores para extrair as informações, controlador para interpretá-las e atuadores que alterariam a dinâmica do processo no sentido de melhor atingir os objetivos desejados. Neste projeto o processo a ser controlado era uma reação físico-química de óxido-redução, realizada dentro de forno de leito fluidizado com objetivo de extrair minério de maior valor de determinada mistura inicial.

Os conceitos aprendidos durante o curso puderam ser colocados em prática devido às características de automação do projeto. O mesmo envolveu o controle de três zonas de aquecimento do forno, dois pré-aquecedores de gás e controle de fluxo de três tipos de gases, trabalhando sempre sob controle de receita elaborada pelos engenheiros de minério do P&D da Vale do Rio Doce. O controle envolveu *hardware* (CLP, sensores, *driver* de potência, etc) e *software* elaborado em *Ladder*, Elipse SCADA e IHM.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a realização de projeto e execução da automação aplicada em forno dotado de reator de leito fluidizado fazendo uso de tecnologias capazes de integrar todos os elementos do processo, facilitar a operação do equipamento e garantir a segurança do funcionamento.

A automação do equipamento foi realizada em São Carlos, em parceria das empresas Toledo&Souza e Fortelab, fabricante de fornos industriais. O equipamento automatizado realiza a fluidização de resíduos minerais do processo para obtenção de um ou mais elementos de maior valor e utilidade. Tal processo é, na realidade, o tratamento térmico dos metais, para que estes possam ser extraídos separadamente por meio de magnetização. A fluidização é feita para propiciar ambiente favorável à ocorrência da reação de óxido-redução entre os minérios e os gases nele adicionados.

Além de interface prática e amigável com o usuário, o projeto requeria estabilidade no controle de temperatura, segurança para proteção dos usuários e do equipamento e, principalmente, a possibilidade de armazenamento e análise de dados de todas as variáveis envolvidas no processo, tanto durante a operação quanto em momento posterior ao seu uso. Neste contexto justifica-se o uso de duas ferramentas comuns na indústria de processos, as IHMs, que tiveram utilidade nos ajustes de parâmetros realizados na planta da fábrica, e os *softwares* supervisórios, também responsáveis por ajustes, e que tiveram importância na estruturação de vasto banco de dados, que puderam ser estudados também em formas gráficas. Vale salientar que o supervisório realiza suas interações de modo remoto, já as IHMs são construídas para trabalhar dentro da planta, sendo mais robustas que computadores comuns.

Este trabalho tem como foco a automação do equipamento. Apesar disso outros elementos da parte elétrica são abordados, assim como alguns componentes da parte mecânica do equipamento, estes últimos tratados de modo mais superficial, pois se encontram além do âmbito do trabalho.

Os métodos e conceitos ilustrados neste texto podem ser estendidos a outros sistemas cujas variáveis de controle sejam semelhantes. Outros conceitos ainda poderão ser estendidos mais adiante, abordando trabalhos em áreas totalmente diferentes, mas que apresentem requerimentos de projeto e controle análogos.

1.2 Resumo de Atividades

Lista-se em sequência cronológica as atividades para elaboração do projeto:

1. Reconhecimento dos requisitos de projeto;
2. Estudo dos equipamentos possíveis de instalação;
3. Estudo da viabilidade técnica e financeira;
4. Projeto de automação;
5. Execução do projeto;
6. Testes de projeto;
7. Resultados e correções;
8. Testes finais;
9. Entrega do equipamento.

2 CONCEITOS E MATERIAIS INTEGRADOS

Neste capítulo são apresentados os conceitos envolvendo os equipamentos integrados, àqueles escolhidos para automação e àqueles que dizem respeito ao processo controlado. Vale salientar que os equipamentos escolhidos foram o CLP, a IHM e o software supervisor. Outros equipamentos utilizados e aqui explicados foram definidos pela fabricante de fornos para integração. Esta concessão se deu devido à utilização anterior destes produtos pela Fortelab.

2.1 Controlador Lógico Programável

Os processos industriais tratam, de uma forma geral, do controle e supervisão de variáveis, tomada de decisão e realimentação por meio de atuadores. Em diversos casos o número de variáveis e operações requeridas impossibilita ou inviabiliza a execução por meio de lógicas elétricas a relé. A industrialização da eletrônica tornou viável a utilização de comandos elétricos em larga escala e, conseqüentemente, o surgimento dos CLPs (RIBEIRO, 2001). Estes, por sua vez, realizam milhares de operações em pequenos espaços de tempo, tornando o processamento dos dados da planta industrial muito rápido e confiável.

Com o advento dos CLPs tornou-se possível, entre outras funções, a realização de sequenciamentos, lógicas, intertravamentos, temporização, controle de variáveis analógicas, controle PID, controle de entradas e saídas (E/S) remotas, etc. No projeto trabalhado foram essenciais as funções de controle PID, controle de variáveis analógicas e sequenciamento, além do controle discreto de válvulas. A Figura 2 ilustra alguns controladores de diferentes fabricantes.



Figura 2: Exemplos de Controladores Lógicos Programáveis

Tais controladores são basicamente programados por meio de linguagem denominada *Ladder*, a qual faz alusão a um diagrama elétrico de relés, tornando o entendimento ainda mais claro e lógico. Segundo Ribeiro (2001, p. 5.1), “[...] *ladder* é uma representação ordenada em forma de escada de componentes e conexões de um circuito elétrico [...]” A Figura 3 exemplifica uma linha de comando em linguagem *Ladder* para a realização da operação “OR”, onde é possível acionar a Saída por meio tanto do botão nomeado “A” como o botão “B”.

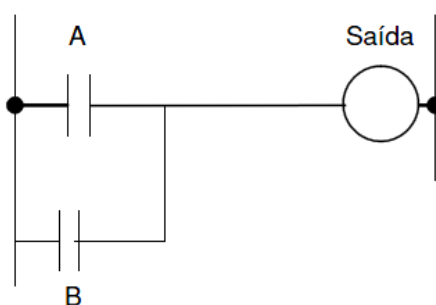


Figura 3: Operação OR em *Ladder*

(BRANDÃO, 2010)

A linguagem *Ladder* proporciona ao usuário uma forma prática e flexível de programação, pois as alterações são feitas via *software* e não *hardware*. Desse modo, assim como no projeto realizado, as possíveis alterações que poderiam ocorrer durante o desenvolvimento ou então durante os testes eram facilitadas, fato que não ocorre quando se usa lógica a relé.

2.2 Interface Homem Máquina

As Interfaces Homem Máquina, ou IHMs, são utilizadas na indústria como equipamentos de operação e supervisão de máquinas ou plantas. O operador pode ler e escrever quaisquer parâmetros da máquina na memória do CLP. Atualmente existem sistemas trabalhando independentemente de CLPs, sendo a lógica realizada por meio de sinais recebidos pela IHM e pequenos controladores, como os de temperatura. Outros sistemas ainda realizam lógicas de segurança, coleta de dados, operação e supervisão remotas ou então a visualização, em tempo real, de imagens capturadas por câmera instalada na planta da indústria.

Estes equipamentos dispõem, em sua maioria, de tela sensível ao toque. Por meio desta tela o usuário realiza a entrada de dados e também sua leitura. Segundo Ribeiro (2001), “Há uma necessidade para o desenvolvimento de *displays* que permitam o operador ter uma noção do estado do

sistema, de modo rápido e sem fazer esforço’. A Figura 4 ilustra exemplos de IHMs da fabricante DELTA.



Figura 4: Exemplos de IHMs

Fonte: (DELTA ELETRONICS, 2012)

2.3 Motor CC

Muito utilizado na indústria devido sua facilidade de controle, como cita Fitzgerald (2006), “[...] sistemas de máquinas CC têm sido usados freqüentemente em aplicações que exigem uma ampla faixa de velocidades ou de controle preciso da saída do motor [...]”. Para entendermos o funcionamento dos motores CC não escovados devemos inicialmente rever os conceitos que envolvem o funcionamento do motor escovado. Estes são compostos basicamente por sete componentes: eixo, armadura, rotor, comutador, estator, ímãs e escovas. Os ímãs estão dispostos voltados para o eixo envolvendo duas espiras de fios posicionadas no rotor, como ilustrado na Figura 5.

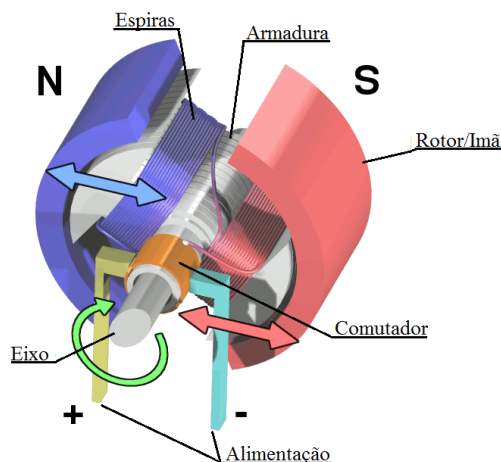


Figura 5: Representação de um motor CC escovado

Fonte: (WIKIPEDIA, 2012)

As espiras são posicionadas voltadas para os ímãs, o que acarreta força de repulsão nas espiras e uma consequente rotação do rotor devido à energização das mesmas. Esse fato se dá pela lei de John Ambrose Fleming, a qual fez uso de princípios já existentes na época para explicar com maior simplicidade o funcionamento do rotor. Tal lei aponta que se uma corrente flui em um fio (ou espira) que é atravessado por um campo magnético, este sofre uma força resultante no sentido mostrado na Figura 6. Esta força empurra o rotor no sentido do outro pólo e, quando esta espira chega ao outro lado ocorre a mudança de sentido na corrente realizada pelo comutador, fazendo com que o processo se repita e o motor comece a girar. A facilidade do controle da velocidade apenas alterando a corrente injetada no circuito do comutador é uma vantagem deste motor.

