

PAULO HENRIQUE TOLEDO DE OLIVEIRA E SOUZA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM
SISTEMA INTELIGENTE DE CONTROLE
DE UMA PLANTA PILOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola
de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São
Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas
de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Dennis Brandão

São Carlos
2007

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio durante o todo curso, aos amigos com os quais estive durante a maior parte dos cinco anos de graduação e também gostaria de agradecer àqueles que participaram diretamente da elaboração do meu projeto de conclusão de curso:

Professor Doutor Dennis Brandão, idealizador do projeto

Técnico do Laboratório de Eletrônica Embarcada Jaime Marini Junior, auxiliou no entendimento e montagem do CPL

Técnico de Manutenção Rui Bertho, auxiliou na montagem do equipamento

Graduando Gustavo de Oliveira de Souza Santos, cooperador no projeto

Graduando Herivelto Cordeiro dos Santos, auxiliou na configuração da rede profibus

Graduando André Farah Sabe, responsável pela estrutura de Lexan

RESUMO

Este projeto consiste no desenvolvimento de um sistema de controle automático que tem sua base em um programa de CLP (Controlador Lógico Programável), que foi desenvolvido em lógica ladder (IEC 61131-3) com a função de atuar sobre uma planta deixando-a estável e segura.

Tal sistema de controle atua sobre uma caldeira de pequeno porte que antes era utilizada em uma máquina de café industrial visando um controle mais preciso e eficiente, no entanto como determina-se em questão de segurança, fora reelaborado o sistema de inter-travamento eletro-mecânico, em caso de falha do sistema elétrico, outro ponto bastante interessante do projeto.

Ainda em respeito a segurança dos usuários foi desenvolvida uma estrutura destinada a enclausurar a caldeira, visando mantê-la isolada durante os testes, garantindo assim que o escape indevido de vapor ou disparo de uma válvula de segurança, possa ferir alguém.

Garante-se também que durante a elaboração da lógica do CLP buscou-se um inter-travamento elétrico e espera-se que esse seja mais rápido na atuação e mais simples de ser modificado em caso de necessidade, em relação ao eletro-mecânico.

Palavras Chave: Sistemas de Automação – Proteção Operacional – Inter-travamento – Profibus – Lógica Ladder – Caldeira.

ABSTRACT

This project is the development of an automatic control system that has its base in a program of PLC (Programmable Logic Controller), which was developed in ladder logic (IEC 61131-3) with the function of acting on a plant, leaving it stable and secure.

This control system operates on a small boiler that before was used in an industrial coffee machine aiming very precise control and efficient, however determined in a concerned security, was rethought the system of electro inter-locking, in the eventual mechanical failure of the electrical system, it is another very interesting point of the project.

In respect to safety of users was developed a structure to isolate the boiler to maintain it alone during the tests, thus ensuring that the undue exhaust steam or firing of a safety valve, can injure someone.

Also ensures that during the drafting of the logic of CLP sought to guarantee of inter-locking electric and it is hoped that this is the fastest and with simple action to be modified in case of need, for the electro-mechanical.

Keywords: Automation Systems – Protection Operational – Inter-locking – Profibus – Logic Ladder – Boiler

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama elétrico do projeto	4
Figura 2 - Diagrama de rede do Projeto	6
Figura 3 - Lógica Ladder para pressão	7
Figura 4 - Lógica ladder de controle de nível	8
Figura 5 - Lógica ladder de controle da temperatura.....	9
Figura 6 - Ligações, indicador de nível e carcaça, nas duas situações de segurança.....	9
Figura 7 - Diagrama de fluxo da caldeira.	11
Figura 8 - Caldeira sem equipamentos acoplados.	11
Figura 9 - Caldeira enclausurada.....	12
Figura 10 - Sistema de Controle	18
Figura 11 - Sensor de Pressão Diferencial LD303	20
Figura 12 - Esquema interno do Sensor	21
Figura 13 - Transmissor de Pressão Absoluta	22
Figura 14 -Transmissor de Temperatura TT303.....	23
Figura 15 - Conexão com o termopar	23
Figura 16 - Termopar.	24
Figura 17 - Contator Weg.	24
Figura 18 - Pressostato.....	25
Figura 19 - Válvula a solenóide.....	25
Figura 20 - Válvula de segurança.	26
Figura 21 - CLP Master K 120S da LG.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das Caldeiras	14
--	----

SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
2 METODOLOGIA.....	3
2.1 Diagrama Elétrico.....	3
2.2 Diagrama da Rede.....	5
2.3 Lógica de Controle do CLP.....	6
2.3.1 Controle da pressão.....	6
2.3.2 Controle de Nível.....	7
2.3.3 Controle da temperatura.....	8
2.3.4 Inter-travamento.....	9
2.4 Procedimentos de Montagem.....	10
2.4.1 Montagem da Caldeira.....	10
3 EQUIPAMENTOS E SOFTWARE.....	13
3.1 Caldeiras.....	13
3.1.1 Classificação das Caldeiras Segundo suas Dimensões.....	14
3.1.2 Tipos de Caldeiras Elétricas de Vapor de Água.....	15
3.1.3 Aplicações dos Geradores Elétricos de Vapor de Água.....	16
3.2 INTRODUÇÃO AO SISTEMA DE CONTROLE.....	17
3.2.1 Histórico dos CLP's.....	17
3.2.2 Princípio de Funcionamento.....	17
3.2.3 Capacidade de um CLP.....	19
3.3 DESCRITIVO DE EQUIPAMENTOS.....	20
3.3.1 Sensor de pressão diferencial.....	20
3.3.2 Transmissor de pressão absoluto.....	22
3.3.3 Transmissor de Temperatura.....	22
3.3.4 Termopar.....	24
3.3.5 Contator.....	24
3.3.6 Indicadores de nível.....	24
3.3.7 Pressostato.....	25
3.3.8 Válvula de entrada de água e saída.....	25
3.3.9 Válvula de Segurança.....	25
3.3.10 Controlador Lógico Programável.....	26
4 CONCLUSÃO.....	27
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

O projeto realizado para a automatização da caldeira, antes utilizada em uma máquina de café expresso, teve várias etapas para sua implementação, pois a caldeira encontrava-se sem uso há alguns anos.

Sendo assim houve inicialmente a etapa estudo de caldeiras para um entendimento maior do processo de geração de vapor, grandezas de valores nominais, descritas no item 1.2, para se ter uma noção da segurança necessária na aplicação. Foi realizado também um estudo prévio dos controladores lógicos programáveis (CLP), para uma boa utilização das lógicas de controle.

Após estes estudos realizou-se a escolha dos equipamentos que seriam utilizados para aferição das grandezas físicas requeridas para o controle e que proporcionassem um segurança na operação dos testes na máquina, seguindo alguns critérios para suas escolhas.

Os critérios baseiam-se em utilizar os instrumentos e estrutura disponíveis no laboratório de automação industrial, como os equipamentos destinados intertravamentos eletromecânicos, que garantem o aumento do nível de segurança, tanto dos equipamentos quanto dos operadores. E ainda buscou-se escolher transmissores que fossem facilmente comunicáveis, a partir das redes existentes no laboratório.

Após estas escolhas fez-se então o diagrama esquemático do controle e o diagrama de rede utilizado no projeto, para uma boa visualização do projeto como um todo e dos pontos nos quais a lógica deveria atuar.

