

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUÍS FERNANDO MEDINA

**Automação e supervisão de uma mini-caldeira
elétrica utilizando protocolo Profibus**

SÃO CARLOS - SP

2010

LUÍS FERNANDO MEDINA

Automação e supervisão de uma mini-caldeira elétrica utilizando
protocolo Profibus

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Engenheiro
Eletricista

Área de concentração: Automação
Industrial

Orientador: Prof. Dr. Dennis Brandão

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M491a

Medina, Luís Fernando

Automação e supervisão de uma mini-caldeira elétrica utilizando protocolo Profibus / Luís Fernando Medina ; orientador Dennis Brandão. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Automação industrial. 2. Caldeira elétrica.
3. Profibus. 4. Sistema de supervisão. I. Título.

Dedicatória

Aos meus pais, Antonio e Maria,
a minha namorada Marina
e a minha sobrinha Ana Laura,
com amor, carinho e alegria.

Agradecimentos

- Aos meus pais Antonio José e Maria Liene pelo apoio, incentivo e conforto durante toda minha vida.
- A minha namorada Marina pela ajuda, compreensão e carinho.
- A minha irmã Juliana e meu cunhado Diogo.
- Ao Prof. Dr. Dennis Brandão pela orientação e por possibilitar minha iniciação científica.
- A todos os integrantes do Laboratório de Automação Industrial que me ajudaram na realização deste projeto.
- Ao Leandro H. B. Torres que disponibilizou o Treinamento em System-302 aplicado a tecnologia Profibus no Centro de Treinamento Smar.
- A todos os meus amigos que participaram da minha vida durante a faculdade, compartilhando momentos de alegria e dificuldade.
- A todos os amigos que conheci durante a minha vida.

Resumo

Este projeto consiste na automação e supervisão computacional de uma mini caldeira elétrica, para isso será utilizado os equipamentos como software, CLP e transdutores existentes no Laboratório de Automação Industrial da EESC-USP.

Para programação do CLP será utilizada a lógica por Diagrama Ladder, que permite realizar a operação da planta de modo contínuo. Para o aumento do nível de segurança, serão tomadas precauções durante a elaboração do programa do CLP, que garantirá um inter-travamento eficiente. A comunicação entre os transdutores e o CLP será feita através do protocolo Profibus-PA, que possui alta confiabilidade na transmissão de dados, aumentando ainda mais a segurança. Para a configuração da rede Profibus e a programação por Diagrama Ladder, será utilizado o software do fabricante Smar Equipamentos Industriais Ltda.

O software supervisório será um sistema do tipo SCADA, e para sua confecção será utilizado o software Indusoft Web Studio, com isso é possível supervisionar os processos que ocorrem na mini caldeira elétrica, podendo intervir a qualquer instante. O operador possui a liberdade de alterar as grandezas do processo, desde que respeite certos limites.

A montagem de uma estrutura para enclausurar a caldeira é importante, pois aumenta a segurança dos indivíduos evitando que o escape indevido de vapor com alta pressão e temperatura possa causar algum acidente.

Palavras Chave: Automação, Caldeira Elétrica, Profibus, Supervisório

Abstract

This project consists on computer automation and supervision of a mini electrical boiler, in order to do this, will be used software and equipments, such as PLC and transducer, that there are in the Laboratório de Automação Industrial of EESC-USP.

For PLC programming logic will be used Ladder Diagram, which allows the continuously plant operation. To increase the level of security, precautions are taken during preparation of the PLC program, which will ensure an effective inter-locking. The communication between the transducers and the PLC will be done through the PROFIBUS-PA protocol, which has high reliability in data transmission, improving even more the security. For the configuration of the Profibus network and programming by Ladder Diagram, will be used the software System 302-7.

The supervisory software is a kind of SCADA system, and will be used Indusoft Web Studio software to do it, through it is possible to monitor the processes occurring in mini electric boiler, and may intervene at any moment. The operator has the freedom to change the magnitudes of the process, provided that it meets certain limits.

The assembly of a structure to enclose the boiler is important because it increases the security of individuals avoiding the undue escape of steam at high pressure and temperature, what can cause an accident.

Keywords: Automation, Electrical Boiler, Profibus, Supervisory

Lista de tabelas

Tabela 1 - Configuração do Rack do CLP DF73.....	28
Tabela 2 - Lista de Variáveis Utilizadas no Diagrama Ladder	43
Tabela 3 - Blocos Funcionais Utilizados no Diagrama Ladder.....	43

Lista de figuras

Figura 1 - Mini-Caldeira Elétrica Tipo Resistência	21
Figura 2 - Configuração da Rede Profibus.....	24
Figura 3 - Topologia de Rede do Sistema de Automação e Supervisão.....	25
Figura 4 - CLP Smar DF73	27
Figura 5 - Coupler Pepperl + Fuchs [1].....	29
Figura 6 - Transmissor de Pressão Absoluta PMC731 [2]	29
Figura 7 - Transmissor de Pressão Diferencial LD303 [3]	30
Figura 8 - Transmissor de Temperatura TMD834 [4].....	31
Figura 9 - Posicionador de Válvula FY 303[5].....	32
Figura 10 - Conversor de Protocolo Profibus para 4-20mA - FI303 [6]	34
Figura 11 - Diagrama de Bloco da Malha de Controle de Nível por Cascata.....	37
Figura 12 - Diagrama de Bloco da Malha de Controle de Temperatura por Cascata	37
Figura 13 - Fluxograma de Processo para a Automação da Mini-Caldeira Elétrica..	39
Figura 14 - Exemplificação do diagrama Ladder e o gráfico demonstrando o comportamento da entrada e saída [7]	42
Figura 15 - Exemplo da utilização e ligação de um bloco funcional na programação em Ladder [7].....	42
Figura 16 - Diagrama Ladder - Consumo do Vapor.....	44
Figura 17 - Diagrama Ladder - Intertravamento para Temperatura Alta	45
Figura 18 - Diagrama Ladder - Confirmação de Temperatura Segura	46
Figura 19 - Diagrama Ladder - Unificação do Set Point de Pressão	46
Figura 20 - Diagrama Ladder - Controle Cascata para Temperatura	47
Figura 21 - Diagrama Ladder - Intertravamento para Nível Alto	49
Figura 22 - Diagrama Ladder - Confirmação de Nível Seguro	50
Figura 23 - Diagrama Ladder - Alarme de Nível Baixo	50
Figura 24 - Diagrama Ladder - Intertravamento para Nível Baixo	51
Figura 25 - Diagrama Ladder - Confirmação de Nível Seguro	51
Figura 26 - Diagrama Ladder - Controle Cascata para Temperatura	52
Figura 27 - Tela do Sistema Supervisório.....	54
Figura 28 - Tela do Sistema Supervisório - Configuração dos Parâmetros do PID's	56
Figura 29 - Tela do Sistema Supervisório - Configuração dos Parâmetros do PID's e PID Temperatura Modo Automático	57
Figura 30 - Tela do Sistema Supervisório - Configuração dos Parâmetros do PID's, PID's no Modo Automático, Atuação nas Grandezas e Consumo de Vapor	58

Sumário

1.	Introdução	12
1.1)	Uma visão histórica da Automação	12
1.2)	Da Automatização a Automação	16
1.3)	Objetivo	17
2.	A Caldeira Elétrica	20
3.	O Sistema de Automação	22
3.1)	Rede Profibus.....	22
3.2)	Equipamentos e Softwares Utilizados	25
3.2.1)	Software.....	26
3.2.2)	Equipamentos Profibus	27
3.2.3)	Equipamentos auxiliares	35
3.3)	Procedimento de Controle	36
3.4)	Programação do CLP	41
3.5)	Sistema de Supervisão.....	53
4.	Conclusão	60
5.	Referências Bibliográfica.....	62

1. Introdução

1.1) Uma visão histórica da Automação

A indústria tradicional caracterizava-se até o século XVIII, segundo Santos (1979), pelo uso de processos empíricos, transmitidos, de geração em geração, quase intactos. Praticamente, quase toda a energia mecânica necessária para a transformação dos produtos naturais era de origem muscular e especialmente proveniente dos músculos do homem.

No fim da Idade Média todos os bens industriais eram fabricados em pequenas oficinas onde o proprietário (o artesão) trabalhava duramente, ao mesmo tempo em que gerenciava os outros trabalhadores da oficina. Nesse tipo de atividade não havia qualquer preocupação com a produtividade, conceito gerado durante a era industrial. A incidência da mão-de-obra no custo do produto final era também coisa que não se considerava.

Em consequência da baixíssima produtividade, a produção de bens manufaturados era muito escassa. Não havia, porém, qualquer pressão externa para a elevação da produção, pois não só os preços salariais (preço de um artigo expresso em salários horários) eram muito elevados, como o poder de compra era praticamente nulo. Havia equilíbrio entre produção e consumo.

Para compreender o papel do progresso incessante da indústria na evolução da humanidade, deve-se considerar as atividades transformadoras do homem como uma grande luta contra a natureza hostil (SANTOS, 1979). O panorama na época que antecedeu o advento da primeira industrialização era:

- agricultura de baixa produção por hectare;
- maioria da população (70 a 90%) em atividades primárias;
- minoria da população (cerca de 7%) em atividades industriais do tipo artesanal;
- produção de alimentos insuficiente para a população, ou seja, fome endêmica, com regime de racionamento alimentar;
- escassa produção industrial com produtos de alto custo salarial, sendo em grande parte só acessíveis às classes privilegiadas;

- população constante a longo prazo devido à limitação automática por causa da fome;
- alta mortalidade infantil (quatro mortos no primeiro ano em cada cinco natos-vivos).

A aplicação prática de uma descoberta científica, a força elástica do vapor de água, gerou um processo de renovação da industria tão profundo que viria a alterar completamente a face dos países onde ocorreu.

Esta revolução iniciou-se na Inglaterra com a mecanização dos sistemas de produção. A burguesia ávida por maiores lucros, menores custos e produção acelerada, buscou alternativas para melhorar a produção de mercadorias (CAPELLI, 2006). Novas invenções e novos desenvolvimentos industriais seguiram-se em rápida sucessão. Energias muito mais poderosas eram postas a serviço do homem permitindo-lhe uma maior ação sobre a natureza. Depois das máquinas a vapor, são os motores de explosão, combustão interna e a energia elétrica que dão origem a novos desenvolvimentos industriais (SANTOS, 1979).