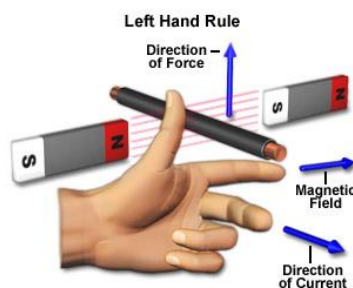


Figura 6: Representação da Lei de Fleming

Fonte: (FLORIDA UNIVERSITY, 2012)

O mesmo princípio de funcionamento se aplica aos motores CC não escovados, ou seja, as espiras conduzem corrente por meio de um campo magnético induzindo uma força de repulsão dos pólos para o rotor, porém, neste caso, os ímãs constituem o rotor e as espiras o estator. Neste caso existe o problema do posicionamento do rotor. Deste modo, o mais comum é a utilização do sensor Hall, que detecta a mudança da polaridade do rotor e envia um sinal a cada evento, assim um circuito eletrônico pode realizar a comutação com base no posicionamento e assim controlar devidamente o motor. Este motor tem como principais vantagens em relação aos motores escovados o seguinte:

- Devido à necessidade de um *driver* de controle há uma maior precisão, podendo controlar exatamente a velocidade, o que torna o motor mais eficiente;
- Não há faiscamento ou ruído elétrico;
- Manutenção mínima ou inexistente, pois não faz uso das escovas;
- Por seu rotor ser constituído pelos ímãs a refrigeração é facilitada;
- Aumento da eficiência devido a ausência do atrito com as escovas.

Como desvantagens destes motores podem ser citados dois fatores: qualidades construtivas e controle eletrônico para posicionamento e velocidade. A Figura 7 apresenta um esquema da estrutura destes motores.



Figura 7: Representação de um motor CC sem escovas

Fonte: (GREEN ENERGY, 2012)

2.4 Transdutores

Transdutores são dispositivos que convertem um tipo de energia, seja ela térmica, acústica, eletromagnética em outra forma de energia, porém, transdutores são mais comumente associados a sensores que captam uma determinada grandeza e geram como saída um sinal elétrico, ou seja, uma força eletromotriz proporcional à grandeza a ser medida (BENTLEY, 2005). Dessa forma, estes sensores podem medir uma temperatura e, em relação à sua grandeza, gerar uma diferença de potencial elétrico.

2.4.1 Termopar

Termopar é um sensor de temperatura do tipo gerador de tensão, sendo assim o sensor ativo que produz tensão proporcional à temperatura. A teoria do efeito termoelétrico, ou Efeito Seebeck, ocorrido nos termopares é baseada no transporte de elétrons através de diferentes metais, assim, quando um metal é mantido a uma determinada temperatura a vibração dos átomos altera a movimentação dos elétrons que, finalmente, gera uma diferença de potencial na extensão do material (GESUALDO, 2012). Essa tensão, ou tendência de deslocamento de elétrons, varia com a condutividade térmica do material e tem uma linearidade razoável à variação de temperatura, o que facilita o processamento do controle desta variável. A Figura 8 ilustra a tensão do Efeito de Seebeck.

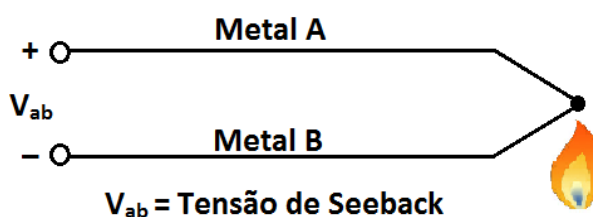


Figura 8: Tensão de Seebeck

Desse modo há uma série de diferentes termopares devido a diferentes ligas metálicas utilizadas, o que levou a uma classificação por letras (T, J, E, K, S, R) para as diferentes características como: faixa de medida, linearidade, sensibilidade, etc. A Tabela 1 ilustra alguns tipos de termopares e a Figura 9 um termopar.

Tabela 1: Características de alguns termopares

TIPO	ELEMENTO POSITIVO	ELEMENTO NEGATIVO	FAIXA DE TEMPERATURA USUAL
T	Cobre	Constantan	-184 à 370°C
J	Ferro	Constantan	0 à 760°C
E	Níquel Cromo	Cobre Níquel	0 à 870°C
K	Chromel	Alumel	0 à 1200°C
S	Platina 90% 10% Rhódio	Platina 100%	0 à 1600°C
R	Platina 87% 13% Rhódio	Platina 100%	0 à 1600°C

Fonte: (GESUALDO, 2012)



Figura 9: Termopar tipo K

Fonte: (BAGAREL, 2012)

2.4.2 Célula de carga

Segundo Gesualdo (2012), “Células de carga são transdutores que medem força, torque ou pressão.” O funcionamento da célula de carga se baseia na variação da resistência ôhmica de sensores denominados *Strain Gage*. Este sensor é fixado ao corpo da célula e recebe as mesmas deformações mecânicas desta. Valendo-se da alteração da resistência elétrica quando um material é esticado ou

comprimido, o sensor gera variação de tensão. Usualmente a célula de carga consiste de quatro *Strain Gages* em configuração de Ponte de Wheatstone e o desbalanceamento de tensão desta é proporcional à força aplicada, ou seja, a saída de tensão decorrente do desbalanceamento da Ponte representa um valor de uma carga aplicada. Existem ainda outros tipos de células de carga menos comuns, como é o caso das células capacitivas, hidráulicas e piezoelétricas. A Figura 10 ilustra exemplos de células de carga.

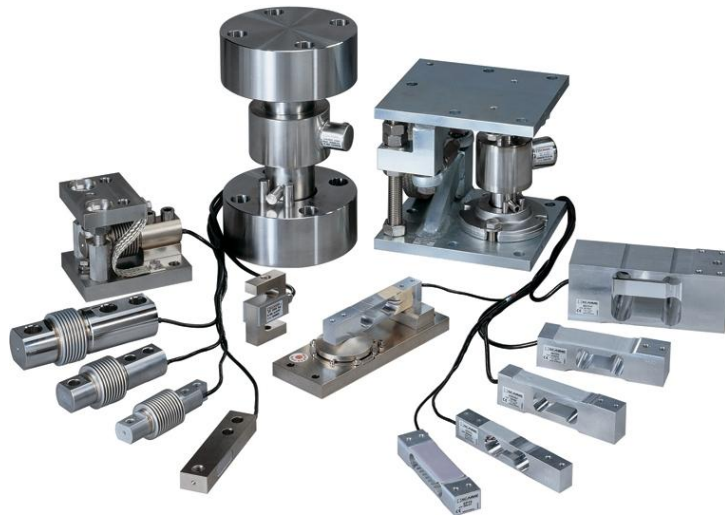


Figura 10: Exemplos de células de carga

Fonte: (ONIX METROLOGIA, 2012)

2.4.3 Fluxômetro Mássico

Fluxômetros são instrumentos utilizados para medição de fluxo de um fluido. Fluxômetro mássico é um dispositivo responsável pela medição da taxa do fluxo de massa de um fluido que é conduzido por um tubo, isto é, a massa do fluido que atravessa um ponto fixo por unidade de tempo. Desta forma, se a unidade desejada for, por exemplo, o volume do fluido, deve-se dividir a taxa de massa encontrada pela densidade do fluido, porém isto só é possível se a densidade deste for relativamente constante, caso contrário o cálculo indicará valores que não correspondem à realidade (ALICAT, 2012).

Há dois tipos mais comuns de medição de fluxo de massa, são eles o método por fluxo laminar e por diferencial de temperatura. No primeiro gás que flui dentro do medidor é conduzido através de diversos tubos de diâmetro reduzido, de forma que o fluxo que passa por este seja laminar e assim possa ser medida a queda de pressão durante a passagem por esta estreita tubulação. A queda de pressão está diretamente relacionada com o volume do gás que ali flui e com esta medida podemos obter a taxa de fluxo de massa fazendo uso da densidade do líquido numa determinada temperatura e pressão. O segundo método envolve a passagem do fluido por uma tubulação de diâmetro reduzido envolta por dois conjuntos de resistências que aquecem a tubulação. O fluido que passará por meio

desta tubulação carrega o calor de uma extremidade até a outra, fazendo com que seja criada uma diferença de temperatura entre as duas extremidades. Como a resistência dos dois conjuntos de fios enrolados no tubo variam com a temperatura, há uma diferença nestas resistências e assim, também, uma correspondência proporcional ao fluxo de massa que passa pela tubulação. Desta forma também pode ser encontrado o volume por meio da densidade do fluido que corre pelo medidor (HOWARD, 1989). A Figura 11 ilustra um fluxômetro mássico da fabricante Alicat, utilizado no projeto.



Figura 11: Fluxômetro mássico Alicat

Fonte: (ALICAT, 2012)

2.5 Supervisório

Segundo Ribeiro (2001), os supervisórios têm como função receber, armazenar, processar e ilustrar todas as variáveis do processo de tal forma que o usuário possa obter quaisquer informações da dinâmica do processo, seja em tempo real ou análise futura.

Atualmente têm funcionalidades semelhantes ao de IHMs, visto que estas últimas vão além do controle direto do processo. Ainda assim, as duas ferramentas, IHM e supervisório, são comumente utilizadas simultaneamente na indústria, pois as IHMs têm robustez e estabilidade não encontradas em computadores pessoais comuns e, por outro lado, as funcionalidades dos supervisórios também não são encontradas em todos os modelos de IHMs. Desta forma, o uso conjunto complementa o controle de uma operação e é devido a este uso conjunto que existe uma interface de comunicação entre as duas ferramentas de modo que as informações contidas na IHM e que foram extraídas da planta possam ser transmitidas para um supervisório sem a necessidade de comunicação direta deste com o controlador. A Figura 12 ilustra uma aplicação utilizando um tipo de supervisório chamado SCADA, do inglês, Controle Supervisório e Aquisição de Dados.



Figura 12: Exemplo de aplicação em SCADA

Fonte: (ELIPSE KNOWLEDGE BASE, 2012)

Na Figura 12 é ilustrada a organização geral de uma estação de saneamento. Desta tela é possível navegar até outras telas que demonstram cada parte do processo em detalhes, mostrando informações como a abertura ou fechamento de uma válvula, o fluxo de um líquido em uma tubulação, a temperatura de uma determinada caldeira, etc.