Durante todas estas etapas fez-se necessário a montagem da estrutura de blindagem e conexões da caldeira.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle automático a ser implantado em uma planta com alto risco de explosão. Tal planta onde o sistema atuará era uma caldeira de máquina de café expresso e as precauções quanto ao risco de explosão são justificadas pela pressão interna de trabalho do equipamento.

A automatização desta planta visa uma superação do sistema de controle eletro-mecânico, o qual atuava antes na planta e agora será remodelado e utilizado como um dos níveis de intertravamento do projeto.

Almeja-se ainda o desenvolvimento de um projeto em lógica Ladder que será transferido ao CLP (controlador lógico programável) e por fim coletará dados do sistema e atuará, com base nesse dados, sobre a planta, completando assim um controle eficaz, seguro e rápido, em relação ao antigo sistema.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a realização do projeto, explicando a confecção do diagrama elétrico do processo de controle da caldeira resistiva, no item 2.1, o diagrama de rede utilizado para a aquisição e envio de dados, que será explicado no item 2.2, o desenvolvimento da lógica de controle e inter-travamentos do projeto, explanados nos itens 2.3, além de descrever alguns procedimentos para a montagem da caldeira na bancada de testes e seu enclausuramento em um recipiente de proteção, no item 2.5.

2.1 Diagrama Elétrico

Nos processos de automação industrial para se obter uma boa visão do mesmo, como um todo, inicia-se o projeto com a elaboração de um diagrama elétrico. Este procedimento ajuda a identificar os dispositivos de campo requeridos, e também deixa claro quais os pontos que necessitam maior atenção para a segurança da operação. A partir do desenho também é possível determinar quantos aparelhos analógicos ou discretos terão no processo.

Para a confecção do diagrama foi necessário um estudo detalhado da norma internacional (ANSI/ISA-S5.1-1992) para que a nomenclatura utilizada mantenha o padrão de qualquer projeto em automação de escala industrial.

O resultado deste estudo é o diagrama mostrado na figura 1.

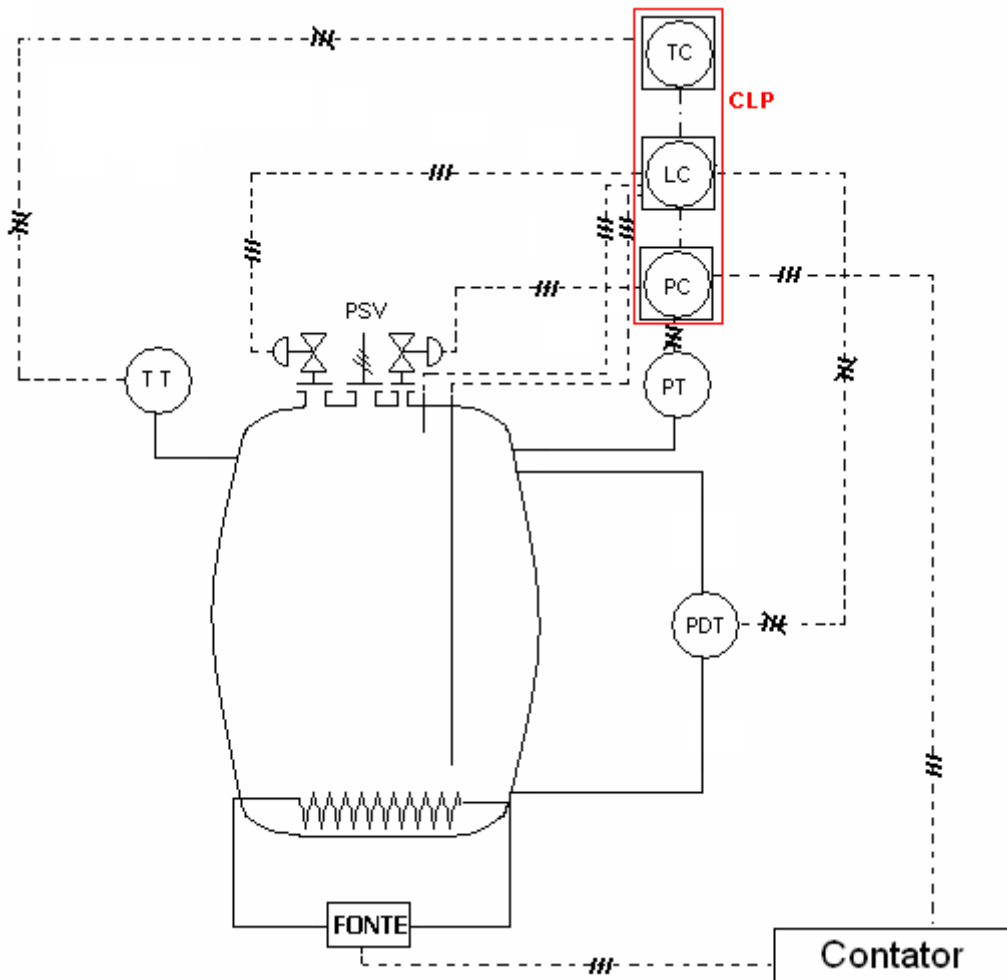


Figura 1 - Diagrama elétrico do projeto

A figura 1 mostra o diagrama elétrico com todos os equipamentos utilizados para o controle automático onde serão aplicados e ainda o tipo de conexão que estabelecem com os controladores e caldeira. Serão explicados abaixo os símbolos utilizados no diagrama, Sendo:

Os símbolos TT (transmissor de temperatura) e TC (controlador de temperatura). Com esse conjunto torna-se possível à monitoração e controle da temperatura da planta, pois o bloco de controle atua também sobre o contador como demonstrado com as linhas de conexão elétrica.

Os símbolos LC (controle de nível) e PDT (transmissor de pressão diferencial), que juntos com a válvula de entrada e as duas hastas de nível (máximo e mínimo), formam o conjunto que monitora e controla o nível de água dentro da caldeira, servindo também para o inter-travamento proposto na lógica ladder presente no item 2.3.1.

Por fim os símbolos PC (controlador de pressão) e PT (transmissor de pressão) que fazem a monitoração e controle sob a válvula de saída, como mostra o diagrama da figura 1, mantendo a caldeira dentro dos parâmetros estipulados, por questão de segurança para os usuários.

Para simplificar o entendimento do diagrama, apresenta-se então a definição vinda da norma (ANSI/ISA-S5.1-1992), que as linhas com três barras paralelas sobre a mesma significa que

é um cabo de energia elétrica e que as linhas com barras paralelas e uma cruzando-as significa cabo de sinal digital.

É ainda interessante focar o detalhe que a união dos blocos PC, LC e TC, constituem o CLP para este sistema, no qual se realiza toda a lógica de controle e acionamentos de abertura das válvulas, entrada e saída, assim como abertura e fechamento do contator de modo a manter o funcionamento da caldeira. dentro dos critérios estabelecidos no projeto, sendo descritos no item 2.3.

2.2 Diagrama da Rede

O diagrama de rede é uma ferramenta importante para o projeto de um controle automático, pois depois de definidas as quantidades de transmissores e sensores utilizados no projeto, pode-se então visualizar com clareza as redes de comunicações existentes, de acordo com os equipamentos escolhidos, também podendo realizar uma pré-análise do diagrama de rede, realizando assim possíveis trocas de transmissores para facilitar a comunicação dos dados. Esta facilidade pode ser notada neste projeto, pois foram utilizados apenas transmissores com o protocolo Profibus-PA.