A Inglaterra foi o país que saiu na frente no processo da Revolução Industrial, segundo Capelli (2006), pois possuía grandes reservas de carvão mineral, grandes reservas de minério de ferro, mão-de-obra abundante e barata. Além disso, a burguesia tinha capital suficiente para financiar novas fábricas, comprar matéria-prima, máquinas e contratar empregados.

A mecanização teve como primeira consequência um aumento na produtividade. Uma maior quantidade de artigos manufaturados foram lançados no mercado em maiores quantidades e a preços mais baixos. O comércio e os transportes desenvolveram-se para fazer face ao aumento do fluxo de mercadorias. Uma parte da humanidade começava a emergir da miséria.

Este crescimento súbito da indústria teve muitos reflexos saudáveis econômicos e sociais. As novas necessidades assim estimuladas levaram ao aparecimento de uma procura crescente por mercadorias. Apesar dos progressos na produtividade, a porcentagem da população começou a crescer a partir de 1800 (SANTOS, 1979). A concentração de potência permitida pelas máquinas, o advento de preocupações de produtividade, os preços dos produtos, as novas facilidades do comércio, geraram grandes empresas industriais.

O advento da primeira revolução industrial permitiu libertar o homem da tarefa primária de utilização da força muscular para moldar e utilizar as suas ferramentas. Esta libertação permitiu-lhes canalizar energias no sentido da criação de novos utensílios e de novos desenvolvimentos. Em muitos casos, a função do operário reduziu-se à repetição dos mesmos gestos simples. No campo da produção mecânica, o estudo do rendimento das máquinas-ferramenta e a definição de normas de controle dimensional dos artigos fabricados, conduziram a produção em grande série.

Como consequência do progresso incessante, a produtividade foi vencida pela ação do consumo crescente. Com isso, nos últimos anos foram criados equipamentos capazes não só de reproduzir o movimento dos músculos humanos, mas também o seu sistema sensorial, a sua capacidade de pensamento e de ação.

A necessidade de plantas fabris mais ágeis, com grande produtividade e um número de paradas muito pequeno, foi conseguida graças à integração de sistemas e a distribuição da inteligência nos diversos pontos da cadeia produtiva.

Até meados de 1990 isso não acontecia. Segundo Capelli (2006), todo o processamento de dados de uma fábrica era concentrado em um Centro de Processamento de Dados (CPD) que enviava os dados para a periferia e também os recebia através de imensos cabos.

A Indústria ao evoluir para células automatizadas, ou seja, sistemas que compartilhavam informações, tornaram-se mais eficazes, porém as ilhas de automação não se comunicavam entre si. Mais tarde, quando os sistemas corporativos passaram a exigir informações em tempo real, esse sistema perdeu sua eficiência, obrigando a otimização dos espaços utilizados no chão de fábrica. Como resposta surgiu a integração da operação industrial, esse sistema compõe desde o nível de chão de fábrica (sensores e atuadores) até o controle de processo e supervisão, tudo isso interligado por diversas redes industriais.

Isso foi possível graças a fusão do processamento de informações com a comunicação, então abriram-se as fronteiras com novas formas de comunicação, que tornou os sistemas computacionais mais eficientes. Como resultado obteve-se a integração de vários sistemas que permitem a intercambialidade, interoperabilidade e a expansividade destes sistemas, influindo nos custos e nos modos de gestão e manutenção.

Neste contexto, os Sistemas Digitais de Controle Distribuídos (SDCD) eram implementados com computadores digitais específicos para aplicações de automação, no que se refere ao sistema operacional, programas aplicativos de controle e supervisão, hardware e configurações de seus dispositivos de entrada e saída. Estes equipamentos supriam as deficiências dos CLP, quanto a capacidade de processamento, memória de programação, quantidade de entradas e saídas e interface usuário/operador (Capelli, 2006)

Com o crescente desenvolvimento dos CLP e das interfaces homem-máquina, os SDCD passaram a ter uma nova arquitetura, tornando-se bem mais flexíveis e com um custo bem menor. Desta forma, a maioria das implementações passaram a ser redes de CLP gerenciadas por sistemas de Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA).

Ainda com relação a comunicação, observar-se que as redes de campo (Fieldbus) surgiram da necessidade de interligar equipamentos usados nos sistemas de automação que operavam independentemente. A interligação desses equipamentos em rede permitiu o compartilhamento de recursos e bases de dados, as quais passaram a ser únicas e não mais replicadas, conferindo mais segurança aos usuários da informação.

Como benefícios mais significativos para o processo produtivo, pode-se citar, segundo Capelli (2006):

- Maior produtividade;
- Otimização do espaço nas fábricas;
- Melhora da qualidade e padronização do produto final;
- Média alta para o tempo entre falhas;
- Menor tempo de máquinas paradas;
- Maior segurança para os operadores;
- Menor consumo de energia elétrica;
- Menor consumo de insumos;
- Redução de peças rejeitadas.

1.2) Da Automatização a Automação

Entende-se por automação, segundo Moraes e Castrucci (2001), qualquer sistema, apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano e que vise a solução rápida e econômicas para atingir os complexos objetivos das indústrias e dos serviços. A automação só foi possível em resultado das generalizações permitidas por uma nova ciência, a cibernetica, e devido às realizações concretas apoiadas nos avanços da eletrônica, especialmente no domínio dos computadores.

Dentro da industrialização podemos diferenciar os conceitos mecanização ou automatização. Observe que os termos automatização e automação têm significados tão diferentes que de certo modo chegam a serem opostos. O conceito de automatização está ligado ao movimento automático, repetitivo, mecânico e é por tanto sinônimo de mecanização, e mecanismo implica ação cega, sem correção. A automação é um conceito e um conjunto de técnicas através das quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam, com base nas informações, o sistema calcula a ação corretiva mais adequada, um sistema de automação comporta-se exatamente como um operador humano o qual, utilizando as informações sensoriais, pensa e executa a ação mais adequada. O órgão central de um sistema de automação é, na maior parte dos casos, o CLP.

A automatização é a primeira fase da automação. Trata-se, porém, de uma automação não integrada com subsistemas fabris relativamente simples. Encontram-se numa cadeia de controle as funções básicas de medida, computação e controle que já foi referido como sendo características da automação.

Embora não se exija do operário uma atenção constante no controle das inúmeras variáveis, continua sendo necessário que ele integre mentalmente uma multidão de leituras. Cabe ao operário o papel, ainda muito complexo, e acima das suas possibilidades, de levar a harmonia ao complexo fabril de modo a conjugar as inúmeras tendências em jogo. O operador deve, ainda, manter um registro de valores das variáveis para a referência futura e para detecção de anomalias.

Na automação existe também a auto-adaptação a condições diferentes, de modo que as ações do sistema de maquinismo conduzam a resultados melhores. O CLP pode ser programado de forma a otimizar um conjunto de condições

(temperaturas, pressões, vazões, composições, etc.) conduzindo a todos os instantes uma produção ótima sob determinado ponto de vista qualitativo e/ou quantitativo. O aumento de rendimentos de um processo fabril, isto é, a sua otimização, em qualquer nível de produção, exige o conhecimento matemático das relações entre grande número de variáveis e parâmetros. Estas relações (funções de transferência) devem ser estabelecidas tanto em regime estático (em equilíbrio) como dinâmico (durante ou após perturbações de equilíbrio). Estas relações podem atingir grande complexidade, um controle de otimização deve levar em conta estas equações do processo e desempenhar (em tempo real) computações de maximização e minimização.

Com a evolução dos processos de automação, a ação dos operários fabris fica reduzida a funções de vigilância e manutenção. São evidentemente necessários técnicos de alto nível capazes de reparar e conduzir o sistema eletrônico.

A grande e verdadeira vantagem do computador reside exatamente na sua capacidade de lidar com o complexo, de processar uma grande quantidade de informação até chegar aos resultados ou decisões finais. A utilização eficiente de um sistema de automação impõe uma remodelação total de todos os serviços.

1.3) Objetivo

A palavra automação está diretamente ligada ao controle automático, ações que não dependem da intervenção humana. A automação industrial visa, principalmente, a produtividade, qualidade e segurança nos processos, estando presente no dia-a-dia das empresas.

Propõe-se o desenvolvimento de um projeto de automação no qual toda a informação dos sensores é concentrada em um controlador programável, o qual de acordo com o programa em memória define o estado dos atuadores. No caso deste projeto, visa-se a investigação e a implantação da automação e da supervisão remota de uma pequena caldeira elétrica para fins didáticos. Toda a automação utiliza o protocolo de automação industrial PROFIBUS na comunicação entre o controlador programável e os sensores, transdutores e atuadores.

No projeto será montada uma rede PROFIBUS, com o controlador lógico programável sendo o mestre e os escravos serão o medidor de pressão diferencial,

o conversor de Protocolo PROFIBUS para Protocolo 4 – 20 mA, o posicionador de válvula solenóide, o medidor de pressão absoluta e o medidor de temperatura. As malhas de controle serão feitas através de controladores que atuarão no nível e na temperatura da água da caldeira elétrica, buscando manter a pressão de saída num valor constante.

No final do projeto será criada uma tela de supervisão, nesta tela o usuário poderá monitorar as grandezas envolvidas e também poderá alterar os valores das mesmas, atuando diretamente na programação interna do CLP, vale salientar que esses valores só poderão ser inseridos caso estejam dentro de uma faixa de valores seguros.

Para se justificar a automação da mini-caldeira elétrica, lista-se a vasta aplicação de caldeiras elétricas à vapor de água, nos diversos setores industriais. Abaixo são citados alguns setores que a 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.

2. A Caldeira Elétrica

Conforme Altafini (2002)

[...] 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.

Para gerar vapor é necessário aquecer a água que está contida dentro da caldeira que, ao atingir o estado de vapor, é direcionada e controlada através de válvulas e canalizações para os devidos fins de utilização.

Os três tipos fundamentais de caldeiras elétricas são:

Caldeiras Elétricas tipo Resistência: São caldeiras nas quais o calor é dissipado por efeito Joule, das resistências imersas aquecendo a água. Normalmente são utilizadas em unidades de pequeno porte, onde a necessidade de vapor é baixa. A pressão de trabalho pode chegar até 20 kgf/cm². O controle de carga nas caldeiras elétricas à resistência é feito por sensores de pressão (produção de vapor), de temperatura (aquecimento de água) e de nível (entrada de água). (ALTAFINI, 2002).