2.6 Controle PID

Como constata Brandão (2011), “Os sistemas de controle de processos contínuos possuem o objetivo de manter variáveis de processo dentro de limites pré-estabelecidos de desempenho e segurança.”. Para atingir estes objetivos podem ser realizados dois tipos de controle: em malha aberta, onde basicamente o operador controla um atuador a fim de modificar ou corrigir um estado do processo e em malha fechada, modo em que há um controlador realizando a comparação da variável a ser controlada com o valor desejado e tomando uma decisão de atuação a respeito da diferença por ele percebida entre a variável lida e o valor desejado.

O controle em malha fechada demanda um investimento maior na construção, já que necessita medidores de grandezas, controladores e elementos atuantes no processo. Por outro lado, apresenta a vantagem de operar sem a intervenção do operador e de reagir de melhor forma às mudanças ocorridas na dinâmica do processo ou então distúrbios ocorridos no mesmo. Desta forma, podemos concluir que o controle tem basicamente três funções, como cita Brandão (2011): medição da grandeza presente no processo, comparação do valor lido com o desejado e , se necessário, atuação direta no processo com a finalidade de corrigir-lo.

Os controladores PID têm 4 diferentes formas de responder as alterações ocorridas na variável controlada, são elas:

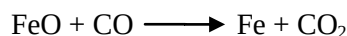
- Controle de resposta Liga/Desliga: neste modo, o controlador atua no processo até que a variável tenha seu valor atingido, podendo este ser uma faixa de valores ou então um valor pontual. Quando o valor é atingido o controlador desliga a atuação e o valor tende a decair e quando seu valor é menor que o desejado o controlador ativa a atuação no sentido de retornar a variável ao valor de processo;
- Controle de resposta Proporcional(P) ao erro: controle em que o valor de correção gerado pelo controlador representa um ganho proporcional ao desvio percebido entre a variável atual e a desejada. Como a correção é proporcional ao valor de desvio, restará uma diferença entre o valor desejado e o real devido a dimensão do erro, este valor é denominado *off-set*. Tal valor pode ser diminuído com os ajustes do ganho proporcional;
- Controle de resposta proporcional à Integral(P + I) do erro: neste modo de controle a velocidade da correção do sinal de saída proporcional a amplitude do erro, ou então, a integral do erro ao longo do tempo. Na presença de erro este controlador sempre irá atuar na saída, de modo que o *off-set* possa ser anulado;
- Controle de resposta proporcional à Derivada(P + I + D) do erro: capaz de produzir reações mais rápidas do controlador, por ser proporcional a velocidade de desvio, este tipo de controle é muito utilizado quando no controle de temperaturas devido a aparente ausência de ruídos críticos e a reação lenta deste processo.

2.7 Óxido-redução

Segundo constata Tito & Canto (2002), as reações de óxido-redução são “[...] reações químicas que envolvem transferência de elétrons. Tais processos, denominados reações de óxido-redução, envolvem substâncias com a tendência a doar elétrons e substâncias com tendência a receber elétrons[...]”. O nome deste processo é oriundo de outros dois conceitos químicos, são eles a oxidação que é o processo onde um elemento químico perde elétrons e a redução, processo pelo qual um elemento recebe elétrons. No que diz respeito ao balanço de cargas desses elementos a oxidação ou a redução, isoladas, são também chamadas de meias-reações pelo fato de não serem energeticamente balanceadas, ou seja, nessas reações há somente uma via de fluxo de elétrons, assim, é possível concluir que não há ocorrência de uma redução sem uma oxidação e vice-versa devido ao fluxo unidirecional de energia.

Um exemplo do uso desta reação química executada também em fornos como o trabalhado neste projeto é a obtenção do Ferro a partir do mineral de ferro ou óxido de ferro. Neste processo são

adicionados os óxidos ao leito fluidizado, onde o fluido em questão é o monóxido de carbono (há processos onde o gás usado como fluido é obtido juntamente com a reação), e assim, por meio da inserção de temperaturas corretas pode-se obter a reação de obtenção do ferro metálico mostrado a seguir:



2.8 Leito Fluidizado

Alguns materiais necessitam de condições específicas para serem sintetizados em uma reação físico-química. Tais condições podem ser, por exemplo, pressão, temperatura, área de superfície, entre outras. O leito fluidizado é utilizado exatamente em situações que exigem todos estes cuidados, ou seja, é criado dentro dele o devido ambiente para a ocorrência da reação.

O leito fluidizado consiste em um leito por onde é conduzido um material sólido particulado por meio de um fluido. Com o aumento do fluxo deste fluido faz-se com que a força exercida por este seja igual ou maior que a força peso do material particulado, ou seja, ocorre a suspensão do material e o início de seu comportamento semelhante ao de um fluido. Neste momento em que o material particulado começa a reagir e o fluxo do fluido é aumentado, a mistura contida no leito se expande e começa a circular por dentro do leito até o ponto mais alto e então segue para coleta. A Figura 13 ilustra um esquema de um reator de leito fluidizado.

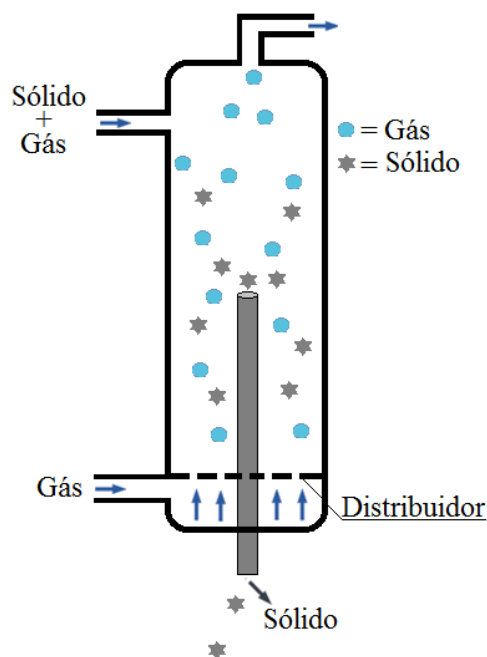


Figura 13: Reator de leito fluidizado

A utilização do leito fluidizado tem algumas vantagens, como:

- Uniformidade da mistura do material, o que resulta em produto final com características uniformes;
- Gradientes de temperatura uniformes, importante para a correta ocorrência das reações;
- Possibilidade da operação em batelada ou em modo contínuo, pois a própria natureza do processo permite a constante retirada e adição de material ou então a utilização por lotes, o que torna este processo bastante atrativo para indústrias.
- Facilidade de escoamento em dutos devido ao comportamento de fluido adquiridos pelos sólidos em suspensão;
- Favorecimento da transferência de energia devido à fluidez.

Como desvantagens este processo apresenta:

- Necessidade de constante bombeamento de gás e pressurização;
- Necessidade de colocação de filtros e/ou catalisadores para eliminação ou filtração das partículas carregadas para fora do equipamento juntamente com o fluido;
- Corrosão das partes internas do equipamento.

3 O FORNO E EQUIPAMENTOS DE AUTOMAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os métodos de trabalho, os materiais empregados, a operação do equipamento e os testes realizados. O equipamento automatizado descrito a seguir é destinado a testes laboratoriais do P&D da Vale do Rio Doce de Belo horizonte, empresa brasileira de mineração.

3.1 Memorial Descritivo

O equipamento automatizado realiza a fluidização de resíduos minerais de determinado processo para obtenção de um ou mais elementos de maior valor e utilidade. Trata-se de um tratamento térmico dos minérios de modo a criar condições para separação magnética dos elementos de interesse. A fluidização é utilizada para propiciar ambiente favorável de ocorrência da reação de óxido-redução, para isso são utilizados diversos tipos de gases. A seguir, a Figura 14 ilustra a visão geral do forno, na qual são destacadas as partes principais deste.

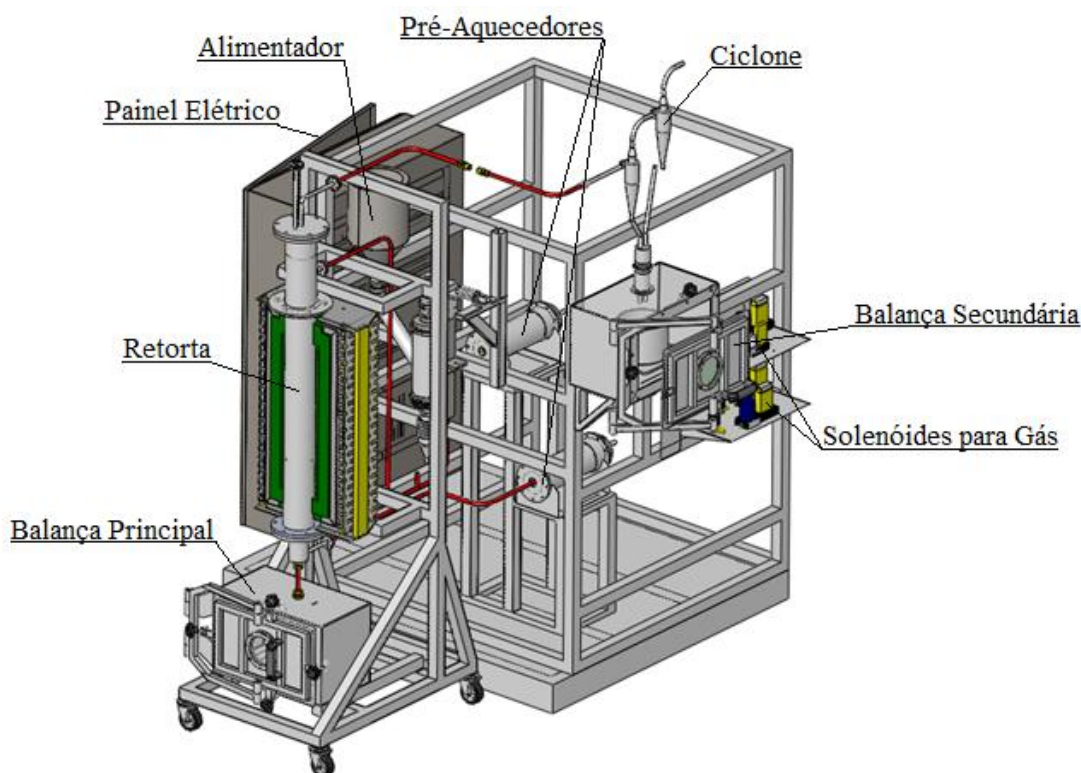


Figura 14: Visão geral do forno com reator de leito fluidizado

Fonte: (FORTELAB, 2011)

Primeiramente são descritos os principais componentes mecânicos do forno, assim como sua função, para melhor entendimento.