A figura 2 representa os tipos de comunicação assim como os níveis hierárquicos da automação deste projeto, iniciando pelos transmissores e chegando ao CLP

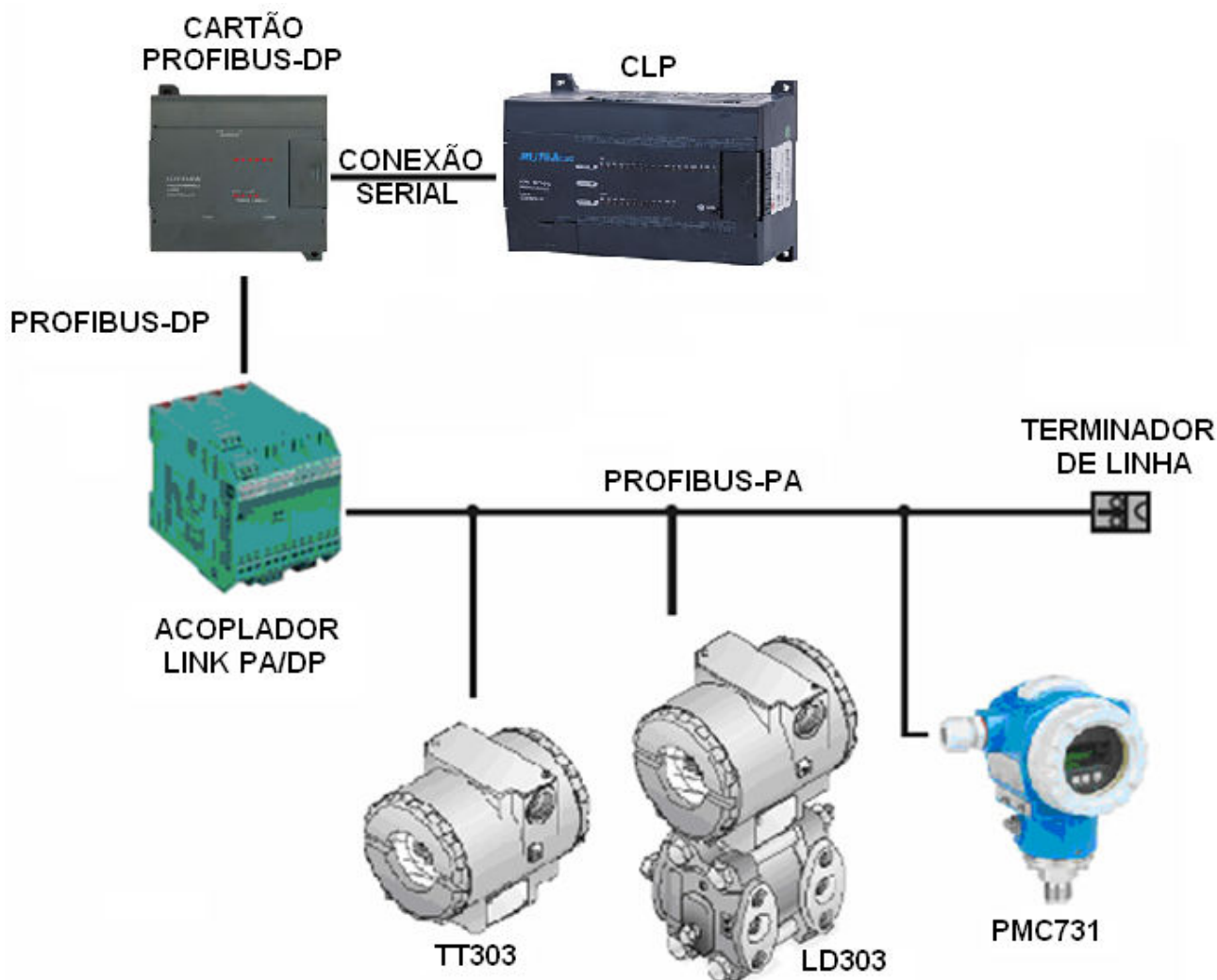


Figura 2 - Diagrama de rede do Projeto.

2.3 Lógica de Controle do CLP

Para o funcionamento do CLP é necessária a presença de um programa que define a lógica do controle usado no experimento. Esta lógica possui vários tipos de linguagens possíveis para sua programação. Uma das linguagens de programação de CLP's mais usadas é o diagrama de contatos, ou linguagem ladder.

Serão descritos abaixo os principais passos da lógica, com seus devidos comentários e objetivos:

2.3.1 Controle da pressão

Através de três comparadores faremos o controle da pressão da caldeira. O primeiro deles controla um nível baixo de pressão, portanto assim que o PMC 731 indicar através da memória D0001 um nível de pressão abaixo de 1 bar, essa linha da lógica torna-se energizada fazendo com que a função *rst P0041* seja acionada e assim a válvula de saída fecha, salientando que P0041 é uma saída física do CLP que atua na válvula de controle de vazão da caldeira. O segundo comparador é para um nível alto e quando a pressão estiver maior ou igual a 2 bar esta linha estará energizada acionando a função *set P0041* que abre a válvula de saída liberando vapor.

E o terceiro é um nível de emergência fazendo a resistência desarmar assim que a memória D0001 indicar um valor acima de 2.5 bar seguindo o mesmo padrão de funcionamento dos outros dois comparadores, no entanto com uma função voltada pra um inter-travamento em caso de falha no sistema de abertura da válvula de saída, como por exemplo um rompimento do cabo de controle ou um defeito na válvula a solenóide.

Ainda faz-se necessário a explanação sobre a M0051, que é uma memória interna do CLP que esta na ultima linha da figura 3 desligando a resistência. Essa memória ainda será utilizada em outros trechos do programa, como no item 2.3.2.

A figura 3 é o trecho de lógica em ladder desenvolvido a fim de exercer a função de controlador de pressão:

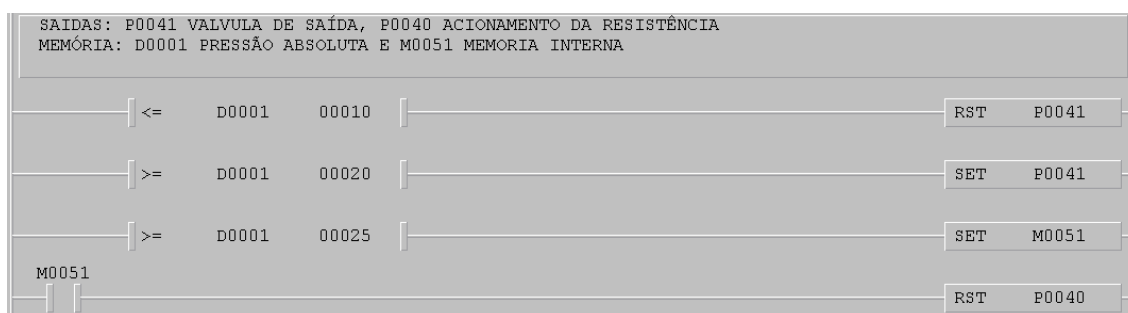


Figura 3 - Lógica Ladder para pressão

2.3.2 Controle de Nível

Utilizando o mesmo esquema criado para o controle de pressão, desenvolveu-se o controle de nível, no entanto com as devidas modificações como a memória, que agora é D0002, ou seja, a entrada do medidor de pressão diferencial, previamente trabalhada para indicar o nível correto da água no interior da caldeira. Assim tem-se novamente um conjunto de comparadores sendo que estes atuam diretamente na válvula de entrada da caldeira. O primeiro deles energiza a função *set P0042* ao detectar um nível de coluna de água inferior a 35 mm, abrindo a válvula de entrada, o segundo comparador inserido ao programa a fim de garantir que caso não exista água a

resistência não permaneça ligado o que a danificaria, portanto aciona a função *set M0051* quando o nível de água for inferior a 25mm.