Caldeiras Elétricas tipo Eletrodo Submerso: Basicamente, são construídas 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 solidamente fixados na parede da caldeira. A corrente elétrica flui pela água na parte inferior da caldeira entre o eletrodo e o contra-eletrodo, vaporizando a água e o vapor produzido sobe. São supridas tanto em baixa como em alta tensão, possuem elevado rendimento térmico, podendo produzir elevadas vazões de vapor. Operam com pressões que variam entre 5 a 20 kgf/cm² (ALTAFINI, 2002).

Caldeiras Elétricas tipo Jato de Água: Através de uma bomba de circulação interna, a água depositada na parte inferior do corpo da caldeira é elevada através de jatos 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 o fluxo de corrente elétrica. Os três grupos de eletrodos correspondentes a cada fase estão dispostos verticalmente,

rodeando em círculo a parte superior da caldeira, na parede cuja qual estão montados os conjuntos de injetores.

As pressões de trabalho variam de 5 a 30 kgf/cm². Existe uma grande facilidade de controle, sendo a faixa de carga entre 0% a 100%, uma vez que, os primeiros jatos liberados são os da parte superior do coletor central com uma boa pressão estática. Além disso, o tempo de partida a frio é muito curto, não necessitando pré-aquecimento de água. (ALTAFINI,2002)

Para este trabalho, a automação e a supervisão acontecerá em uma Mini-Caldeira Elétrica tipo Resistência, fotografada na figura 1:

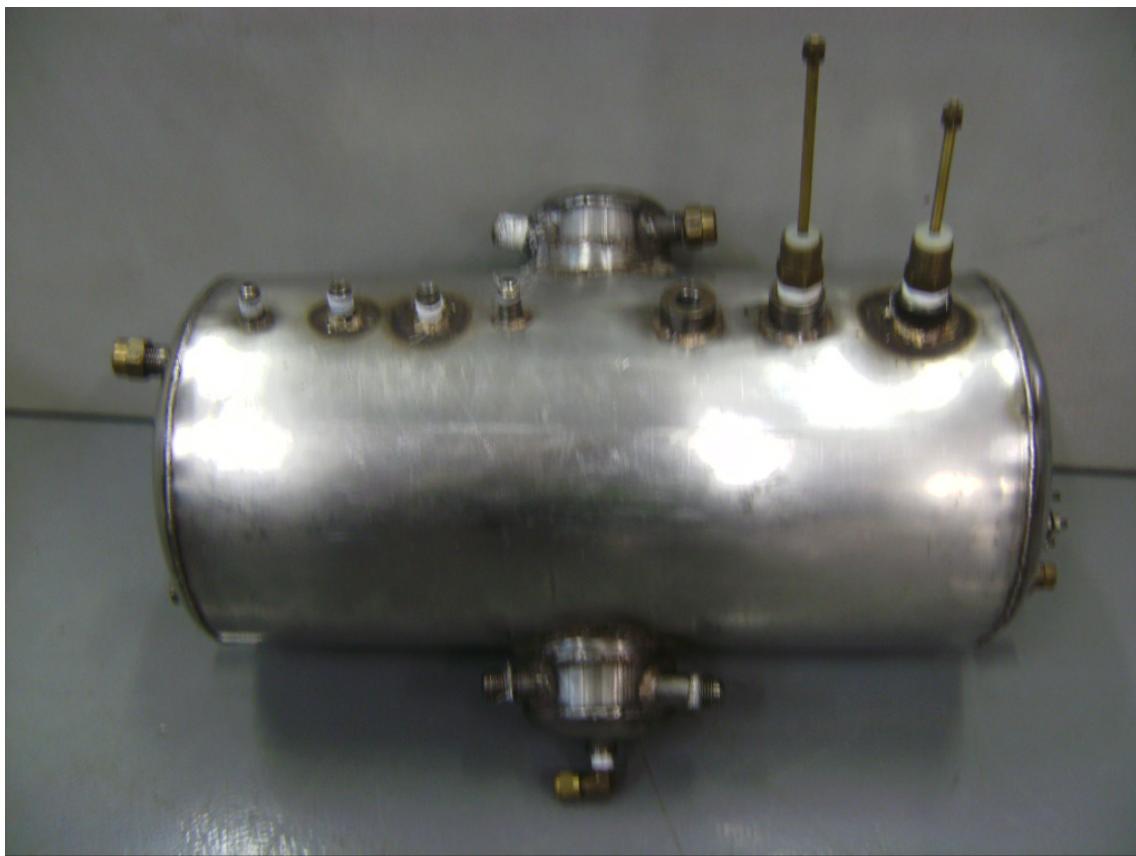


Figura 1 - Mini-Caldeira Elétrica Tipo Resistência

3. O Sistema de Automação

3.1) Rede Profibus

O PROFIBUS é um padrão internacional aberto do Fieldbus baseado no *European Fieldbus Standard EN 50170 e EN 50254* e pelo padrão IEC 61158. Algumas características foram normalizadas através do padrão IEC61784. Com o PROFIBUS, dispositivos de diferentes fabricantes podem comunicar-se entre si, sem ajustes especiais.

Como características básicas, segundo Albuquerque e Alexandria,

[...] o PROFIBUS é um protocolo tipo mestre e escravo em que os controladores são descentralizados e estão ligados em rede no chão de fábrica. Os dispositivos mestres determinam a transmissão de dados, emitem mensagens sem pedido externo. Os escravos são dispositivos periféricos, estão incluídos nesse grupo os dispositivos de entrada/saída, válvulas, atuadores, sensores e transmissores de medidas. Eles não têm direitos de acesso direto ao barramento, podem somente reconhecer mensagens recebidas ou emitir mensagens ao mestre quando solicitado por ele.

A área de aplicação de um sistema *Fieldbus* normalmente é determinada pela escolha do modo de transmissão. (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA) Leva-se em consideração a segurança da transmissão, distância a ser coberta, velocidade de transmissão e, ainda, os fatores eletromecânicos.

Dessa forma, o PROFIBUS-PA é necessário para automação da caldeira, pois através dele é possível conectar sistemas de automação e sistemas de controle de processo com os dispositivos de controle, como controladores de pressão, temperatura e nível.

O PROFIBUS-PA tem as seguintes características:

- Transmissão de dados:
 - Digital;
 - Sincronismo bit a bit;
 - Código Manchester;
 - Velocidade de 31,25kbit/s;
- Segurança de dados – Preamble, Error-Proof, Delimitador da extremidade;
- Cabo par trançado (blindado ou não blindado);
- Alimentação: remota ou via cabo PROFIBUS;

- Quantidade de estações: máximo de 32 estações por segmento de linha, no limite total são 126 estações, expansível com até quatro repetidores.

O PROFIBUS-DP possui como característica principal a transmissão em alta velocidade no nível do dispositivo. Assim, as unidades de processamento centrais se comunicam com seus dispositivos de controle distribuídos através de uma ligação de elevada velocidade de comunicação. A maior parte das transmissões de dados com estes dispositivos é feito de maneira cíclica (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA).

É possível fazer a comunicação entre o Profibus-DP e o Profibus-PA utilizando um acoplador de segmentos (Coupler).

A Rede PROFIBUS-PA foi criada utilizando todos os transmissores citados, sendo eles os escravos e o DF73 o mestre da rede. Os blocos funcionais de cada transdutor e seu respectivo endereço são:

- Transmissor FI 303: as variáveis são “*eSP + RB + RCASIN + RCASOUT + POS_D + CB*” e o endereço na estação é o 99.
- Transmissor FY 303: as variáveis são “*eSP + RB + RCASIN + RCASOUT + POS_D + CB*” e o endereço na estação é o 51.
- Transmissor LD 303: o bloco funcional utilizado é “*Analog Input (short)*” e o endereço na estação é o 50.
- Transmissor PMC 731: a variável é “*PV_scale*” e o endereço na estação é o 53.
- Transmissor TMD 834: a variável é “*PV_scale*” e o endereço na estação é o 04.

A Rede Profibus pode ser visualizada na figura 2, retirada do aplicativo Network Configurator do software System 302-7, lembrando que para que se possa comunicar o DF73 com os equipamentos, é necessário um coupler, pois o CLP comunica-se através do protocolo Profibus-DP e os equipamentos Profibus-PA, portanto o coupler tem a função de converter o protocolo e ele é transparente na rede, não sendo necessário um endereço na estação.