O forno é constituído por cinco partes principais, são elas: pré-aquecedor de gases, alimentador de material, retorta, balança principal e conjunto ciclone. A seguir estas são explicadas na seqüência de funcionamento do equipamento:

- Pré-aquecedor de gases: realiza aquecimento preliminar dos gases que são utilizados no processo. Estes entram no pré-aquecedor, passam por um tijolo de silico-aluminosa, o qual realiza a função de filtro e isolamento térmica, e entram na câmara onde se encontram as resistências térmicas com temperatura controlada via CLP. Depois de aquecidos, os gases passam por outro tijolo como na entrada e são direcionados para o alimentador e, posteriormente, para a retorta. A Figura 15 ilustra o desenho do pré-aquecedor;

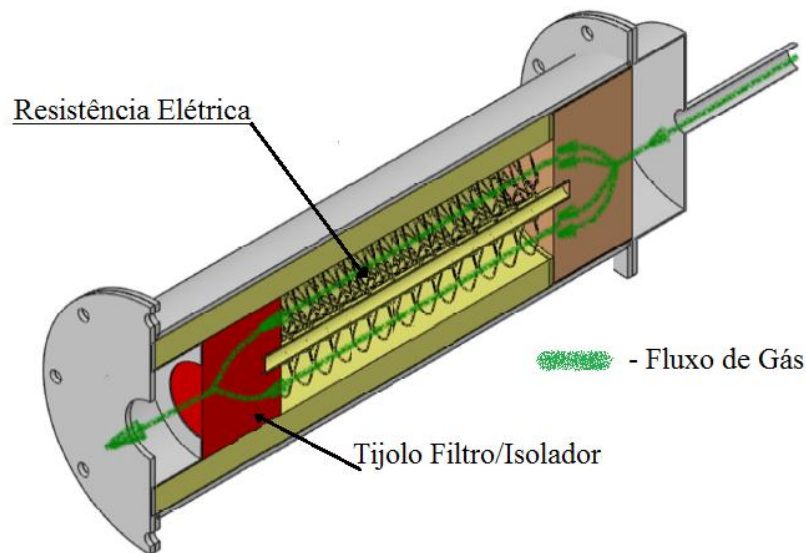


Figura 15: Pré-aquecedor de gases

Fonte: (FORTELAB, 2011)

- Alimentador de material: esta ferramenta realiza a coleta de material adicionado ao equipamento para ser processado. É composto por uma hélice acoplada a um motor CC que realiza a deposição do material conforme a taxa escolhida pelo usuário. Tal variação da velocidade do motor irá influir diretamente na quantidade de minério que será adicionada no processo. Por este motivo a velocidade do motor é controlada pelo CLP por meio de um variador de velocidade PWM acionado pelo CLP via saída analógica e há ainda o controle do peso do material adicionado, que é feito por célula de carga sustentando a estrutura do alimentador, como ilustrado na Figura 16;

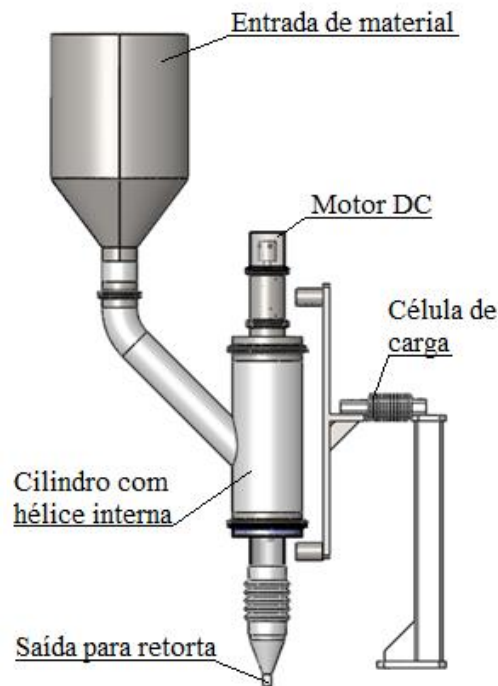


Figura 16: Alimentador de material

Fonte: (FORTELAB, 2011)

- Retorta: nesta parte do equipamento é realizada sua principal função, a fluidização. Para a correta ocorrência deste processo a retorta apresenta uma entrada de gases na parte inferior, como ilustrado na Figura 17, onde este passa por uma peça repleta de furos que realiza a distribuição uniforme do gás para continuidade do processo. Uniformemente distribuído, o gás segue a parte superior onde é depositado o minério juntamente com uma quantidade de gás por meio de uma tubulação vinda do alimentador. Após a ocorrência da fluidização, o produto deste processo segue por uma tubulação e é levado até uma balança, cujo esquema será mostrado no item seguinte. Na extremidade superior há duas tubulações, sendo uma delas para encaminhar o gás contendo material para filtragem e outra para inserção de ar no caso de entupimento do material e interrupção da alimentação. As partes em verde na Figura 17 ilustram os tijolos de sílica-aluminosa que realizam o isolamento térmico e é também o local onde são instaladas as resistências que aquecem a tubulação central;

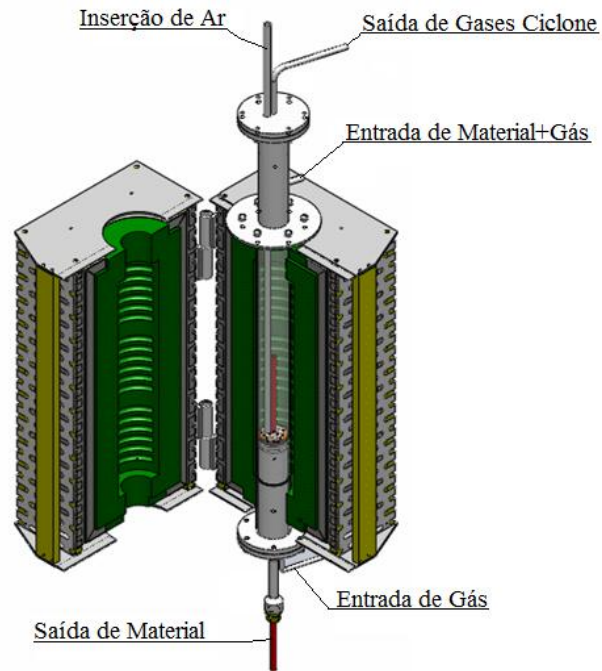


Figura 17: Retorta

Fonte: (FORTELAB, 2011)

- **Balança Principal:** tem como função a coleta de material oriundo da saída da retorta. Tal material, produto de interesse no processo, é coletado em um recipiente localizado em uma câmara devidamente isolada. O recipiente é posicionado sobre uma plataforma acoplada a uma célula de carga de tal modo que seja possível a medição do peso do material coletado. Nesta câmara existe um visor frontal para que o operador possa inspecionar a coleta do conteúdo e iluminação interna de auxílio. A Figura 18 ilustra a balança principal;

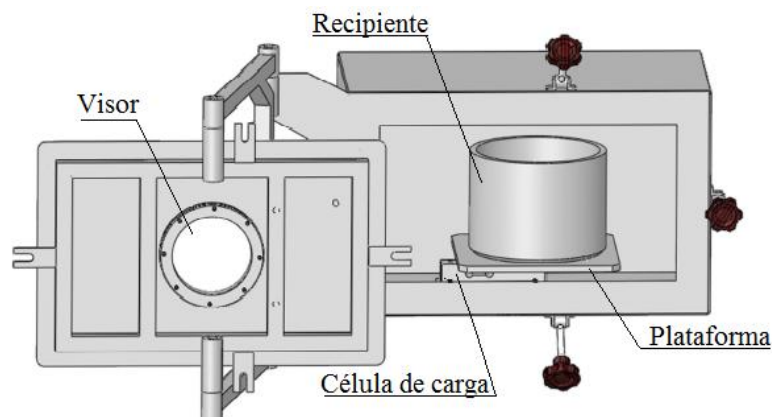


Figura 18: Balança principal

Fonte: (FORTELAB, 2011)

- **Conjunto Ciclone:** esta parte do equipamento realiza a coleta dos gases e materiais residuais do processo. Nesta etapa do processo, os gases ainda carregam certa quantidade de material que, ou não foi processada ou é resíduo de processo, e existe a necessidade de limpeza destes gases antes de realizar o descarte. Desta forma, os ciclones são ferramentas utilizadas para separar partículas mais pesadas que o fluido em que se encontram, ou seja, realizam a limpeza final do gás. As partículas carregadas e selecionadas pelo ciclone são depositadas em um recipiente localizado dentro de uma câmara, como na balança principal, onde são pesadas por uma célula de carga para controle de resíduos do processo. A Figura 19 demonstra o conjunto ciclone.

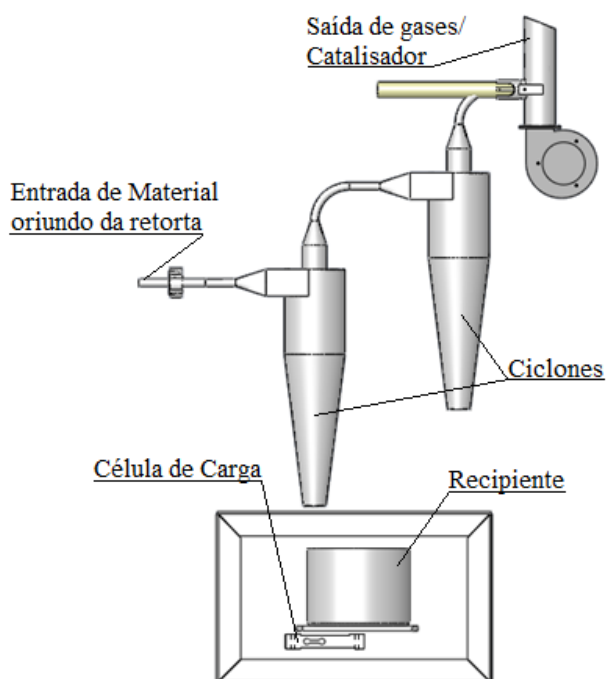


Figura 19: Conjunto ciclone

Fonte: (FORTELAB, 2011)

Apresentadas as partes mecânicas, funções e sua localização espacial, a seguir será explicada a operação do equipamento. O forno opera de duas maneiras distintas, são elas o modo manual e o modo automático, sendo aquele explicado primeiramente.