A terceira linha desliga na válvula de entrada de água assim que o LD303 indicar um nível superior a 150mm, garantindo a estabilidade do sistema.

Ainda nessa parte foi adicionada a lógica a entrada de detecção de nível alto de água, inibindo a ação do primeiro comparador e assim deixando livre para que o controle possa desligar a entrada de água.

Tal trecho da lógica é mostrado na figura 4.

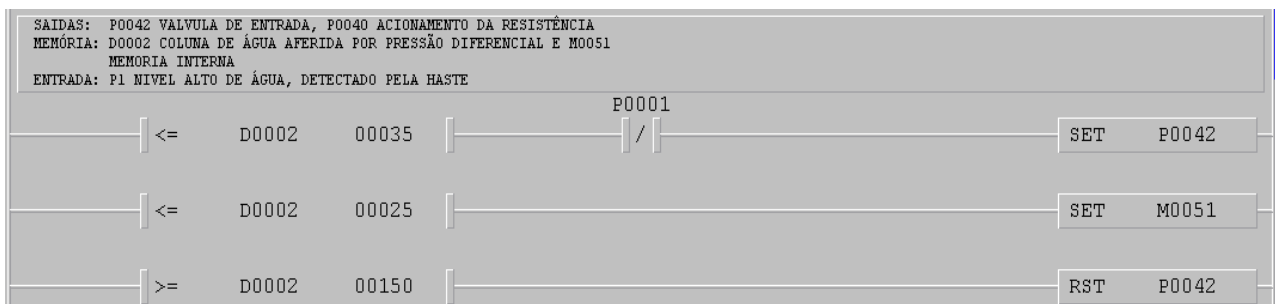


Figura 4 - Lógica ladder de controle de nível

2.3.3 Controle da temperatura

Com a utilização de uma entrada digital que indica a temperatura, vinda do TT303, e armazenada na memória D0003, utilizou-se novamente três comparadores para que fosse desenvolvido um sistema de acionamento da resistência *on/off*, que funciona da seguinte maneira. Enquanto o segundo comparador não identificar uma temperatura maior que 105 graus Celsius não energizará a linha em que foi colocado, e assim o primeiro comparador manterá a função *set P0040* e portanto a resistência ligada. Ao passo que o segundo comparador atuar o primeiro comparador será desabilitado pela memória M0050 e a terceira linha será habilitada pela memória M0052, ainda teremos a função *rst P0040* desligando a resistência. Esta somente será religada quando a temperatura atingir um valor inferior a 90 graus. Nesse momento a memória M0050 novamente irá liberar a primeira linha, fazendo com que a resistência seja novamente ligada. A repetição deste ciclo recebe o nome de controle *on/off* e o trecho em que foi desenvolvida a lógica ladder esta na figura 5.

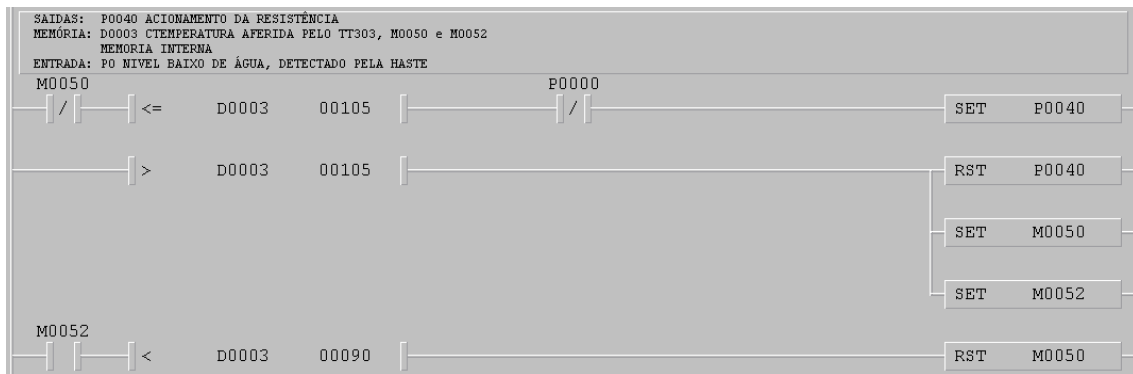


Figura 5 - Lógica ladder de controle da temperatura

2.3.4 Inter-travamento

- Digital

O inter-travamento digital, está contido no programa e foi demonstrado durante este sub-tem, em que discutiu-se a lógica ladder do controle da caldeira.

- Analógico

As entradas do CLP P0000 e P0001, travas de segurança para o programa, atuam na válvula de entrada e na resistência, através da lógica do CLP. Portanto formam inter-travamento nas linhas da lógica ladder, seu funcionamento e demonstrado na figura 6.

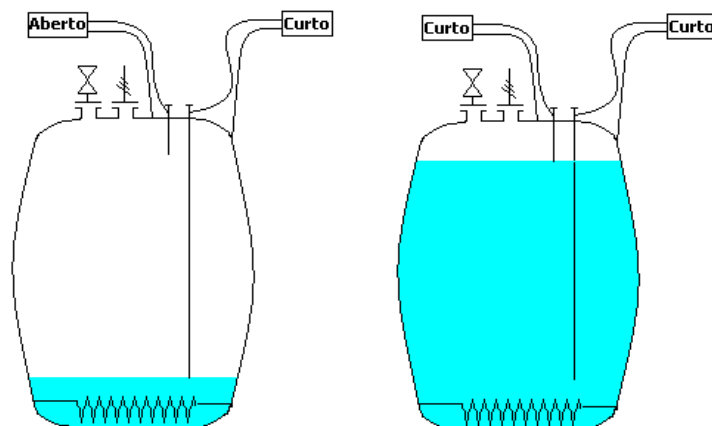


Figura 6 - Ligações, indicador de nível e carcaça, nas duas situações de segurança.

Conectadas as entradas do CLP e trabalhadas de forma adequada dentro da lógica, utiliza-se o sinal de contato fechado para a haste menor, indicando que a água chegou ao limite dentro da caldeira, e um sinal de contato aberto para um nível abaixo do estipulado pela haste maior.

2.4 Procedimentos de Montagem

Para iniciar as práticas laboratoriais houveram várias etapas, pois o equipamento não estava montado e não havia nenhum espaço físico reservado, e devidamente seguro para receber os testes. Com esta situação foi necessária à alocação do equipamento no laboratório de automação e juntamente com isso foi verificada a real necessidade de isolar o equipamento do contato humano, pois a caldeira em ocasiões de falha ou mesmo em pressões nominais oferece risco de queimaduras ou até explosões, e esta é uma preocupação que deve ser avaliada em qualquer circunstância tanto num laboratório quanto no “chão de fábrica”.