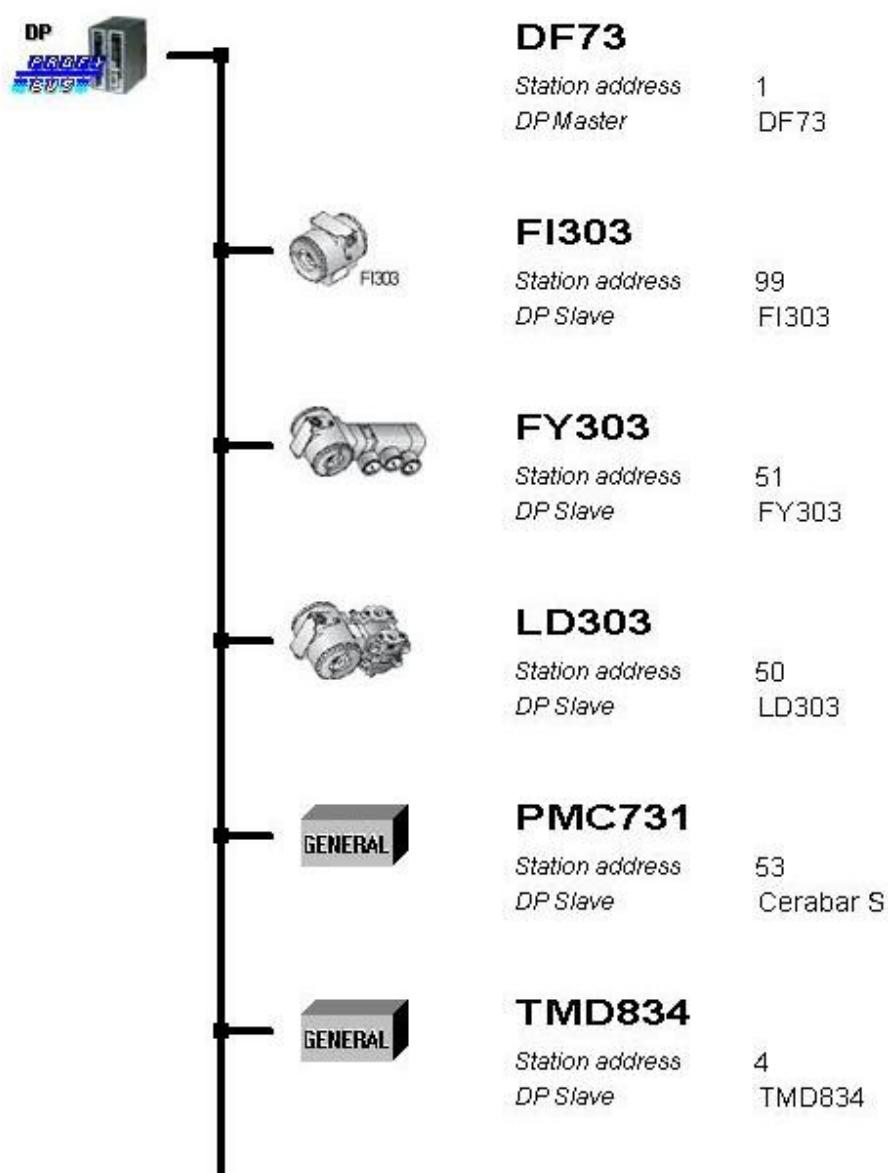


Figura 2 - Configuração da Rede Profibus

3.2) Equipamentos e Softwares Utilizados

O sistema proposto para a automação da caldeira elétrica consiste de um sistema de supervisão que se comunica com o DF73 através do protocolo HSE Ethernet, o CLP se comunica através do protocolo Profibus DP e os equipamentos através do Profibus PA, para que haja harmonia na comunicação deve existir o Coupler que converte os protocolos, permitindo a comunicação entre todos os equipamentos. A topologia da rede pode ser visualizada na figura 3.

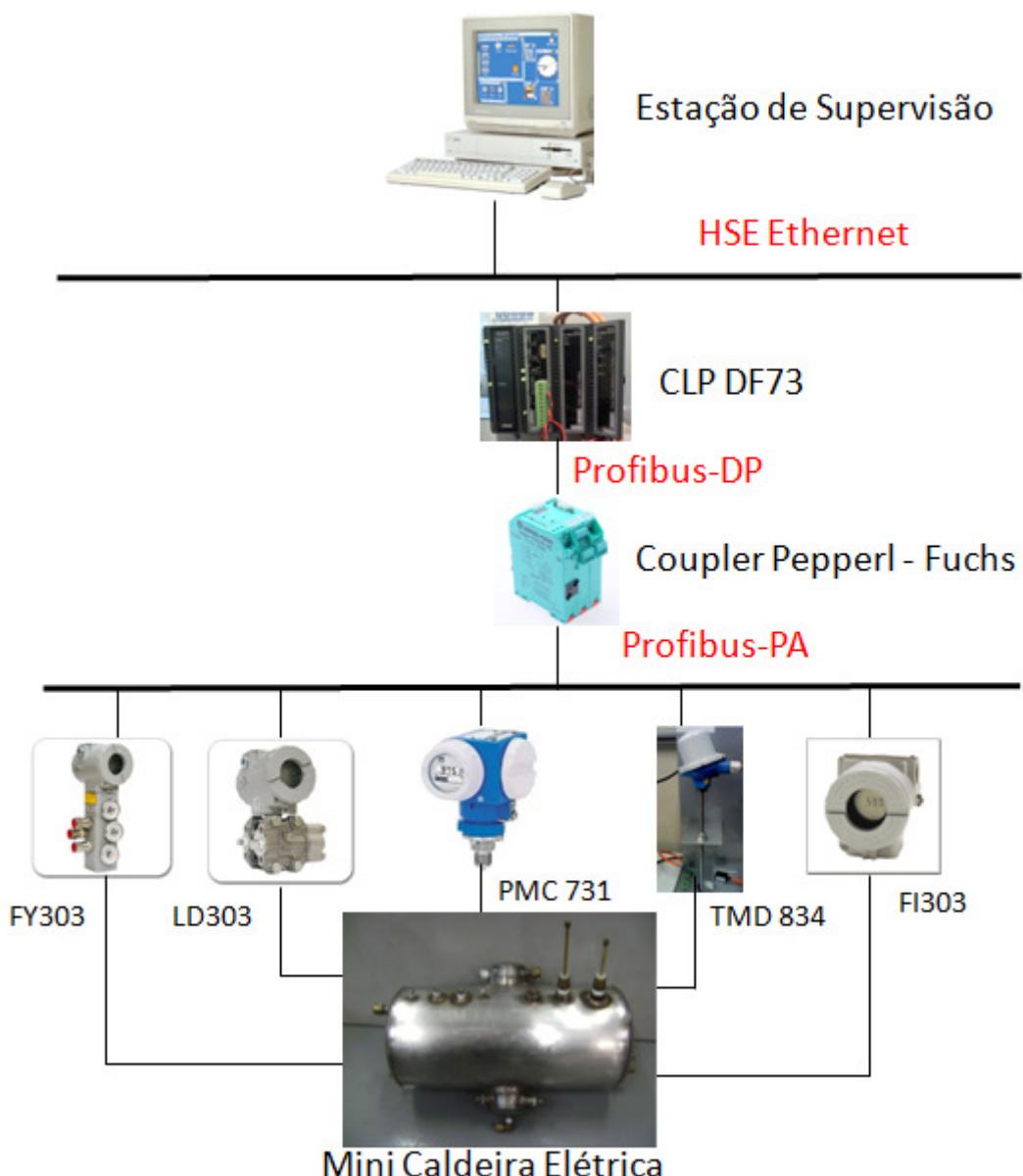


Figura 3 - Topologia de Rede do Sistema de Automação e Supervisão

Os equipamentos e software que serão utilizados para que se possa realizar a Automação em rede Profibus e Supervisão da Mini-Caldeira Elétrica estão detalhados a seguir:

3.2.1) Software

3.2.1.1) System302-7

Software da fabricante Smar, ele é um sistema de automação de controle distribuído, que tem como característica marcante a integração transparente com sistemas de informação avançados, como MES (Manufacturing Execution System), PIMS (Process Information Management System) e ERP (Enterprise Resource Planning) que permite a conexão entre diferentes fontes de dados – comerciais, suprimentos e produção. As informações são disponibilizadas em rede de forma versátil e segura com suporte para dispositivos wireless ou pela Internet.

Este *software* é utilizado para programação do CLP DF73, configuração e comunicação com a Rede Profibus e calibração dos transdutores. (SISTEM302, 2008).

3.2.1.2) Indusoft Web Studio

Software da fabricante Indusoft, este sistema é um completo e poderoso programa que permite o usuário projetar e construir sistemas IHM (Interface Homem-Máquina) ou SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), ou seja, tornando possível aquisição de dados, estações de supervisórios locais e remotas, concentradores de dados para processos distribuídos e comunicação com sistemas corporativos.

Este *software* é utilizado para criação do sistema supervisório, cujo qual permite a monitoração e intervenção humana a distância nos processos, através do computador em tempo real. (INDUSOFT, User's Guide and Technical Reference Manual, 2003).

3.2.2) Equipamentos Profibus

3.2.2.1) Controlador Lógico Programável DF73

Controlador multifuncional com capacidade de *gateway* PROFIBUS DP- High Speed Ethernet. Com um canal PROFIBUS Mestre DP classe 1 e 2, dois canais Ethernet de 10/100 Mbps e capacidade de execução de blocos funcionais, o DF73 permite comunicação entre os dispositivos de campo do tipo PROFIBUS DP e PA, além de comunicação Modbus. Adicionalmente, realiza controle de sistema (*HOST*) para E/S convencionais. Na figura 4, pode-se observar o DF73 que foi utilizado.



Figura 4 - CLP Smar DF73

Segue abaixo as características funcionais fornecidos pelo fabricante:

- *Gateway*- Acesso via barramento interno para até 64 módulos de entrada/saída convencionais;
- Comunicação Ethernet (FOUNDATION™ HSE e/ou Modbus TCP);
- Comunicação serial EIA-232 (Modbus RTU e diagnóstico local)
- Capacidade de instanciar até 1200 diagramas de blocos funcionais padrão IEC 61131 e até 250 blocos funcionais FOUNDATION fieldbus;
- Capacidade de instanciação de blocos flexíveis;

- Configuração através de linguagem Ladder conforme IEC 61131;
- Controle avançado;
- Suporte a SNMP, estampa de tempo e comunicação OPC;
- Webserver integrado para diagnóstico e parametrização;
- Estrutura modular para trilho DIN;
- Refrigeração sem ventilador.

Este equipamento será o mestre da Rede Profibus. Cabe a ele realizar todos os cálculos e tomar as decisões seguindo o que foi programado, ou seja, através dele que será realizado todo o controle do processo. (CONTROLADOR HSE/PROFIBUS-DP)

O Rack do CLP está configurado conforme a tabela 1, no qual os *slots* 0 e 2 são fontes de alimentação elétrica, o *slot* 1 é a Unidade de Processamento Central (CPU) do controlador DF73 e o *slot* 3 é o conector com 4 portas para Profibus já com o terminador de linha integrado.

Tabela 1 - Configuração do Rack do CLP DF73

Rack	Slot	Module	Description
0	0	DF50	Power Supply Module 90-264VAC - Redundant
0	1	DF73	DFI302 HSE Processor 2x100Mbps, Profibus
0	2	DF52	Power Supply for Fieldbus 90-264VDC
0	3	DF53	Power Supply Impedance for Fieldbus (4 ports)

3.2.2.2) Coupler Pepperl+Fuchs

O Coupler Pepperl + Fuchs é um recurso de geração de impedância passiva. Esta impedância impede que o sinal fieldbus seja curto-circuitado pela baixa resistência interna da fonte de alimentação. O design passivo utiliza resistências e indutâncias proporcionando confiabilidade e disponibilidade para a sua aplicação. O Coupler irá "mostrar" todos os dispositivos conectados à rede PA como se fossem dispositivos de campo DP. Na figura 5 pode-se ver o Coupler da fabricante Pepperl + Fuchs.