Inicialmente o equipamento é ligado por uma chave geral que libera energia para comando e potência. Neste momento o CLP e IHM são iniciados, a IHM inicia leitura das variáveis do CLP e informa ao operador o estado inicial. O operador faz a escolha dos parâmetros de temperatura para que o forno possa ser aquecido à temperatura ideal de operação. Este processo deve levar cerca de 90 minutos, pois caso seja despejada toda a potência há risco de queima das resistências.

Quando a temperatura de operação for atingida - entre 500°C e 600°C - o operador escolhe uma velocidade do motor de alimentação e logo em seguida as quantidades de cada tipo de gás que são

adicionadas na fluidização. A temperatura de operação pode ser determinada conferindo-se as temperaturas informadas pela IHM na tela Controle Geral. Neste momento o forno está apto a iniciar sua operação e o operador poderá dar o comando pela tela Alimentador da IHM para iniciar a alimentação de material. As telas citadas são ilustradas no item resultados.

Juntamente com a operação do equipamento, o operador pode supervisionar as quantidades de material saídas do processo, tanto a olho nu (visor presente nas balanças) quanto pela leitura das balanças informadas pela IHM e, caso encontre necessidade, alterar os parâmetros de temperatura e vazão de gás. Há telas para que o operador possa acompanhar graficamente a temperatura do forno nos diversos setores e em diversas escalas de tempo. Vale salientar que estas alterações são protegidas por níveis de segurança atribuídos tanto à IHM quanto ao CLP, ação que inibe interferência de usuários não autorizados.

O forno foi projetado para realizar o processo tanto em modo contínuo como em batelada, ou seja, é processando certa quantidade de material por vez, em lotes. Assim, após a produção as amostras são testadas em laboratório e suas qualidades analisadas. Desta forma tornou-se possível a separação clara de cada porção de material que é processado e a realização de um controle diferente para cada quantidade e qualidade, o que possibilita uma melhora nos resultados obtidos e, conseqüentemente, um aprendizado mais fácil sobre a relação dos parâmetros do forno e do material.

Os modos manual e automático diferem nas finalidades de uso. Enquanto o modo manual é utilizado para testes em batelada e com acompanhamento de operadores, o modo automático é utilizado para modo de produção contínuo sem a interferência externa.

No segundo método em questão o operador deverá utilizar o Elipse SCADA. No supervisório há uma tela nomeada Processo onde o usuário deve escolher as temperaturas e tempos de processo e salvar uma receita. Neste modo o forno irá controlar, sem ação do usuário, os parâmetros de vazão, velocidade de alimentação e saída de potência para os controladores.

Vale ressaltar que apesar da sobreposição de funções do supervisório e da IHM, a utilização conjunta destes foi exigência do cliente.

As telas supracitadas são ilustradas no item Resultados.

3.2 Materiais de automação

Antes de iniciar o projeto do equipamento realizou-se um levantamento de todas as características do processo e sua respectiva operação para ser possível realizar a correta escolha dos materiais aplicados. A seguir são enumerados os pré-requisitos de projeto:

- Aquecimento de 1°C a cada dez segundos;
- Precisão de 0,5% no controle da temperatura;

- Operação e supervisão na planta;
- Operação e supervisão remota;
- Controle de temperatura das três zonas da retorta e do pré-aquecimento dos gases;
- Elaboração de banco de dados de cada batelada.

No equipamento construído três itens principais poderiam se tornar o gargalo da produção ou representar um insucesso, a saber, o controle preciso da temperatura, controle do fluxo dos gases e o armazenamento dos dados gerados durante cada operação.

Assim como em uma equação química, o forno teria que realizar a interação entre as moléculas dos minérios adicionados e gerar resultado desejado. Neste contexto, o controle preciso das variáveis introduzidas no processo, assim como o ambiente em que o mesmo ocorre constituía ponto vital para o correto funcionamento do equipamento.

Levantadas as características do processo e as necessidades do controle foi consultado o fornecedor de produtos da empresa Allen-Badley, fabricante de equipamentos para automação industrial determinada pelo cliente, no intuito de encontrar os componentes que atendessem os requisitos de projeto com maior fidelidade e melhor relação custo-benefício.

3.2.1 Controlador Lógico Programável

O controlador utilizado é o Micrologix 1400, da Allen Bradley. Este CLP (veja Figura 20) tem capacidade de adição de até sete módulos adicionais de I/O, totalizando 256 saídas discretas, o que provê flexibilidade para possíveis alterações no decorrer do projeto, assim como alta confiabilidade. A este CLP foram adicionados seis cartões de expansão da seguinte maneira:

- 3 módulos com 4 canais de saída de tensão 0-10V, aplicados em controle do fluxo de gases, controle dos módulos de potência de aquecimento e controle do driver de velocidade do motor CC;
- 1 módulo com 4 entradas de tensão para células de carga utilizadas para pesar a matéria prima e a saída do forno (somente 3 foram utilizadas);
- 2 módulos com 4 entradas de termopar cada;

As saídas analógicas foram utilizadas, como descrito acima, em comunicação 0-10V com os atuadores.

Os módulos que recebem sinal dos termopares são simples de usar, pois sua configuração é toda feita via *software*, no qual existe um endereço de memória que determina a configuração em que deverá operar.



Figura 20: Micrologix 1400 e cartões de expansão para termopar

Fonte: (ALLEN BRADLEY, 2012)

O *software* de programa deste controlador é o RSLogix 500, da Rockwell Automation, desenvolvedores dos *softwares* da fabricante Allen-Bradley. Este *software* é completo e detém recursos que simplificam a programação como, por exemplo, possibilidade de subdividir o *Ladder* em pastas simplificando a organização do programa, memórias internas são facilmente localizadas, facilidade de testes simulando as saídas e entradas, praticidade na configuração de blocos funcionais como o PID, entre outras. A Figura 21 ilustra a interface do RSLogix 500.

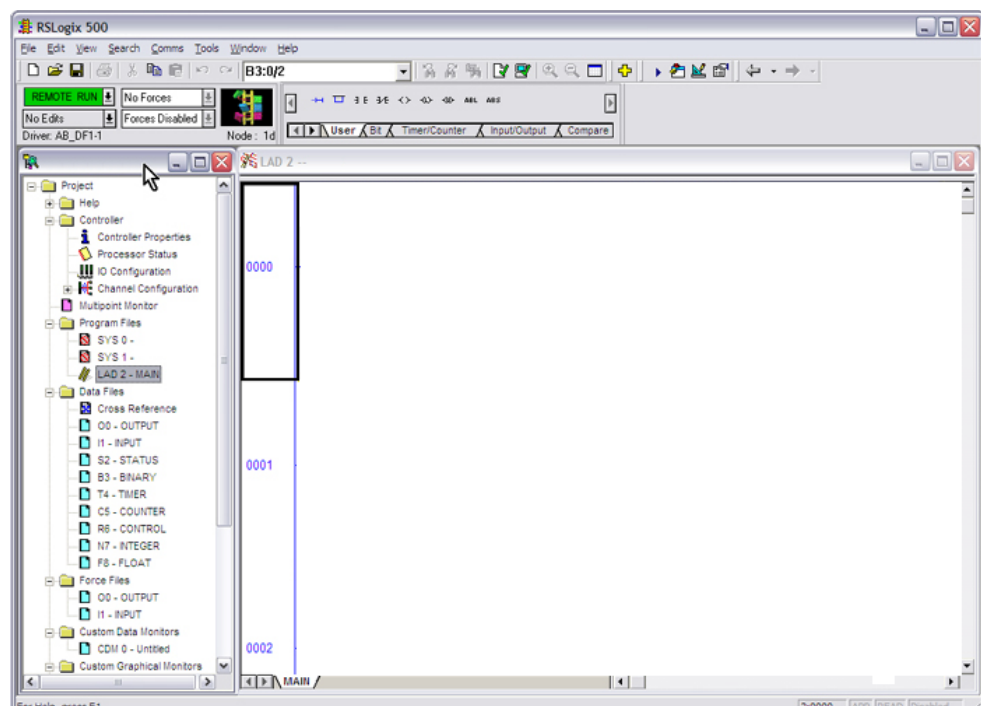


Figura 21: Interface RSLogix 500

3.2.2 Interface Homem Máquina

A IHM escolhida para o projeto (veja Figura 22) é a Panel View Component C1000, também da Allen Bradley. Esta é dotada de tela de 10.4 polegadas TFT em cores com resolução de 640x480 e sensível ao toque. Este equipamento é dotado de comunicação serial RS-232, Modbus e também *ethernet*.

O uso deste último protocolo facilita a operação devido à quantidade de dados que são coletados e gerados simultaneamente, além de facilitar a edição, pois esta pode ser feita em qualquer computador já que o *software* opera internamente no produto, possibilitando também a edição em tempo real. Este recurso ajuda no momento de escolhas de *layout* juntamente com o cliente, pois podem ser demonstradas as opções disponíveis.

Através deste equipamento o usuário tem acesso ao controle do forno integralmente, ou seja, controle de abertura e fechamento de válvulas, acesso aos valores de peso de material, alteração do fluxo de gás, controle da velocidade da alimentação, alteração de temperatura de cada zona do forno individualmente e uma tela voltada exclusivamente para a supervisão do processo, nesta última o usuário terá acesso a todas as variáveis controladas à exceção da taxa de alimentação. Os direitos de acesso às telas citadas são reservados a determinados usuários por meio de *login*. Àqueles autorizados poderiam ter acesso total a alteração de parâmetros e, apenas um deles, acesso as configurações internas da IHM, recurso que pode facilitar a manutenção via distância.