Partindo dessas como as premissas para o início do trabalho, os processos realizados são descritos nas subseções seguintes.

2.4.1 Montagem da Caldeira

Para a montagem, foi necessário obter um conhecimento do funcionamento de uma caldeira de pequeno porte, conhecendo o fluxo da água e do vapor no interior desta caldeira em particular.

Um ponto bastante intrigante do projeto é a entrada de água em um vaso com pressão sem que seja utilizado uma bomba de pressão. A solução encontrada para esta caldeira foi a utilização de duas válvulas anti-retorno que são instaladas antes da entrada de água no bulbo e outra entre a saída de água no bulbo e a entrada de água na caldeira. A função destas válvulas é que após a entrada de água no bulbo, o aquecimento gere uma pressão maior que a da água proveniente do sistema de abastecimento local, sendo assim válvula anti-retorno da entrada do bulbo se fecha, deixando a pressão interna do mesmo subir. Quando a pressão interna do bulbo for maior que a pressão interna da caldeira a válvula anti-retorno presente entre o bulbo e a caldeira permitirá a passagem de água e isto acontecerá até que a pressão da caldeira volte a ser maior que a pressão no bulbo.

Sendo assim foi determinado o fluxo da água conforme indicado na figura 7:

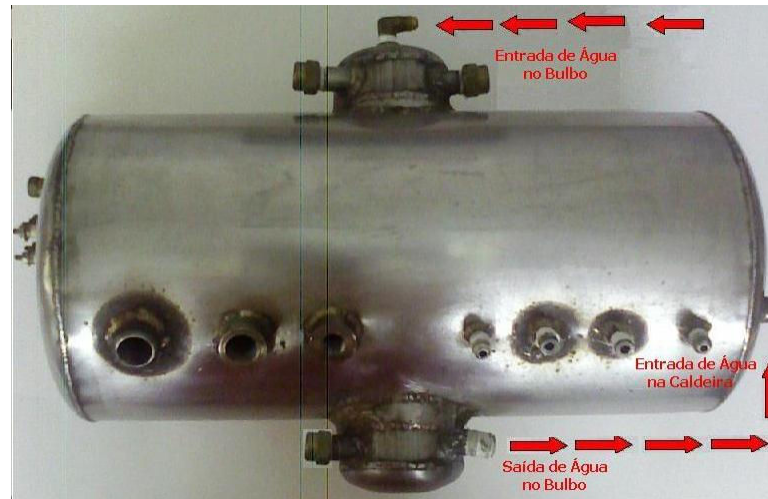


Figura 7 - Diagrama de fluxo da caldeira.

Para a realização dos experimentos, com maior facilidade e segurança, foi necessária a fixação desta caldeira numa base metálica, assim como a montagem de todo o isolamento da caldeira com um revestimento de Lexan, um polímero de alta resistência a choques mecânicos.

Na figura 8 segue a fotos da caldeira sem nenhum equipamento acoplado e na figura 9 o a caldeira já enclausurada:



Figura 8 - Caldeira sem equipamentos acoplados.



Figura 9 - Caldeira enclausurada

3 EQUIPAMENTOS E SOFTWARE

Este capítulo aborda a descrição dos equipamentos e softwares para o melhor entendimento das decisões tomadas ao longo do projeto. A caldeira por ser o equipamento que se deseja controlar, instalando-se toda a malha de controle por meio de transmissores e equipamentos de intertravamento e segurança, teve inicialmente um estudo bem detalhado de suas características, tipos e aplicações e serão descritas no item 3.1.

O CLP é o equipamento que executa o efetivo controle das variáveis do processo conforme explicado no item 2.3, portanto realizou-se um estudo mais detalhado de seu princípio de funcionamento e algumas características, apontadas no item 3.2, a fim de que, dentre todos os seus parâmetros e aplicações, fosse escolhido um que atendesse àquilo que a planta necessita.

Assim torna-se necessárias um esclarecimento dos equipamentos utilizados, contendo as especificações de fabricação e princípios de funcionamento de acordo com a importância de cada um no processo, esses serão descritos no item 3.3.

3.1 Caldeiras

A geração de vapor é feita pelo aquecimento de água contida em um recipiente fechado (caldeira) que, ao atingir o estado de vapor, é direcionada e controlada através de válvulas e canalizações para os devidos fins de utilização [1].

Caldeira é um recipiente metálico cuja função é a produção de vapor através do aquecimento da água. As caldeiras em geral são empregadas para alimentar máquinas térmicas, autoclaves para esterilização de materiais diversos, cozimento de alimentos através do vapor, ou calefação ambiental [1].

As características das caldeiras são [1]:

- Potência térmica específica (kcal/kg);
- Máxima pressão operativa (bar);
- Temperatura e pressão do fluido;
- Superfície aquecida usada para radiação e convecção (m²);
- Carga de calor por unidade de volume, no tempo (kcal/hm³).

A potência térmica pode ser definida a partir das diferentes condições de carga:

- Carga reduzida;

- Carga normal;
- Máxima carga contínua;
- Carga máxima.

Além destas características, pode-se classificar as caldeiras segundo suas dimensões conforme será visto no item 3.1.1.

3.1.1 Classificação das Caldeiras Segundo suas Dimensões

As caldeiras podem ser classificadas em 3 categorias básicas, de acordo com a potência e pressão, e também de acordo com a dimensão da superfície aquecida:

Tabela 1: Classificação de caldeiras [1].

	pequenas	médias	grandes
Características	monobloco pré-fabricadas transportáveis	pré-fabricadas adaptáveis a condições especiais	fabricadas para casos específicos
Pressão	20 bar	100 bar	365 bar
Temperatura	450 °C	520 °C	655 °C

3.1.1.1 Evolução das Caldeiras Pequenas e Médias

A demanda de novas caldeiras, nos últimos anos, provocou um aumento do desenvolvimento tecnológico no projeto e nos processos de sua fabricação.

A evolução responde entre outros fatores pela automatização dos processos de fabricação. Estas evoluções podem ser resumidas como [2]:

- Aumento da potência térmica de cada unidade;
- Aumento da pressão e temperatura de trabalho;
- Aumento do rendimento;
- Aumento da flexibilidade da carga;
- Redução das dimensões.

Esta evolução é resultado da melhora da tecnologia de fabricação:

- Adoção de solda nos engates, junções etc.;
- Uso de paredes estreitas formada por tubos soldados;

- Redução do diâmetro interno dos tubos;
- Integração do recuperador de calor;
- Automação dos processos de fabricação.

Para a geração de vapor, existem caldeiras de vários tipos que serão brevemente definidas no item 3.1.2.

3.1.2 Tipos de Caldeiras Elétricas de Vapor de Água

São três os tipos fundamentais de geradores elétricos para geração de vapor de água, abaixo seguem suas características principais.

Caldeiras Elétricas tipo Resistência: São caldeiras nas quais o calor é dissipado por efeito Joule, das resistências imersas aquecendo a água. São ideais para unidades de pequeno porte, onde é baixa a necessidade de vapor (em média 3.500 kg/h). Quanto a pressão de trabalho pode variar até 20 kgf/cm².