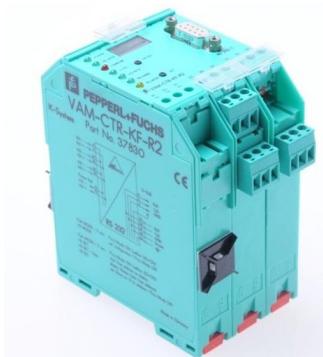


Figura 5 - Coupler Pepperl + Fuchs [1]

3.2.2.2) Transmissor de pressão PMC 731

Este é um sensor de pressão absoluta. É utilizado para aferir a pressão interna da mini-caldeira, isto é muito importante, pois o CLP define as ações a serem tomadas com base na medição que ele fornece, ou seja, comparando o valor de pressão absoluta com o valor desejado de pressão. Além disso, através do sensor que se evita níveis de pressão perigosos, que possam acarretar em acidentes. A comunicação é feita por meio do protocolo de comunicação PROFIBUS PA. O fabricante do equipamento PMC 731 é a empresa Endress + Hauser. Na figura 6 pode-se visualizar o equipamento.



Figura 6 - Transmissor de Pressão Absoluta PMC731 [2]

[1] Figura retirada do site <http://www.artisan-scientific.com>

[2]Figura retirada do site <http://www.chemicalonline.com/product.mvc/Cerabar-S-PMC-731-PMP-731-0001?VNETCOOKIE=NO>

Segue abaixo os dados fornecidos pelo fabricante (PROFIBUS-PA Pressure Transmitter):

- Exatidão de $\pm 0,1\%$;
- Faixa de operação 0 a 40,8 kgf/cm²;
- Medição por leitura capacitiva;
- Parametrização e calibração remota;
- Indicação digital alfanumérica;
- Corrente de consumo 10 mA.

3.2.2.3) Transmissor diferencial de pressão LD 303

Conforme o Manual de instruções, Operações e manutenção TRANSMISSÃO E PRESSÃO PROFIBUS PA- SMAR (LD303), este é um medidor de pressão diferencial, que é utilizado para mensurar o nível d'água no interior da mini-caldeira. Através da diferença de pressão existente ao longo da coluna d'água presente dentro da caldeira, é possível medir o nível de água na mini-caldeira, o que é uma tarefa extremamente importante, pois avisando o CLP evita-se que a caldeira fique vazia, danificando a resistência, ou fique cheia elevando excessivamente a pressão da caldeira. A comunicação é feita por meio do protocolo de comunicação PROFIBUS PA, que, também, apresenta informação de qualidade e diagnóstico, melhorando o gerenciamento e manutenção da planta. O fabricante do equipamento LD303 é a empresa Smar. Na figura 7 pode-se visualizar o equipamento.



Figura 7 - Transmissor de Pressão Diferencial LD303 [3]

Segue abaixo os dados fornecidos pelo fabricante:

- Exatidão de $\pm 0,04\%$;
- Faixa de operação 0 a 407,88 kgf/cm²;
- Pressão estática de até 530,25 kgf/cm²;
- Medição por leitura capacitiva;
- Parametrização e calibração remota;
- Linearização para tanque;
- Indicação digital alfanumérica;
- Unidade do usuário configurável;
- Ajuste local configurável;
- Corrente de consumo de 12mA.

3.2.2.4) Transmissor de temperatura TMD 834

Este é um transmissor de temperatura, que converte a mudança de resistência da causada pela temperatura em sinal digital. É usado para medir a temperatura da água dentro da mini-caldeira, permitindo que a temperatura seja controlada, ou seja, o CLP compara o valor de temperatura fornecido pelo TMD 834 e toma as ações de controle para que a temperatura fique em um nível ideal. Além disso, o temperatura fornecida pelo TMD 834 ajuda a aumentar a segurança, evitando que a temperatura chegue a valores extremamente elevados, podendo causar acidentes. A comunicação é feita por meio do protocolo de comunicação PROFIBUS PA. O fabricante do equipamento TMD 834 é a empresa Endress + Hauser. Na figura 8 pode-se visualizar o equipamento.



Figura 8 - Transmissor de Temperatura TMD834 [4]

Segue abaixo os dados fornecidos pelo fabricante (Temperature transmitter-TMD 834):

- Exatidão: Pt100, Ni100: $\pm 0.15^\circ\text{C}$; Pt1000: $\pm 0.3^\circ\text{C}$;
- Faixa de operação: Pt100, Pt1000: -200 to 850 °C;
Ni100: -60 to 180 °C;
- Corrente de consumo: 13 mA;
- Umidade: 0 a 95% não condensado;
- Parametrização e calibração remota.

3.2.2.5) Posicionador de válvula FY 303

Este atuador é um posicionador de válvula solenóide de controle para sistemas PROFIBUS. Através de um PID interno a ele, é possível controlar a vazão de água, este controle é feito pelo CLP que indica o quanto a válvula deve estar aberta, regulando o fluxo de água que entra na mini-caldeira, o que é possível pois o FY303 fornece uma saída de pressão para posicionar a válvula de controle de acordo com a entrada recebida da rede PROFIBUS. A tecnologia digital utilizada no FY303 possibilita uma interface fácil entre o campo e a sala de controle. A comunicação é feita por meio do protocolo de comunicação PROFIBUS PA (Posicionador de Válvulas Profibus PA, SMAR). O fabricante do equipamento FY303 é a empresa Smar. Na figura 9 pode-se observar o equipamento.



Figura 9 - Posicionador de Válvula FY 303[5]

Segue abaixo os dados fornecidos pelo fabricante (Posicionador de Válvulas Profibus PA, SMAR):

- Saída para atuador: 0 a 100% da fonte de pressão de ar fornecida.
- Ação simples ou dupla. Válvulas Lineares e rotativas.
- Características: Auto-calibração, calibração de posição, diagnósticos.
- Capacidade de Saída: 13,6 Nm³/h para 5,6 bar (80 psi) da fonte
- Corrente de Consumo: 12 mA.
- Pressão de Alimentação: 1,4 - 7 bar. Livre de óleo, pó e água.
- Sensor de Posição: Ímã (sem contato), por efeito HALL.
- Limite de Umidade: 0 a 100 % RH (Humidade Relativa).
- Parametrização e calibração remota;
- Indicação digital alfanumérica;
- Ajuste local configurável.

3.2.2.6) Conversor FI 303

Este é um conversor apropriado para interfacear um sistema Profibus com outros atuadores. O FI303 produz uma saída 4-20 mA proporcional ao sinal de entrada da rede PROFIBUS. Através do PID interno deste atuador é possível controlar a corrente de saída da chave estática, este controle é feito pelo CLP que indica o quanto de corrente eficaz deve fluir pela resistência da mini-caldeira, o que influencia diretamente na potência liberada dentro da caldeira, aumentando a temperatura da água. A tecnologia digital utilizada no FI303 possibilita uma interface fácil entre o campo e a sala de controle. A comunicação é feita por meio do protocolo de comunicação PROFIBUS PA (FI303 Conversor Profibus PA para correntes com três, SMAR). O fabricante do equipamento FI303 é a empresa Smar. Na figura 10 pode-se visualizar o equipamento.



Figura 10 - Conversor de Protocolo Profibus para 4-20mA - FI303 [6]

- Saída: Três saídas de corrente 4-20 mA, alimentação externa, terra comum.
- Corrente de Consumo: 12 mA
- Blocos Funcionais: 3 blocos de saída analógica(AO)
- Limite de Umidade: 0 a 100 % RH
- Certificação em Área Classificada: À prova de explosão, à prova de tempo e intrinsecamente seguro (normas CENELEC e FM).
- Limite de Umidade: 0 a 100 % RH (Humidade Relativa).
- Parametrização e calibração remota;
- Indicação digital alfanumérica;
- Ajuste local configurável.

3.2.3) Equipamentos auxiliares

- Chave estática

Este equipamento é um controlador de tensão. É empregado para ponderar a tensão eficaz aplicado sobre os resistores da caldeira, que fornecerá potência a água aquecendo-a.

- Válvula solenóide

Esta válvula é utilizada na liberação do vapor produzido pela caldeira.

- Válvula mecânica de alívio de pressão

Este dispositivo é um intertravamento mecânico. Ele garante que a pressão não atinja um valor perigoso.

- Relé de nível

Este dispositivo é similar a uma chave, pois em seu princípio de funcionamento, quando o nível chega ao seu valor máximo, o relé é ativado, evitando que o nível ultrapasse o valor máximo.

- Manômetro analógico

Este medidor é apenas para poder visualizar a pressão interna da caldeira.

- Indicador de temperatura analógico

Este medidor também é apenas um medidor para visualizar a temperatura da água na caldeira.

- Botão de parada de emergência

Em caso de emergência, é através desse botão que o processo é desligado.

- Polímero Lexan

É um material resistente, que garante a segurança de todos ao redor da caldeira, para o caso de algum acidente.

3.3) Procedimento de Controle

Uma malha de controle em automação industrial processa-se do seguinte modo: um CLP recebe sinais de entrada provenientes dos vários instrumentos de medida ou entradas digitais, executa operações matemáticas ou booleanas e gera os sinais que vão instruir atuadores acerca da alteração mais apropriada (BRANDÃO, 2009).

Existem inúmeras variáveis que podem entrar num CLP, como circuitos lógicos, chaves, sensores, circuitos e sinais de outros CLP's. Tudo isso, segundo Capelli (2006) é processado e o controlador emite sinais que podem ser discretos ou analógicos.

O CLP não dirige a sua “atenção” simultaneamente a todas as variáveis de entrada e a todos os órgãos de saída. Pelo contrário, vai varrê-las sucessivamente, em seqüência rápida. Porém a sua velocidade é tão grande que cada um dos órgãos de controle não notará as “distrações” muito curtas do computador e “pensará” que dispõem de toda a sua atenção.

As grandezas de interesse para a automação e supervisão da mini-caldeira elétrica tipo resistência são pressão, nível e temperatura.

A pressão é o produto a ser consumido e sua intensidade deve estar próximo a 3,0 bar. Para atingir esse valor, a pressão é controlada de forma indireta através do nível e da temperatura, para isso utiliza-se o controle por cascata nas malhas de temperatura e nível.

Segundo Brandão 2009, denomina-se controle cascata a ligação de dois controladores em série para se manter apenas uma variável controlada.

[...]O controle tipo cascata é uma das técnicas para melhorar a estabilidade de um sistema dinâmico de complexa sintonia. Sua utilização é conveniente quando a variável controlada não pode manter-se no valor desejado, por melhores que sejam os ajustes do controlador, devido a perturbações inerentes às condições do processo. Em outras palavras, o controle em cascata é implementado quando a malha de controle simples já não responde satisfatoriamente, principalmente em processos de grande inércia e quando o processo possui uma contínua perturbação na variável controlada.