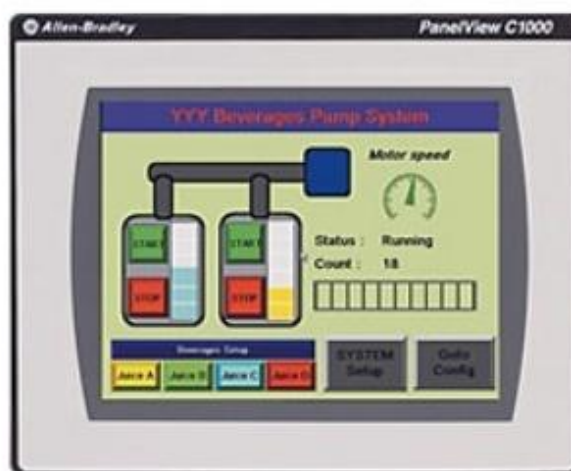


Figura 22: Panel View Component C1000

Fonte: (ROCKWELL AUTOMATION, 2012)

O *software* desta ferramenta apresenta interface simplificada para auxiliar a edição. Podem ser escolhidos todos os elementos visuais, assim como criar uma lista de alarme, endereçar todas as variáveis criadas no CLP, estabelecer limites de variação para os parâmetros, criar receitas ou então gráficos de tendência. A interface deste editor é ilustrada na Figura 23.

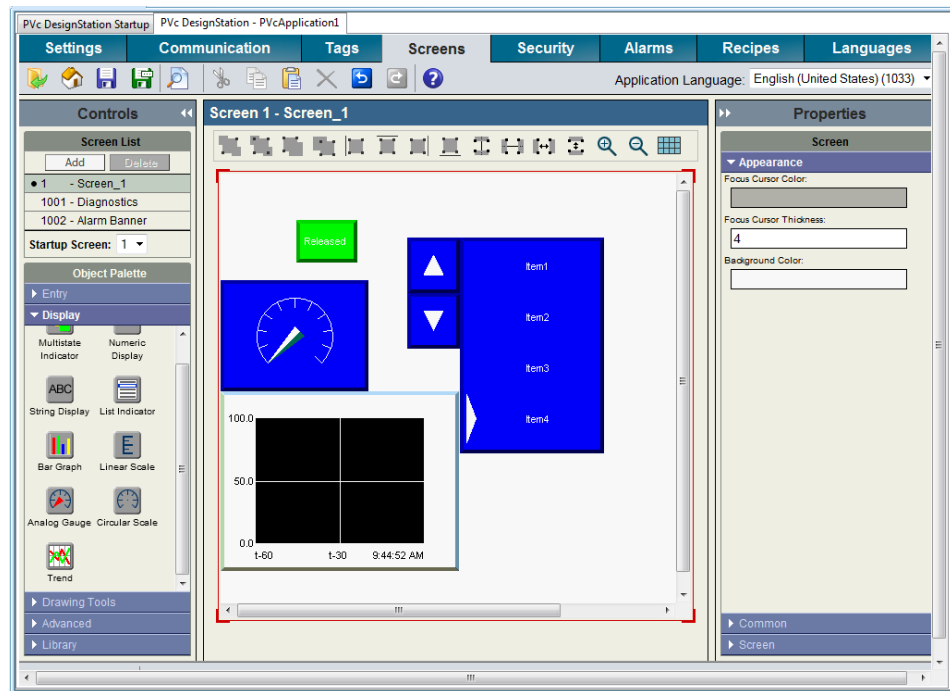


Figura 23: PanelView Design

3.2.3 Supervisório

Para a supervisão remota do equipamento fora escolhido o *software* supervisório Elipse MMI Runtime 75 de 32 bits, compatível com o computador exclusivo para supervisão que acompanha o equipamento. Os seguintes recursos levaram a escolha deste *software* de produção nacional:

- Recurso de Aplicação Remota, onde o usuário poderá ler e escrever dentro dos parâmetros oriundos de um servidor (CLP);
- Criação de histórico simplificada, cuja ativação pode ser dada por meio de intervalo de tempo, por batelada como no caso aplicado ou por evento ocorrido como, por exemplo, a ativação de uma saída digital ou contagem;

- Possibilidade de criação de alarmes. Recurso útil para alertar o operador em caso de operações indevidas, emergência, etc;
- Banco de dados, permitindo interação entre diferentes bases de dados;
- Receitas: este recurso simplifica a repetição de operações. No caso aplicado este recurso tornou possível, além do armazenamento dos dados de uma batelada, o armazenamento de todos os parâmetros que estiveram envolvidos no processamento desta e assim, a criação de uma receita baseada nas qualidades especificadas da batelada.

A edição realizada neste *software* é simplificada por meio de um recurso nomeado *Organizer*. Neste o desenvolvedor tem a sua disposição todos os elementos constituintes do projeto dispostos em uma árvore hierárquica que ajuda na organização. A Figura 24 ilustra o *Organizer*.

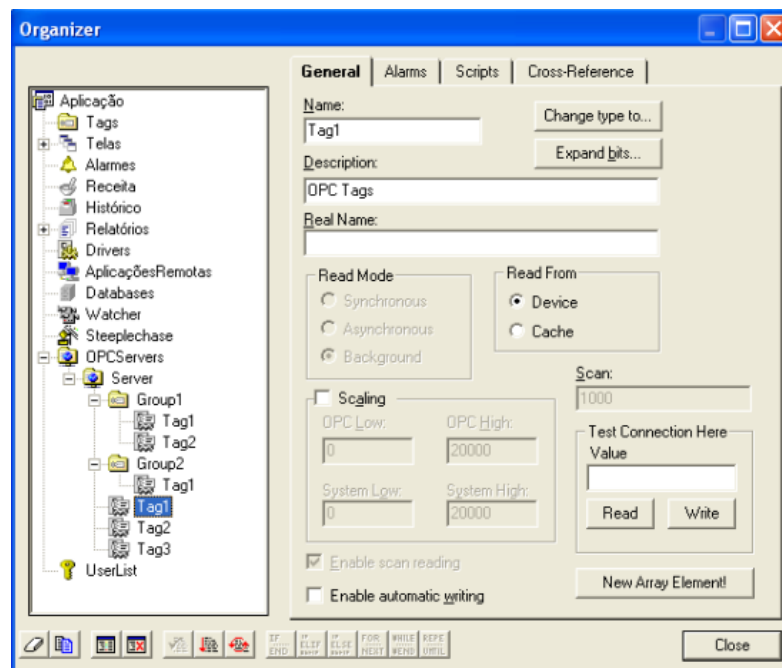


Figura 24: Organizer

Fonte: (ELIPSE KNOWLEDGE BASE, 2012)

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da realização, execução e testes do projeto de automação. Inicialmente, a Figura 25 ilustra o equipamento finalizado e pronto para ser enviado ao cliente.



Figura 25: Forno finalizado

(FORTELAB, 2012)

O projeto do equipamento era totalmente novo tanto para a empresa fabricante quanto para o próprio cliente, de modo que foi necessária a construção inicial das duas partes principais do equipamento, a retorta e o alimentador, para definição das etapas seguintes. Após construídos iniciou-se a elaboração das partes de potência e controle para então realizar os primeiros testes a fim de definir os próximos passos de projeto. Devido ao fato de ser uma novidade no mercado, não haviam normas a serem seguidas senão aquelas utilizadas em outros fornos pela Fortelab ou então a experiência dos próprios químicos e engenheiros da Vale do Rio Doce.

Como o material utilizado se apresentava com diferentes características em cada lote, e isso já era esperado, foram necessários diversos testes para definir os parâmetros de controle que tornam o processo válido. Encontrados estes pontos, o supervisor gera uma receita que é analisada pelo cliente em laboratório. Depois de analisados, os produtos do processo, o cliente poderia informar quais os

pontos que poderiam ser alterados como, por exemplo, constância na temperatura. Este ponto foi assunto de diversas horas de trabalho dentro do projeto, pois o acerto dos parâmetros do controlador PID não se mostrou tarefa fácil para a precisão requerida do projeto e das reações físico-químicas.

O fluxograma ilustrado na Figura 26 a lógica de operação e funcionamento do sistema.

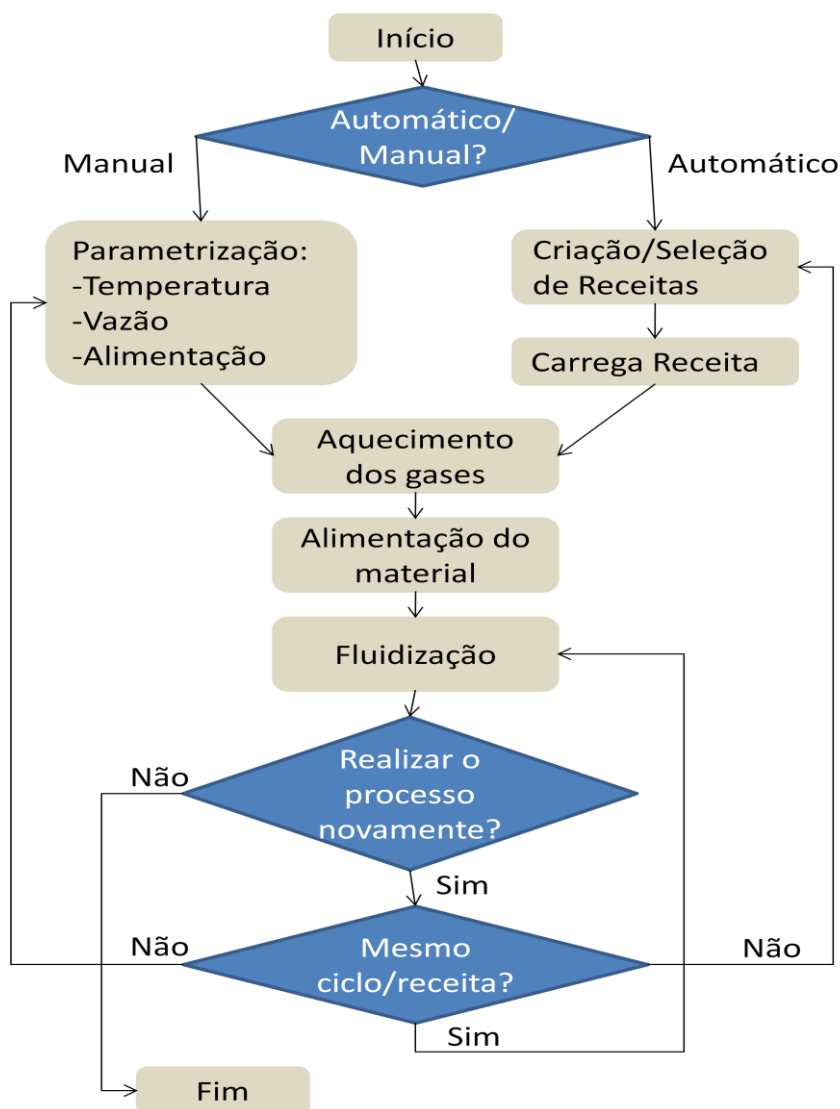


Figura 26: Fluxograma de funcionamento

4.1 Variáveis Controladas

As variáveis utilizadas nas entradas e saídas e àquelas supervisionadas são ilustradas nas tabelas 2 e 3, respectivamente. Nestas são descritos o nome da variável, sua descrição de função, especificação de tipo de valor que representa assim como o acesso que nela é feito.