O rendimento do gerador elétrico de vapor, é muito elevado em uma faixa de 95 a 99,5%. O controle de carga nos geradores elétricos de vapor à resistência é feito por sensores de pressão (produção de vapor) e de temperatura (aquecimento de água), quando estas tiverem pequena capacidade [1].

Caldeiras Elétricas tipo Eletrodo Submerso: São constituídas basicamente por três eletrodos, adequadamente dispostos, um por fase, montados verticalmente e suportados na parte superior da caldeira por meio de buchas isolantes na entrada de corrente. Os contra-eletrodos são montados solidamente fixados ao casco da caldeira. A corrente elétrica passa através da água na parte inferior da caldeira entre o eletrodo e o contra- eletrodo, aquecendo a água e produzindo vapor que sobe. São supridas em baixa e em alta tensão, possuem elevado rendimento térmico, podendo produzir elevadas vazões de vapor. Operam com pressões que variam de 5 a 20 kgf/cm² [1].

Caldeiras Elétricas tipo Jato de Água: A água colocada na parte inferior do corpo da caldeira é injetada por uma bomba de circulação interna até a parte superior da mesma, na qual estão montados aspersores de água. Os diversos jatos de água formados pelos aspersores fluem por gravidade contra os eletrodos criando diversos caminhos para a passagem de corrente elétrica. Os três eletrodos (ou três grupos de eletrodos) correspondentes a cada fase, são dispostos verticalmente, em círculo rodeando a parte superior da caldeira, na parede da qual estão montados os conjuntos de injetores.

As pressões de trabalho variam de 5 a 30 kgf/cm². Facilidade de controle desde 0% a 100% de carga, uma vez que, os primeiros jatos liberados são os da parte superior do coletor central com uma boa pressão estática. O tempo de partida a frio é muito curto, não necessitando pré-aquecimento de água [1].

Essas caldeiras possuem várias aplicações, e o item 3.1.3 descreve algumas.

3.1.3 Aplicações dos Geradores Elétricos de Vapor de Água

Há uma vasta aplicação de caldeiras elétricas de vapor de água, nos diversos setores industriais. Aqui estão alguns setores que o utilizam em seu processo produtivo:

- Indústria têxtil;
- Indústria do fumo;
- Indústria de papel e celulose;
- Indústria química e farmacêutica;
- Indústria de refrigerantes;
- Indústria metalúrgica;
- Indústria automobilística;
- Hospitais;
- Centrais nucleares;
- Indústria alimentícia;
- Indústria vinícola, sucos de frutas, cervejarias;
- Indústria de conservas, chocolates;
- Indústria de plástico, borracha;
- Apoio a sistemas que utilizam energia solar para aquecimento de água;
- Calefação, entre outros.

3.2 INTRODUÇÃO AO SISTEMA DE CONTROLE

3.2.1 Histórico dos CLP's

O Controlador Lógico Programável (CLP) foi criado praticamente dentro da indústria automobilística americana, especificamente na Hydronic Division da General Motors , em 1968, devido a grande dificuldade de mudar a lógica de controle nos painéis de comando a cada alteração na linha de montagem. Tais mudanças implicavam em altos gastos de tempo e dinheiro. Sob a liderança do engenheiro Richard Morley, foi preparada uma especificação que refletia as necessidades de muitos usuários de circuitos à reles, não só da indústria automobilística, como de toda a indústria manufatureira [3].

Foi devido a esta necessidade de mercado que foram criados os CLP's, pois estes equipamentos começaram a mostrar uma versatilidade e praticidade muito maior que os painéis antigos, apesar de, no início, serem rústicos na sua estrutura de programação.

Com seu aprimoramento constante foram realizadas mudanças significativas, como a variedade de tipos de entradas e saídas, o aumento da velocidade de processamento, a inclusão de blocos lógicos complexos para tratamento das informações e principalmente o modo de programação e a interface com o usuário, que foram sendo cada vez mais aceitos nos setores industriais.

3.2.2 Princípio de Funcionamento

A atuação de um controlador pode ser representada graficamente como um fluxo de informações entre módulos com funções distintas. Na figura 10, um módulo de monitoração obtém uma informação proveniente do processo e envia ao controlador, este procedimento pode conter várias etapas. O controlador recebe esta informação, toma decisões e comunica a um elemento final a ação a ser tomada, que por sua vez, interfere em alguma condição de processo a fim de controlá-lo corretamente, seguindo o programa do usuário.

O princípio de funcionamento do CLP segue uma rotina de varredura do programa para a atualização das entradas e ajustes na saída, como pode ser visualizado na representação simplificada da figura 10.

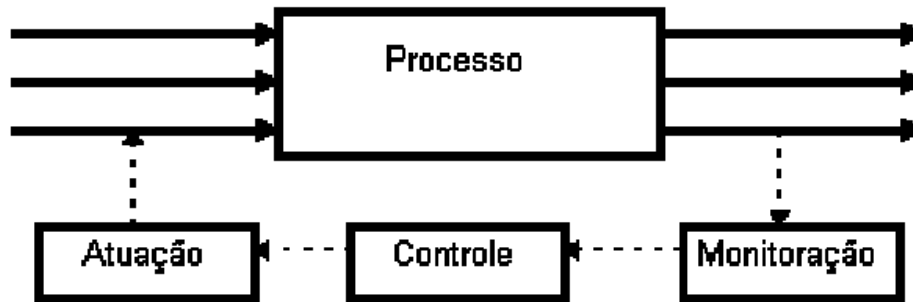


Figura 10 - Sistema de Controle [3].

As subseções seguintes listam a seqüência de funcionamento de um CLP:

3.2.2.1 Inicialização

No momento em que é ligado o CLP, o mesmo executa uma série de operações pré-programadas, gravadas em seu Programa Monitor [2]:

- Verifica o funcionamento eletrônico da CPU, memórias e circuitos auxiliares;
- Verifica a configuração interna e compara com os circuitos instalados;
- Verifica o estado das chaves principais (*RUN / STOP*);
- Desativa todas as saídas;
- Verifica a existência de um programa de usuário;
- Emite um aviso de erro caso algum dos itens acima falhe.

3.2.2.2 Verificação do estado das entradas

O CLP lê os estados de cada uma das entradas, verificando se alguma foi acionada. O processo de leitura recebe o nome de Ciclo de Varredura (*Scan*).

3.2.2.3 Transferência para a memória

Após o Ciclo de Varredura, o CLP armazena os resultados obtidos em uma região de memória chamada de Memória Imagem das Entradas e Saídas. Ela recebe esse nome por ser um espelho do estado das entradas e saídas. Essa memória será consultada pelo CLP no decorrer do processamento do programa do usuário para o controle do processo.

3.2.2.4 Comparação com o programa do usuário

O CLP ao executar o programa do usuário, primeiramente consultando a Memória Imagem das Entradas, atualiza o estado da Memória Imagem das Saídas, de acordo com as instruções definidas pelo usuário em seu programa, monitorando as variáveis para que não estejam fora dos padrões definidos anteriormente.

3.2.2.5 Atualização do estado das saídas

O CLP escreve o valor contido na Memória das Saídas, atualizando as interfaces ou módulos de saída. Este processo é repetido ininterruptamente iniciando-se então, um novo ciclo de varredura.