Na figura 11, pode-se verificar o diagrama de blocos da malha de controle de nível por cascata:

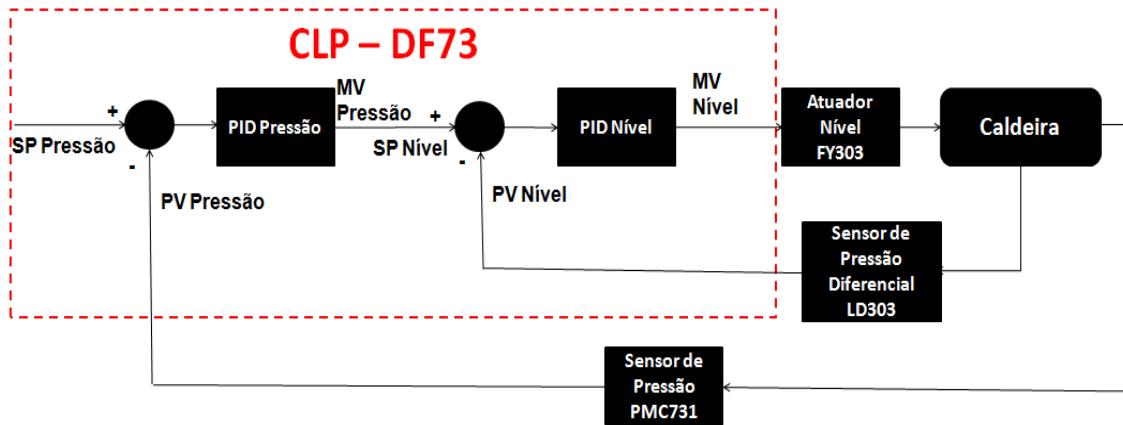


Figura 11 - Diagrama de Bloco da Malha de Controle de Nível por Cascata

Pode-se observar no diagrama que é definido um valor de SP (*Set Point*) para o PID de Pressão que é comparado com o valor do PV (*Primary Value*) de Pressão, obtido através do Transdutor de Pressão Absoluta PMC 731. Feito a comparação entre o PV e SP, o PID de Pressão emite um sinal de correção, MV (*Manipulated Variable*), que será o SP do PID de Nível. Ao receber este sinal o PID de Nível o compara com o PV proveniente do Transdutor de Pressão Diferencial LD303, que através da coluna d'água presente na mini-caldeira é capaz de indicar o nível. Após a comparação, o PID de Nível envia o sinal de correção MV para o atuador, ou seja, o Posicionador de Válvula FY303, abrindo ou fechando a válvula, regulando a entrada de água no vaso, controlando assim o nível, deixando-o em um valor adequado.

Na figura 12, pode-se ver o diagrama de blocos da malha de controle de temperatura por cascata:

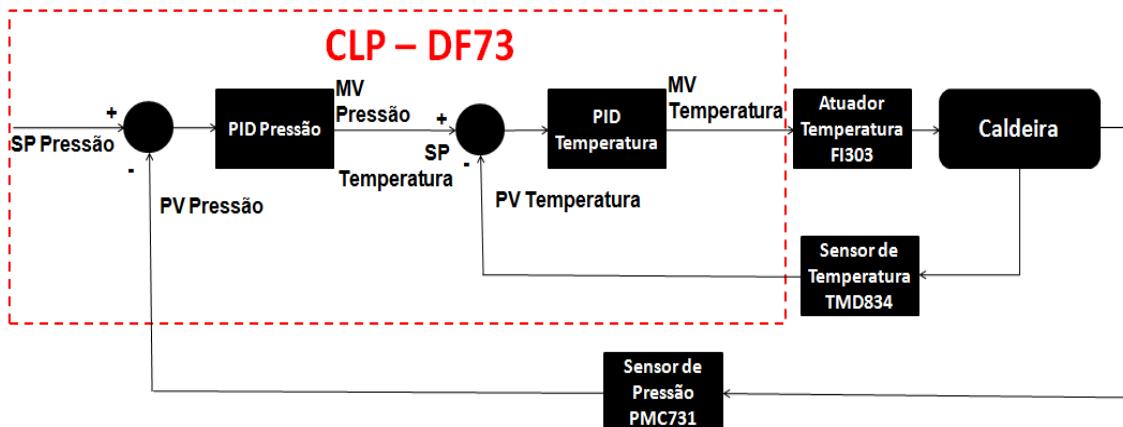


Figura 12 - Diagrama de Bloco da Malha de Controle de Temperatura por Cascata

Da mesma forma que a malha de controle de nível por cascata, na malha de controle de temperatura por cascata, é definido o mesmo valor de SP da malha de nível para o PID de Pressão da malha de temperatura, este valor é comparado com o valor do PV de Pressão, obtido através do Transdutor de Pressão Absoluta PMC 731. Feito a comparação entre o PV e SP, o PID de Pressão emite o sinal de correção MV, que será o SP do PID de Temperatura. Ao receber este sinal, o PID de Temperatura o compara com o PV proveniente do Transdutor de Temperatura TMD 834 que tem como função medir a temperatura interna da caldeira. Após a comparação, o PID de Temperatura envia o sinal de correção MV para o atuador, ou seja, o Transdutor Conversor de Protocolo Profibus para o Protocolo 4 – 20 mA, o FI 303. Por se tratar de uma mini-caldeira elétrica tipo resistência, na qual a temperatura tem que ser controlada indiretamente, através da chave estática, que aplica uma tensão sobre o resistor interno da caldeira. A saída do FI 303 controla o ângulo de disparo dos tiristores desta chave estática, ponderando a intensidade da tensão eficaz aplicada ao resistor, fornecendo potência e assim aquecendo e vaporizando a água.

Como mencionado anteriormente, o produto final é o vapor a pressão de 3,0 bar. Para consumir este vapor utiliza-se uma válvula solenóide que deve liberar o vapor a ser consumido em uma planta fictícia, a abertura da válvula é feita pelo operador.

Para aumentar ainda mais a segurança do sistema, foi desenvolvida uma lógica, na qual o limite superior e o limite inferior do nível são monitorados através de comparadores, que não permitem que o nível fique fora da faixa segura. O mesmo ocorre com a temperatura, o comparador não permite que a temperatura da mini-caldeira ultrapasse o valor de segurança. As comparações são feitas com os Transdutores LD303 e TMD834, respectivamente.

Conforme a Norma ANSI/ISA S5.1 à S5.5 (Instrument Society of America) tem-se o Fluxograma de Processo do sistema de automação da mini-caldeira elétrica, que pode ser visualizado na figura 13.

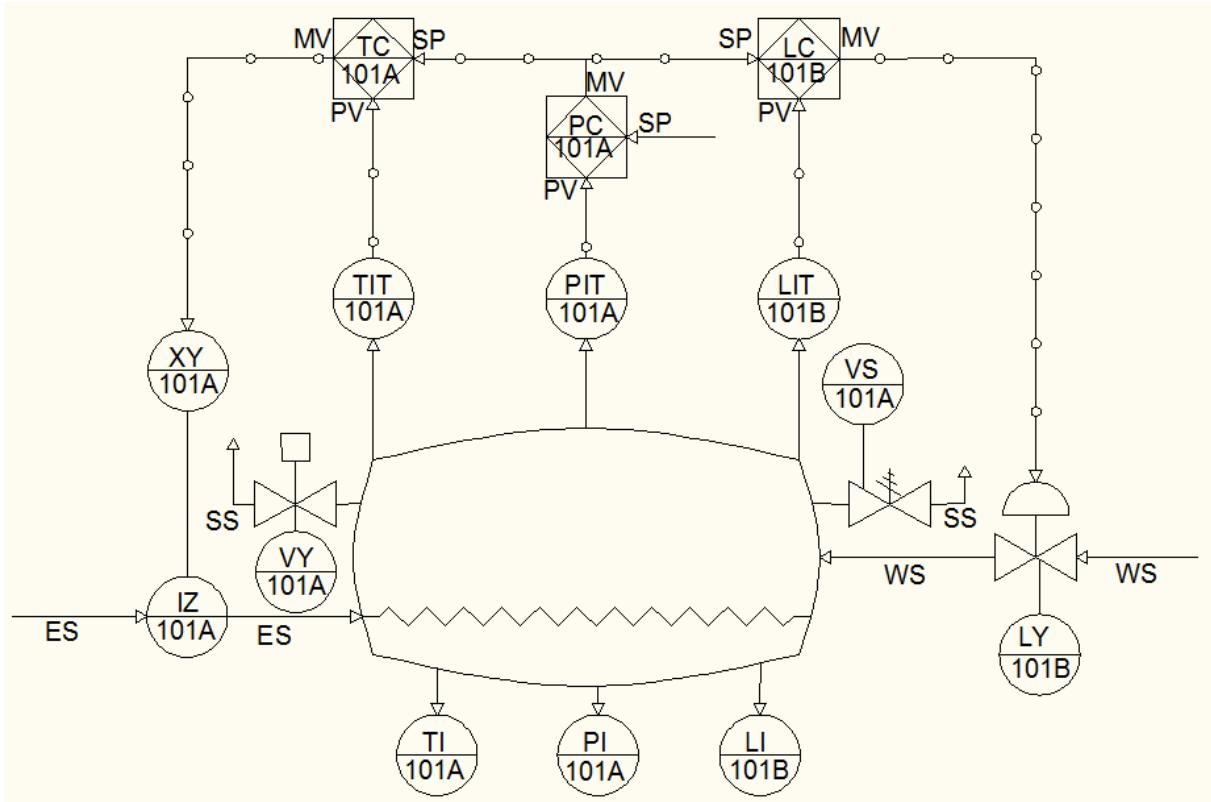


Figura 13 - Fluxograma de Processo para a Automação da Mini-Caldeira Elétrica

Os instrumentos caracterizados no diagrama elétrico são:

- **PC 101A, TC 101A, LC 101B** – CLP – DF73;
- **PIT 101A** – Transmissor de Pressão Absoluta – PMC 731;
- **LIT 101B** – Transmissor Medidor de Nível por Pressão Diferencial – LD303;
- **LY 101B** – Posicionador de Válvula – FY303;
- **TIT 101A** – Transmissor de Temperatura – TMD 834;
- **XY 101A** – Conversor de Protocolo Profibus para Protocolo 4-20mA, – FI303;
- **IZ 101A** – Chave estática (Controlador de Tensão);
- **PI 101A** – Indicador de Pressão;
- **TI 101A** – Indicador de Temperatura;
- **LI 101B** – Indicador de Nível;
- **VY 101A** – Válvula de Consumo do Vapor;
- **VS 101A** – Válvula de Segurança – Intertravamento Mecânico

É importante explicitar que as siglas ES, WS e SS significam suprimento elétrico, suprimento de água e suprimento de vapor, respectivamente.