Tabela 2: Variáveis de Entradas e Saídas

Tag	Descrição	Tipo de Valor	Acesso
I:0/0	Chave geral	Booleana	Leitura
I:0/1	Manual/Auto	Booleana	Leitura
I:1.0-2	Controle Liga/Desliga Zona 0-2	Booleana	Leitura
O:3.0-3	Controle Solenóide Gás 1-4	Real	Escrita
O:4.0-1	Controle Solenóide Gás 5-6	Real	Escrita
O:2.0-2	Saída triac zona 0-2	Real	Escrita
O:4.3	Saída do motor	Real	Escrita

Tabela 3: Variáveis supervisionadas

Tag	Descrição	Tipo de Valor	Acesso
B3: 0/0-5	Acionamento do aquecimento das três zonas e pré-aquecimentos	Booleana	Leitura/Escrita
B3: 0/6-10	Acionamento dos gases	Booleana	Leitura/Escrita
F8:0/2/4	Saída de potência Zona 0-2 (0-100%)	Real	Leitura/Escrita
F8:1/3/5	Temperatura Zona 0-2 (C°)	Real	Leitura/Escrita
F8:6	Saída de potência pré aquecimento	Real	Leitura/Escrita
F8:7	Temperatura pré aquecimento	Real	Leitura/Escrita
F8:9	Rotação em RPM alimentador	Real	Leitura/Escrita
F8:18	Peso do material na saída A	Real	Leitura/Escrita
F8:20	Peso do material na saída B	Real	Leitura/Escrita

4.2 Medição

A pequena variação de tensão gerada pela célula de carga necessita ser amplificada para uma medição correta. O conversor utilizado foi o modelo LC4200 da Incon, com sensibilidade para diversas faixas de tensão e saídas em tensão ou corrente. Este equipamento ainda permite a calibração e ajuste de zero da célula de carga, embora o CLP também realizasse a tarefa de tarar a balança antes de iniciar produção.

A célula de carga apresentou oscilações grandes devido às vibrações mecânicas contidas na máquina. Estas vibrações eram oriundas do motor do alimentador. Como haviam conversores de célula que geram um ganho de sinal, as pequenas oscilações mecânicas se mostravam bem maiores do que eram em realidade. O problema foi resolvido com soluções simples como a aplicação de um bloco que realiza a média de determinado número de valores e amortecimento mecânico do equipamento, o que resultou em estabilidade dos valores das balanças e do controlador do alimentador.

Os termopares foram corretamente escolhidos, pois funcionaram corretamente junto ao cartão de conversão de sinal do CLP. A programação da configuração via *software* facilitou o processo de acerto do PID. Depois de diversos ajustes conseguiu-se uma precisão no controle da temperatura de cerca de 0,4°C a temperaturas entre 500°C e 600°C.

4.3 Controle

Os controladores de fluxo, adquiridos da fabricante ALICAT, apresentaram desempenho excepcional, não apresentando problemas no decorrer do desenvolvimento. A comunicação analógica com eles estabelecida foi a de 0-10V, tanto para controle quanto para leitura. Com este instrumento controlador foi possível obter alta precisão na medição de fluxo, uma vez que trabalham com erro na faixa de 0,35%.

Os módulos de potência foram adquiridos em empresa local especializada na construção destes, chamada Flyever. Estes foram controlados via CLP por saídas analógicas em comunicação 0-10V. o controle de potência preciso permitiu a realização da rampa requisitada inicialmente e também da manutenção da temperatura de regime.

Outra saída analógica foi utilizada para o controle da velocidade do motor CC de alimentação de material. Como explicado na revisão bibliográfica, estes motores requerem um *driver* para controle de sua velocidade e posição. A fabricante T&S Equipamentos Eletrônicos fornece *driver* dotado de comunicação analógica em 0-5V. Desta forma conseguiu-se disponibilizar uma faixa de controle de velocidade que atendessem a demanda.

4.4 Supervisão

A Interface Homem Máquina apresentou, inicialmente, algumas falhas e lentidão típica de sistemas sobrecarregados. No início do projeto foi requisitado a elaboração de mais de 25 telas de gráficos para a supervisão das variáveis. Estas telas tinham seus valores atualizados mesmo não estando abertas, ação que gerou lentidão na operação devido o enorme número de informação recebida por esta ferramenta. A respeito das falhas, foram corrigidas principalmente com a reedição dos limites de entrada/leitura de dados da memória do CLP. Os pontos lidos saíam do limite padrão ou não estavam de acordo com àqueles instituídos dentro do CLP. Após esta correção a operação ocorreu sem quaisquer falhas. As Figuras 27, 28, 29 e 30 ilustram, respectivamente, a tela de controle de temperatura, controle geral, controle balança/alimentador e tela de gráfico de temperatura.

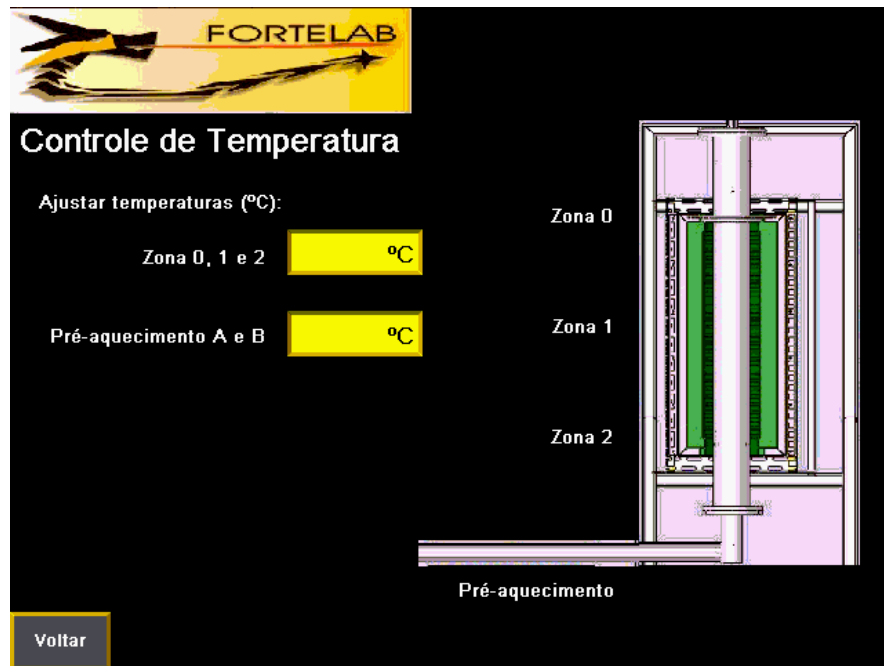


Figura 27: Tela Controle de Temperatura

Na tela Controle de Temperatura o operador escolhe os valores desejados de aquecimento de cada zona do forno.

Na tela Controle Geral o operador tem a sua disposição o valor das principais variáveis assim como os controles Liga/Desliga das válvulas de gás e do aquecimento das resistências.

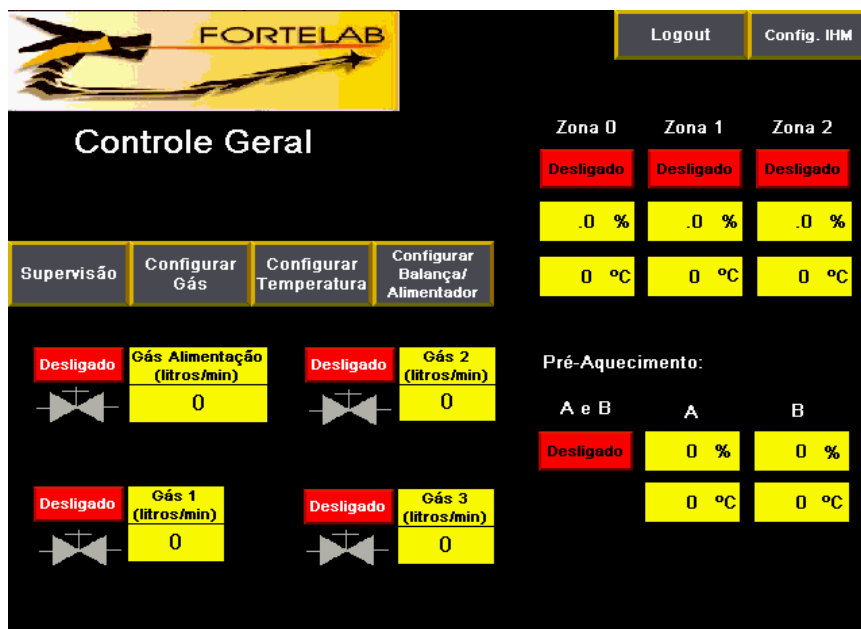


Figura 28: Tela Controle Geral

Na tela configurar Balança/Alimentador o operador pode zerar os valores atuais da balança (tarar), escolher o fluxo do alimentador ou então a velocidade do motor e também acionar o início da alimentação.



Figura 29: Tela de configuração da balança e alimentador

Na tela de gráficos de temperatura o operador pode acompanhar a tendência da temperatura e um breve histórico em diferentes escalas dos valores lidos anteriormente.