3.2.3 Capacidade de um CLP

Podemos ressaltar que com a popularização dos micros-controladores e a redução dos custos de desenvolvimento e produção, houve uma avalanche no mercado de CLP's, os quais podem-se dividir em [3]:

Nano e Micro - C.L.P.s

São CLP's de pouca capacidade de E/S (máximo 16 Entradas e 16 Saídas), normalmente digitais, composto de um módulo, visando baixo custo, porém com reduzida capacidade de memória [3].

CLP's de Médio Porte

São CLP's com uma capacidade de Entrada e Saída de até 256 pontos, digitais e analógicas, que são formados por um módulo básico expansível. Costumam permitir até 2048 passos de memória, que podem ser interna ou externa [3].

CLP's de Grande Porte

Os CLP's de grande porte se caracterizam por uma construção modular, constituída por uma Fonte de alimentação, CPU principal, CPU's auxiliares, CPU's Dedicadas, Módulos de E/S digitais e Analógicos, Módulos de E/S especializados, Módulos de Redes Locais ou Remotas, entre outros, que são agrupados de acordo com a necessidade e complexidade da automação. Permitem a utilização de até 4096 pontos de E/S. São montados em um *rack* que permite um cabeamento estruturado [3].

3.3 DESCRITIVO DE EQUIPAMENTOS

3.3.1 Sensor de pressão diferencial

Com o uso desta ferramenta é possível saber com exatidão o nível de água dentro da caldeira, muito importante para o controle do sistema, evitando assim que esta fique vazia e danifique a resistência ou fique cheia, o que pode gerar um aumento excessivo da pressão.

O dispositivo utilizado no experimento é do fabricante Smar modelo LD 303, conforme ilustrado na figura 11.

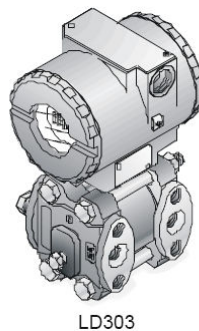


Figura 11 - Sensor de Pressão Diferencial LD303 [4].

Segue abaixo os dados fornecidos pelo fabricante [4]:

- Exatidão de $\pm 0,04\%$;
- Faixa de operação 0 a 40 MPa (0 a 5800 psi);
- Pressão estática de até 52 MPa (7500 psi);
- Parametrização e calibração remota;
- Linearização para tanque;
- Indicação digital alfanumérica;
- Unidade do usuário configurável;
- Ajuste local configurável;
- Protocolo de comunicação: PROFIBUS-PA.
- Corrente de consumo de 12mA;
- Integração ao Simatic PDM;

A figura 12 mostra o esquema da célula capacitiva. O funcionamento do LD303 utiliza a

medição de pressão por leitura capacitiva, e é realizado da seguinte forma:

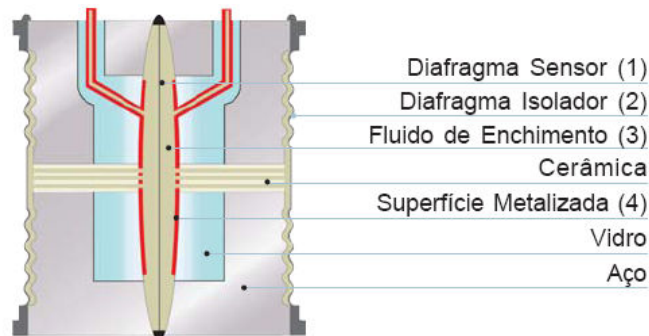


Figura 12 - Esquema interno do Sensor [4].

No centro da célula está o diafragma sensor (1). Este diafragma flexiona-se em função da diferença de pressões aplicadas ao lado direito e esquerdo da célula. Essas pressões são aplicadas diretamente aos diafragmas isoladores (2), os quais fornecem resistência contra corrosão provocada por fluidos de processos. A pressão é diretamente transmitida ao diafragma sensor através do fluido de enchimento (3), provocando a sua deflexão.

O diafragma sensor é um eletrodo móvel. As duas superfícies metalizadas (4) são eletrodos fixos. A deflexão do diafragma sensor é percebida através da variação da capacitância entre os dois eletrodos fixos e o móvel.

Mede-se a diferença da pressão entre dois pontos, um localizado na parte lateral superior da caldeira onde será verificado a pressão do vapor de água no interior da mesma, e o outro localizado lateralmente no nível mais baixo, onde a pressão aferida será a pressão do vapor de água somada a pressão que a coluna de água exerce neste ponto. Portanto subtraindo-se a pressão da parte inferior pela pressão na parte superior é possível obter qual a pressão exercida pela coluna de água.

Segundo a equação da estática dos fluidos, a diferença de pressão tem relação com a altura da coluna do fluido, no caso a coluna de água, como pode-se verificar na equação (1):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \mu g \Delta h \quad (1)$$

Onde:

Δp – Variação da pressão

p_1 – Pressão na parte inferior

p_2 – Pressão na parte superior

μ – Massa específica do fluido

g – Aceleração da gravidade

Δh – Variação da altura

3.3.2 Transmissor de pressão absoluto

Este transmissor é muito importante para o experimento, pois com os dados enviados deste equipamento para o CLP realiza o controle a fim de obter uma pressão ideal no interior da caldeira, também podendo ter segurança de que a pressão não atinja valores fora dos permitidos dentro do padrão do projeto, evitando assim acidentes.

O princípio de funcionamento desse sensor capacitivo é igual ao mostrado para o transmissor de pressão diferencial LD303. A única diferença entre estes dois equipamentos é que em um dos lados da célula capacitiva, citada no item 3.3.1, é conectada uma câmara de vácuo, que se torna a referência de zero absoluto.

O equipamento usado é do fabricante Endress + Hauser, modelo PMC 731, e pode ser visualizado na figura 13.



Figura 13 - Transmissor de Pressão Absoluta [5].

3.3.3 Transmissor de Temperatura

O TT303, ilustrado na figura 14, é o transmissor de temperatura aplicado ao experimento e tem como função a interpretação dos sinais analógicos provenientes dos Termopares ou RTDs (termo resistências). Sua operação aceita geradores de sinal de mV com valores numa faixa de entrada de -50 a 500 mV e resistência entre 0 a 2000 Ohms, respectivamente.

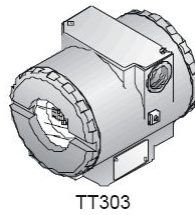


Figura 14 -Transmissor de Temperatura TT303 [4].

No caso deste projeto será usado com um sensor termopar e este é conectado ao transmissor de temperatura no terminal indicado na figura 15.