Vale salientar que o Diagrama de Blocos e o Fluxograma de Processo devem estar em sintonia com relação às malhas de controle. Pode-se visualizar tal sintonia no Fluxograma de Processo, no qual o PIT 101A obtém o valor da pressão no vaso e informa o PC 101A, o qual compara com o SP pré-definido, gerando o MV que servirá de SP para o TC 101A e o LC 101B.

O TC 101A irá comparar o valor recebido do PC 101A com o valor de temperatura coletado pelo TIT 101A, determinando um MV que será enviado para TY101A, atuando na intensidade da corrente elétrica que flui pelo resistor da caldeira.

O mesmo ocorre com o LC 101B, ele compara o sinal recebido do PC 101A com o valor do nível lido pelo LIT 101B, provendo o MV que será enviado para o LY 101B, que regulará a entrada de água no vaso.

3.4) Programação do CLP

O órgão internacional International ElectroTechnical Comission (IEC) padronizou a programação dos CLPs na norma IEC 61131, o que inclui o *design de hardware*, instalação, teste, documentação, comunicação e programação.

Os principais benefícios trazidos pela norma, segundo Capelli (2006), são:

- Flexibilidade de programação com três modos gráficos e dois de textos estruturados. O programador pode escolher qual é a melhor linguagem segundo o processo, ou até mesmo utilizar várias linguagens em um mesmo processo mantendo a integração;
- Permite que o programa seja quebrado em elementos funcionais;
- Reduz erros, principalmente aos relacionados com a digitação;
- Sistemas seqüenciais podem ser programados passo a passo através do *Sequencial Function Chart* (SFC).

Basicamente são cinco tipos de linguagens de programação propostos pelo IEC 61131: texto estruturado, lista de instrução, diagrama de blocos, SFC e diagrama *Ladder*.

Neste trabalho, todo procedimento das malhas de controle visto anteriormente é feito através da linguagem de programação por Diagrama *Ladder*, que é uma linguagem similar a lógica de contatos, muito semelhante a comandos elétricos.

Para se poder programar, inicialmente, segundo Brandão (2009), deve-se definir as variáveis de entrada, saída e virtuais que serão utilizadas e indexar a elas um *tag*, alocando-as em uma posição da memória do CLP.

A linguagem *Ladder* pode ser representada como se fosse um circuito, no qual existe um barramento com tensão positiva e um barramento neutro ou negativo. Entre esses barramentos são inseridos contatos e bobinas, quando um contato é fechado, o fluxo de potência flui até a bobina acionando-a. A figura 14 ilustra essa situação:

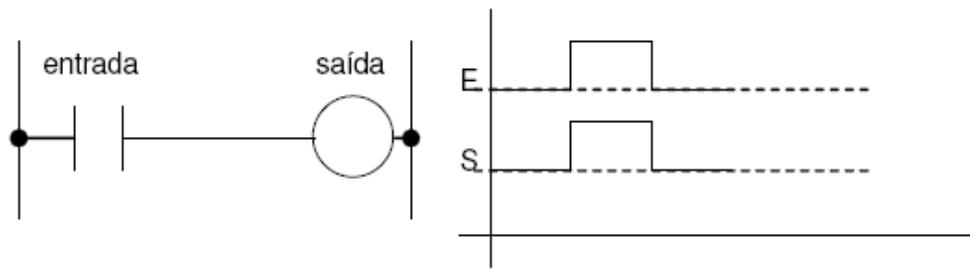


Figura 14 - Exemplificação do diagrama Ladder e o gráfico demonstrando o comportamento da entrada e saída [7]

Através de contatos (normalmente abertos, normalmente fechados, pulso, etc.) em série e/ou em paralelo e de bobinas em paralelo é realizada a lógica booleana de programação.

Entre as linhas de energização pode-se, adicionar blocos funcionais, que são utilizados para programação utilizando sinais analógicos, os blocos devem conter também entradas e saídas booleanas. As entradas podem ser associadas nas linhas do *Ladder* e as saídas podem comandar bobinas, como pode ser visto na figura 15:

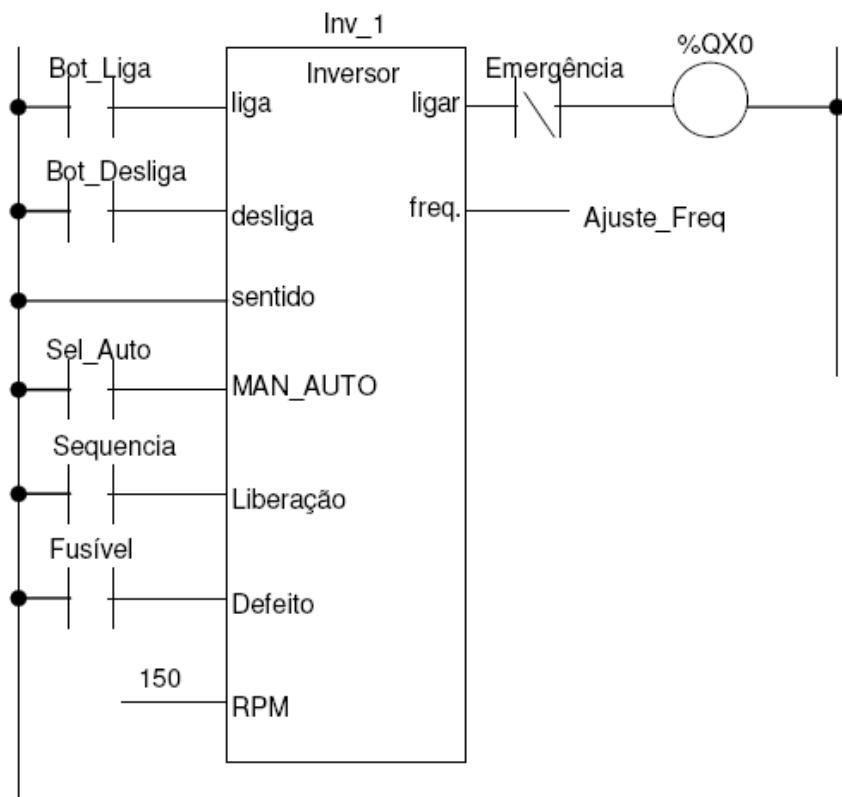


Figura 15 - Exemplo da utilização e ligação de um bloco funcional na programação em Ladder [7]

Entradas e saídas analógicas devem ser conectadas diretamente às entradas do bloco. Normalmente, os blocos têm entradas do tipo *enable* “EN” e saídas do tipo *enable output* “ENO”, que controlam se o bloco será ou não executado, em função da energização na entrada “EN”, que é copiada adequadamente para a saída “ENO” pelo algoritmo do bloco.

Na tabela 2 seguem as entradas e saídas utilizadas na programação e na tabela 3 os blocos funcionais necessários para o controle das malhas:

Tabela 2 - Lista de Variáveis Utilizadas no Diagrama Ladder

Tag	Address	Description
ENO	0000	VARIÁVEL AUXILIAR PARA BLOCOS FUNCIONAIS
ALARME_TEMP	0001	ALARME DE TEMPERATURA ALTA
A_M_TEMP	0002	AUTOMÁTICO / MANUAL PID TEMPERATURA
UP_TEMP	0003	INCREMENTO DE TEMPERATURA
DOWN_TEMP	0004	DECRESCIMENTO DE TEMPERATURA
A_M_NIVEL	0005	AUTOMÁTICO / MANUAL PID NÍVEL
UP_NIVEL	0006	INCREMENTO DE NÍVEL
DOWN_NIVEL	0007	DECRESCIMENTO DE NÍVEL
ALRM_NIVEL_ALTO	0008	ALARME NÍVEL ALTO
EMERGENCIA	0009	EMERGENCIA
TEMP_OK	0010	VALOR DE TEMPERATURA ALTA SEGURO
CONSUME_VAPOR	0011	CONSUMO DO VAPOR
ABRE_VALVULA	0012	ABRIR VALVULA PARA LIBERAR VAPOR
NIVEL_ALTO_OK	0013	VALOR DE NÍVEL ALTO SEGURO
TEMP_A_M_HUMANO	0014	AUXILIAR PARA MODO AUTO / MANUAL PID TEMPERATURA
S_R_ALRM_TEMP	0015	SET / RESET ALARME TEMPERATURA
DOWN_TEMP_HUMANO	0016	DECRESCIMENTO DE TEMPERATURA PELO OPERADOR
UP_TEMP_HUMANO	0017	INCREMENTO DE TEMPERATURA PELO OPERADOR
S_R_ALM_NVL_ALTO	0018	SET / RESET ALARME NÍVEL ALTO
DOWN_NIVEL_HUMAN	0019	DECRESCIMENTO DE NÍVEL PELO OPERADOR
UP_NIVEL_HUMAN	0020	INCREMENTO DE NÍVEL PELO OPERADOR
NIVEL_A_M_HUMANO	0021	AUXILIAR PARA MODO AUTO / MANUAL PID NÍVEL
ALRM_NIVEL_BAIXO	0022	ALARME PARA NÍVEL BAIXO
S_R_ALM_NVL_BAIX	0023	SET / RESET ALARME NÍVEL BAIXO
NIVEL_BAIXO_OK	0024	VALOR DE NÍVEL BAIXO SEGURO

Tabela 3 - Blocos Funcionais Utilizados no Diagrama Ladder

Tag
GTr_TEMPERATURA
LTr_1
PID_NIVEL
SMPL_NIVEL
GTr_NIVEL
LTr_NIVEL
LTr_3
GTr_3
PID_TEMPERATURA
SMPL_TEMP
PID_PRESSAO_T
PID_PRESSAO_N
SET_POINT_PRES

Nas figuras abaixo, retiradas do aplicativo Logic View do software System 302, encontra-se a programação por Diagrama *Ladder*, será explicado todo o diagrama.

Inicialmente, na figura 16, a válvula de consumo de vapor é acionado pelo operador, através da botão CONSUME_VAPOR ou EMERGÊNCIA.