Figura 30: Tela de gráfico de temperatura

Uma ilustração da tela principal de controle do supervisor está na Figura 31. Nesta tela o usuário pode supervisionar todas as saídas de gases, os pesos medidos pelas balanças, as temperaturas

em cada setor do forno e ainda a saída de potência, em porcentagem, para as resistências. As variáveis estão dispostas de tal forma que o usuário possa entender a origem das medidas, ou seja, saber em que ponto está sendo medida tal temperatura indicada ou qualquer outra variável.

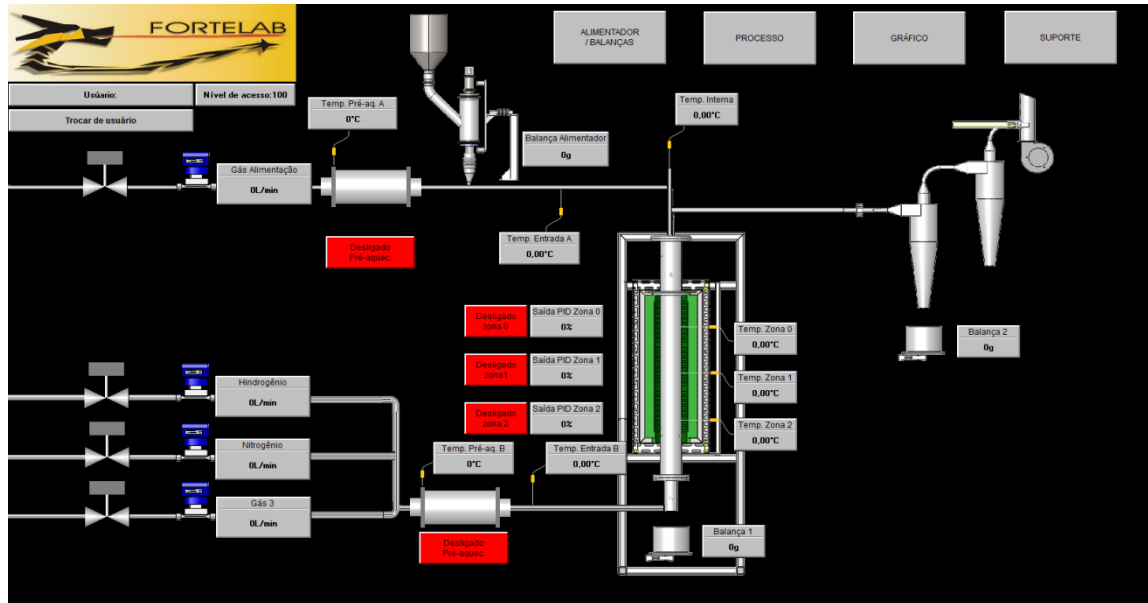


Figura 31: Tela principal do supervisório

Na tela Processo (Figura 32), o supervisor edita os parâmetros das receitas. Estas são armazenadas dentro do supervisório para possível repetição de uso.

FORTELAB PROCESSO					
SELEÇÃO		EDIÇÃO		INICIAR PROCESSO	
RECEITA					
Tempo no patamar 1	Temperatura pré-aque. pat 1	Gás 1 - Patamar 1	Tempo no patamar 2	Temperatura pré-aque. pat 2	Gás 1 - Patamar 2
0	0	0	0	0	0
	Temperatura Forno pat 1	Gás 2 - Patamar 1		Temperatura Forno pat 2	Gás 2 - Patamar 2
	0	0		0	0
		Gás 3 - Patamar 1			Gás 3 - Patamar 2
		0			0

Figura 32: Tela de edição de receitas

4.5 Rede de comunicação e ligação elétrica

O CLP que controla o equipamento se comunica simultaneamente com o Elipse SCADA e com a IHM. A comunicação entre a IHM e o CLP é feita por Ethernet enquanto entre o CLP e o supervisor é realizada no protocolo RS-232. A Figura 33 ilustra a configuração em que se encontram os equipamentos. O esquema elétrico referente a alimentação dos componentes é ilustrado anexo 1 e 2.

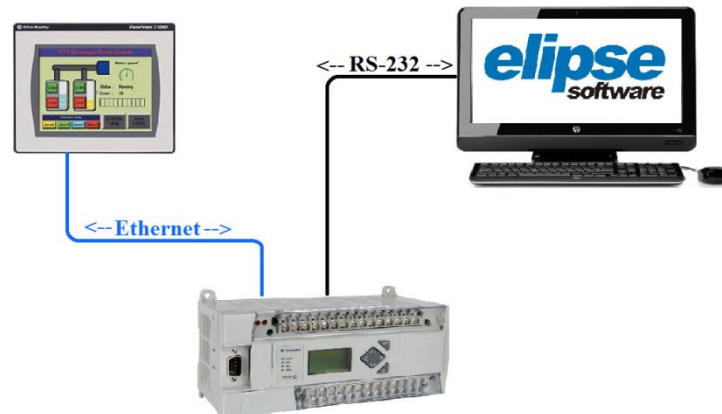


Figura 33: Comunicação de supervisão

O painel elétrico foi montado segundo as normas NR-10. Foram feitas algumas alterações durante o projeto, como a adição de um controlador de potência para outro aquecimento e um transformador 220V/22V para alimentação do variador de velocidade PWM, mas ainda assim o padrão foi mantido. A Figura 34 ilustra a montagem final desta parte do equipamento. Os esquemas elétricos são ilustrados nos anexos 1 e 2.



Figura 34: Painel elétrico

5 CONCLUSÃO

O projeto possibilitou a aplicação de conceitos aprendidos durante o curso. A disciplina de Automação foi de fundamental importância para o entendimento do problema e a correta elaboração das soluções. Também, os conceitos de rede de comunicação auxiliaram no entendimento e elaboração da integração dos componentes do equipamento.

O projeto teve todos seus requisitos iniciais cumpridos, ou seja, a completa integração de todas as partes constituintes do forno, o que facilitou a operação do ponto de vista do usuário. Este, por sua vez, tem à sua disposição as informações necessárias em poucas telas da IHM e do supervisório. Nestas mesmas telas o controle pode ser feito de forma simples e rápida, mostrando que as interfaces destas ferramentas atingiram os objetivos iniciais, além de serem amigáveis ao usuário.

A estabilidade na temperatura foi conseguida depois de diversos testes e ajustes do PID, assim atendeu os requisitos pré-estabelecidos pelo cliente.

O armazenamento em banco de dados mostrou-se uma importante ferramenta para suprir o P&D do cliente final. O número de amostras passíveis de serem analisadas supera as necessidades do cliente.

Depois de seis meses desde a entrega do equipamento (realizada em meados de maio de 2012) o cliente gerou um relatório de avaliação sobre as qualidades do forno. Foi analisado criteriosamente o atendimento ou não aos requisitos iniciais. Neste relatório constata-se que foram realizados 320 testes em modo contínuo sem nenhuma parada ou desestabilização. Após este período de testes o projeto recebeu dos engenheiros da Vale do Rio Doce, responsáveis pelo projeto interno, a avaliação de 92 pontos, dada em uma escala de 0 a 100, confirmando assim a conclusão bem sucedida do projeto.

Desta forma, podemos concluir que os objetivos iniciais do projeto foram atingidos com sucesso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALICAT. (2005) **Flow Principles**. Disponível em: <<http://www.alicat.com/technical-information/flow-principles/>>. Acesso em: 14 set. 2012.

ALLEN BRADLEY, (2012). Disponível em: <<http://ab.rockwellautomation.com/>>. Acesso em: 8 set 2012.

BAGAREL, (2012). **Termopar**. Disponível em: <http://loja.bagarel.com.br/produto-249-termopar_tipo_k_de_penetracao_mtk_15_minipa>. Acesso em: 10 out 2012.

BRANDÃO, D. **Apostila de aula da disciplina Automação**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010. Disponível em: <<http://www.sel.eesc.usp.br:8085/Disciplinas/>>. Acesso em: mar. 2010.

BRANDÃO, D. **Notas de Aula da Disciplina SEL432 – Redes de Automação Industrial**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010. Disponível em: <<http://www.sel.eesc.usp.br:8085/Disciplinas/>>. Acesso em: 10 set 2012.

DELTA. (2009) **Human Machine Interface**. Disponível em: <http://www.delta.com.tw/product/em/control/touch_hmi/control_touch_hmi_main.asp>. Acesso em: 30 ago. 2012.

ELIPSE KNOWLEDGE BASE, (2012). Disponível em: <<http://kb.elipse.com.br/pt-br/>>. Acesso em: 9 set 2012.

FLORIDA UNIVERSITY, (2012). **Right and Left hand Rules**. Disponível em: <<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/java/handrules/index.html>>. Acesso em: 25 out 2012.

GESUALDO, E. **Notas de aula da disciplina Transdutores**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

GREEN ENERGY, (2012). **Wind Turbine Permanent Magnet Control**. Disponível em: <<http://cleangreenenergyzone.com/wind-turbine-permanent-magnet-dc-motors/>>. Acesso em: 13 set 2012.

HOWARD, J. R. **Fluidized Bed Technology: Principles and Applications**. Nova Iorque: Adam Higler, 1989.

MOREIRA, R. F. P. M. **Operações Unitárias de Transferência de Quantidade de Movimento**. UFSC/EQA, 2004. Disponível em: <<http://www.enq.ufsc.br/disci/eqa5313/Fluidizacao.htm>>. Acesso em: 10 set. 2012.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2001.

ONIX METROLOGIA, (2012). **Células de Carga; Transdutores de Força**. Disponível em: <<http://www.onixmetrologia.com.br/servicos/subservico/14>>. Acesso em: 10 out 2012.

PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L. **Química na abordagem do cotidiano**. São Paulo: Editora Moderna, 2002.

RIBEIRO, M. A. **Automação Industrial**. 4ª ed. Salvador: Editora Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 2001.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. 1ª ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2005.

SILVA, M. E. **Curso de Automação Industrial**. Curso. 2007. 36f. Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, 2007.

SOUZA, L. T., **Figuras Forno Vale do Rio Doce** [Mensagem pessoal] Mensagem recebida por <zique.teles@gmail.com> em 10 dez 2012.

WIKIPEDIA, (2012). Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:P%C3%A1gina_principal>. Acesso em: 23 set 2012.

ANEXO 2: Esquema eléctrico CLP