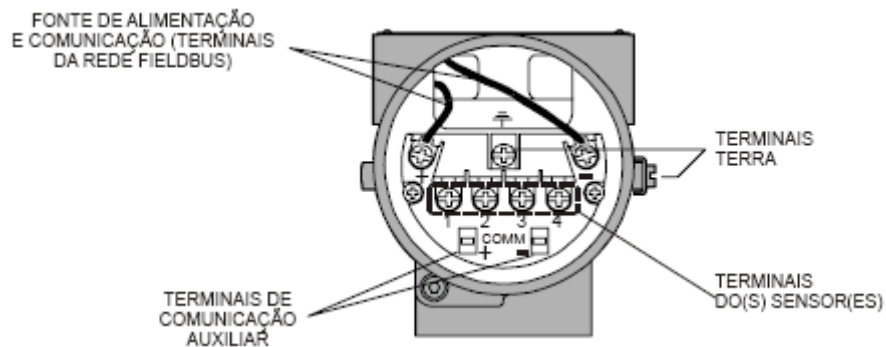


Figura 15 - Conexão com o termopar. [6]

Abaixo tem-se algumas características do TT303 [6]:

- Exatidão de $\pm 0,02\%$;
- Linearização de RTDs e Termopares embutidos;
- Ajuste local de zero e span;
- Calibração remota via HHT ou via PC;
- Indicação digital alfanumérica;
- Isolação de sinal;
- Profibus-PA
- Auto diagnóstico;
- Entrada universal aceita vários termopares, RTDs, mV e Ohm;
- Corrente de consumo de 12 mA;
- Integração ao Simatic PDM;

3.3.4 Termopar

Os termopares, como pode ser visto na figura 16, são elementos sensores de temperatura largamente empregados na indústria, principalmente por oferecerem robustez, baixo custo e operação em uma grande faixa de temperaturas. Tais sensores baseiam-se no efeito termoelétrico, descoberto por Thomas Seebeck em 1821, no qual um par de condutores de ligas distintas é soldado as suas extremidades. Sendo uma chamada junta quente ou junta de medição, que fica acoplada no ponto onde desejamos medir ou controlar a temperatura. A outra extremidade, chamada junta fria ou junta de referência, ligada ao instrumento. A diferença de temperatura entre estas extremidades gera uma determinada tensão [7].



Figura 16 - Termopar.

3.3.5 Contator

O contator é uma chave de normalmente aberta que pode ser fechada por um sinal de tensão, neste caso 220V. O equipamento em questão é do fabricante WEG e pode trabalhar com uma tensão de até 380V, aceitando uma corrente de até 16A. O modelo utilizado pode ser visualizado na figura 17.



Figura 17 - Contator Weg.

3.3.6 Indicadores de nível

Esta caldeira tem em sua estrutura dois indicadores de nível, que são duas hastes metálicas de cobre com 20 cm de comprimento, cuja funcionalidade é indicar apenas os estados cheio e vazio e seu uso foi melhor explicado na parte de inter-travamentos analógicos no item 2.3.4.

3.3.7 Pressostato

Será instalado na caldeira o pressostato ilustrado na figura 18. Esse equipamento possui terminais com contatos, normalmente aberto e normalmente fechado. A mudança destes estados ocorre de acordo com a pressão estabelecida no próprio aparelho, por ajuste manual.



Figura 18 - Pressostato.

3.3.8 Válvula de entrada de água e saída

Tal equipamento é uma válvula a solenóide que quando energizada com uma tensão de 220V, excita a bobina movimentando um êmbolo interno, esse libera a passagem de água na entrada e vapor na saída. A figura 19 mostra o modelo utilizado.



Figura 19 - Válvula a solenóide

3.3.9 Válvula de Segurança

Equipamento de segurança utilizado para a saída de vapor da caldeira caso a pressão exceda os valores permitidos no experimento, e podendo ser vista na figura 20. Seu funcionamento é baseado na aplicação da força de uma mola contra um êmbolo no interior da caldeira, caso a pressão interna seja maior que a força da mola, ocorre a vazão forçada de vapor da água.



Figura 20 - Válvula de segurança.

3.3.10 Controlador Lógico Programável

É o equipamento que recolhe todos os dados e realiza toda a lógica de controle de acordo com os requisitos do projeto. É constituído de hardware e software. O hardware é constituído de um bloco único, sua estrutura comporta: uma fonte interna, entradas e saídas digitais e comunicação modbus. O software utilizado para o Máster K é o KGL-WE. A figura 21 mostra o modelo citado.

A escolha do CLP usado foi baseada em considerações sobre a facilidade na utilização do software e sua comunicação que se realiza sob o protocolo de comunicação industrial PROFIBUS-PA, conectando o cartão extra. O modelo do cartão de comunicação é G7L-PBEA (Profibus I/F module (Slave)), também da empresa LG e se conecta diretamente ao base CLP.



Figura 21 - CLP Master K 120S da LG.

4 CONCLUSÃO

Para a implementação de um projeto de controle de uma caldeira ou qualquer outra aplicação como um todo deve ser feito uma série de estudos iniciais sobre a o controle a ser aplicada, para isso sendo requerido de início, um diagrama de rede e um diagrama de controle. Assim podendo-se definir os tipos de sensores, atuadores e transmissores para obter um projeto otimizado em vários aspectos como: custo, facilidade de comunicação e manutenção.

No entanto deve-se ressaltar a grande vantagem da utilização de componentes de alta tecnologia em relação ao sistema anterior meramente eletro-mecânico, uma vez que este proporcionou um controle bastante fino e passível de novas alterações que podem gerar outros trabalhos como esse, sugere-se a partir do transmissor de temperatura, com alta sensibilidade e precisão, que o sistema receba um controle por chave tiristorizada, a fim de que a temperatura seja estável durante todo o ciclo de utilização.

Como ressalva do projeto, deixa-se a observação de que todas as partes passíveis de falha de qualquer tipo devem ser constantemente conferidas, permitindo assim que sejam realizados quaisquer procedimentos, tanto nos equipamentos quanto na lógica aplicada no controle, sem que a segurança das máquinas e principalmente das pessoas envolvidas com o experimento seja esquecida. Sendo necessária a montagem de um revestimento da caldeira com um material que pudesse resistir choques mecânicos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Altafini, C. R. Disciplina de máquinas térmicas In: Universidade de Caxias do Sul. **Apostila sobre caldeiras**. Caxias do Sul, 2002. p.1-36.

[2] Pera, H. **Geradores de Vapor de Água**, Disponível em: <http://www.em.pucrs.br/~sergio/fluidotermica/Cap06_Geradores_de_Vapor.PDF>, Acesso em: 02 ago. 2007.

[3] Antonelli, P. L. **Introdução aos Controladores Lógicos Programáveis**, Descrito em: <<http://www.ejm.com.br/download/Introducao%20CLP.pdf>>, Acesso em: 10 jul. 2007.

[4] Manual dos Procedimentos de instalação, operação e manutenção, Catálogo da Empresa SMAR. Disponível em: <<http://www.smar.com/PDFs/Manuals/GERAL-PAMP.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2007

[5] Catálogo PMC71. Empresa Endress+Hauser, 2007. Apresenta os dados de fabricação do PMC 71. Disponível em: <<http://container.endress.com/ProductContainerGUI/?root=PMC71&contry=br&lang=en&SChome=http://www.br.endress.com/eh/http://www.de.endress.com/>>, Acesso em: 25 jul. 2007.

[6] Site da Empresa Smar,2007. Apresenta funcionalidades do produto Process View. Disponível em: <http://www.smar.com/products/process_view.asp>, Acesso em: 25 jul. 2007.

[7] KRAKECHE, I.; ZWIRTES, M.; FISTAROL, A.; TIBOLLA, V. **Sensores de Temperatura**, Disponível em: <<http://hermes.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/temp2.pdf>>, Acesso em: 27 set. 2007.