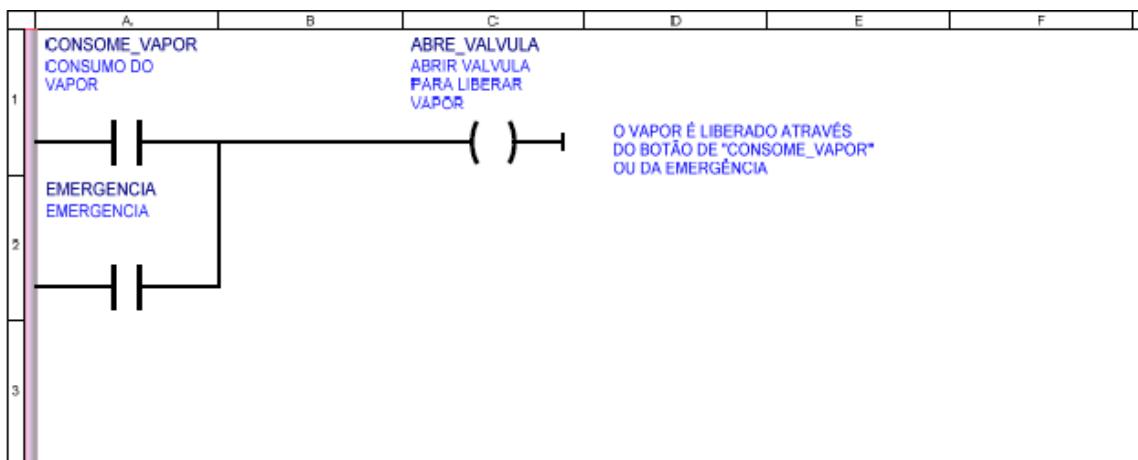


Figura 16 - Diagrama Ladder - Consumo do Vapor

Na figura 17, encontra-se o comparador GTr_TEMPERATURA, que aciona a saída ALARME_TEMP, caso a temperatura ultrapasse 150º C. Acionado o ALARME_TEMP, a bobina S_R_ALARM_TEMP é setada, fazendo com que a bobina A_M_TEMP seja acionada, passando o PID_TEMPERATURA para o modo manual, isso também pode ocorrer se o operador acionar o contato TEMP_A_M_HUMANO.

S_R_ALARM_TEMP também aciona a bobina DOWN_TEMP, o que pode ser feito pelo operador, acionando-se DOWN_TEMP_HUMANO. DOWN_TEMP irá forçar o PID_TEMPERATURA a abaixar a temperatura na caldeira. Além disso, se S_R_ALARM_TEMP não estiver setado, o operador pode ativar o contato UP_TEMP_HUMANO que acionará a bobina UP_TEMP, que forçará o PID_TEMPERATURA a elevar a temperatura na mini-caldeira.

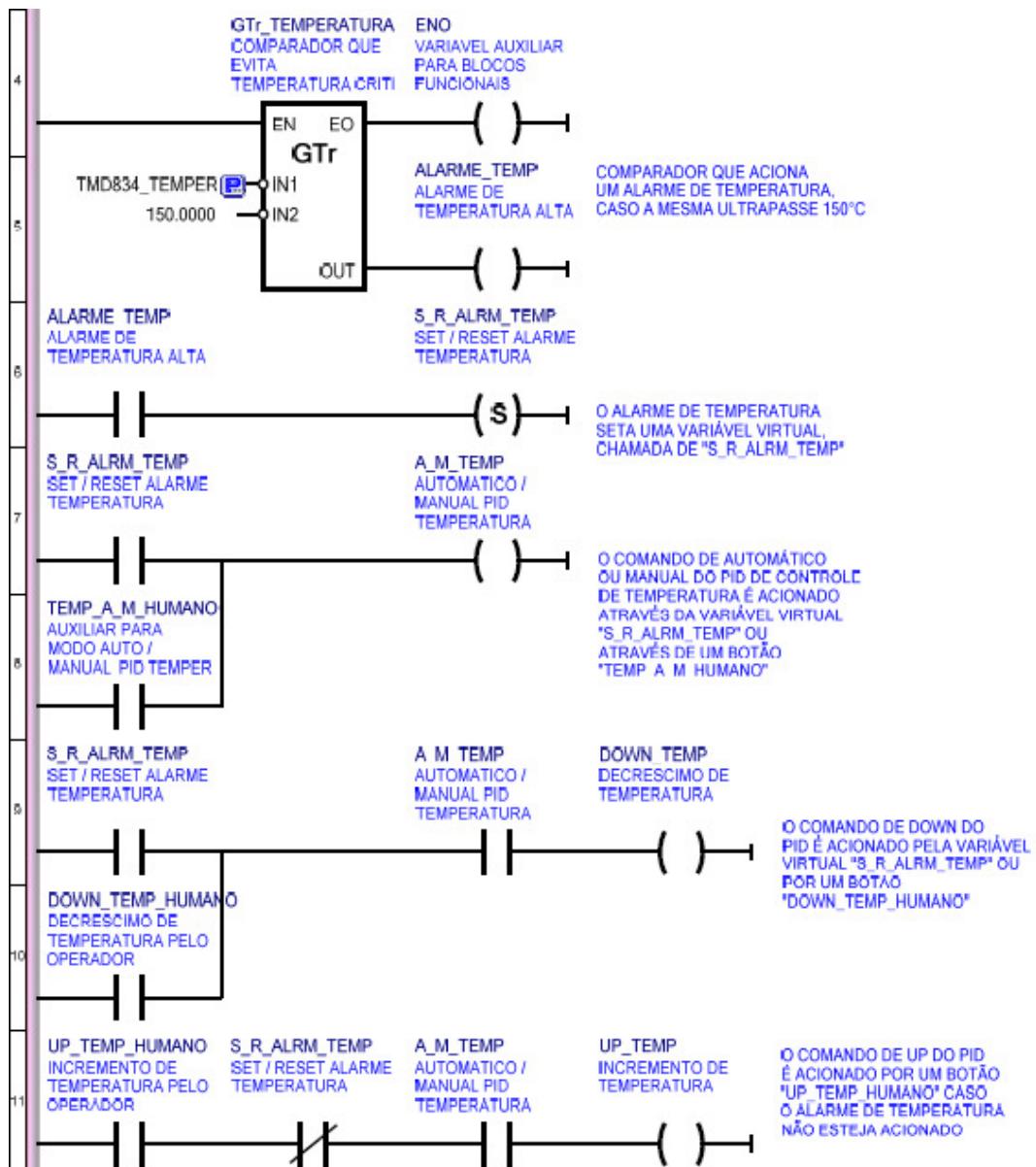


Figura 17 - Diagrama Ladder - Intertravamento para Temperatura Alta

Na figura 18, há o comparador que habilita a saída TEMP_OK caso a temperatura esteja abaixo de 130º C. TEMP_OK reseta a bobina S_R_ALARM_TEMP, fazendo com que o PID_TEMPERATURA retorne para o modo automático, isso se o contato TEMP_A_M_HUMANO não estiver habilitado.

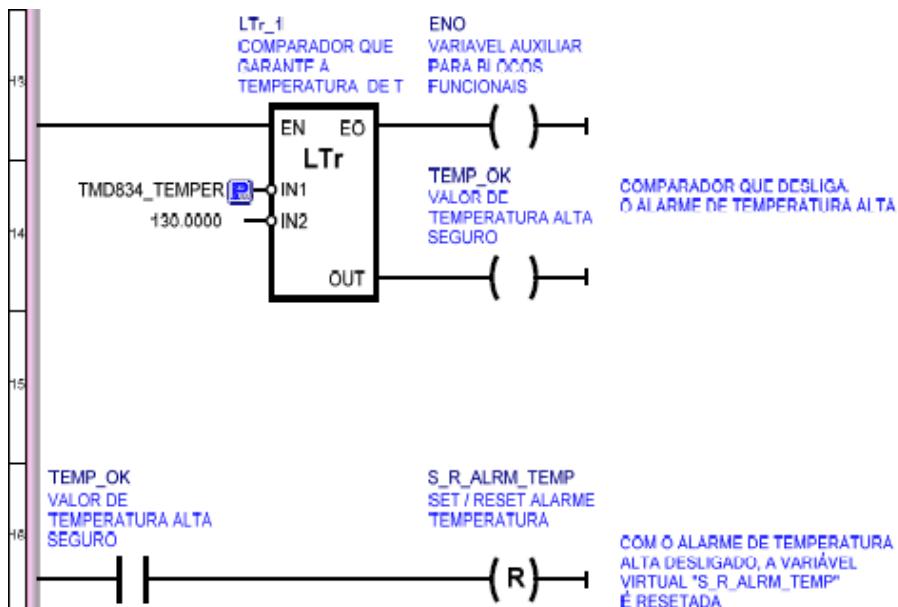


Figura 18 - Diagrama Ladder - Confirmação de Temperatura Segura

Na figura 19, existe um multiplicador, que tem apenas a finalidade de fornecer uma saída comum para os PID_PRESSÃO_T e PID_PRESSÃO_N, que devem ser idênticos, por representarem o PID de pressão, que é comum as malhas de temperatura e nível. Vale salientar, que é na entrada IN1 desse multiplicador, que se define o *Set Point* de pressão.

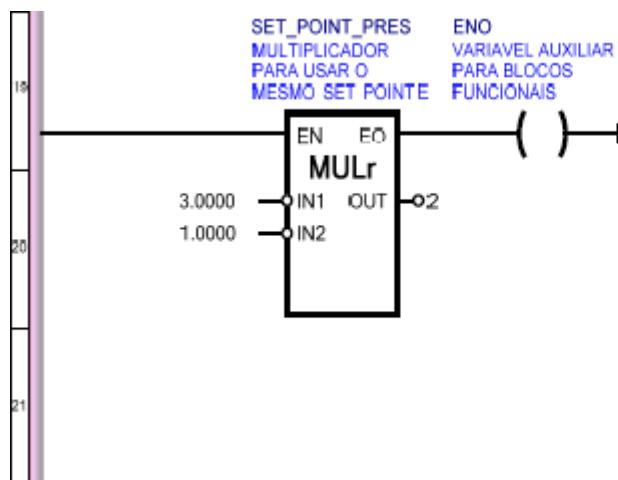


Figura 19 - Diagrama Ladder - Unificação do Set Point de Pressão

Na figura 20, encontra-se a malha de controle de temperatura por cascata. Nela se encontram os blocos funcionais PID_PRESSAO_T, PID_TEMPERATURA e SMPL_TEMP.

No PID_PRESSAO_T o SP é a saída do bloco multiplicador referido anteriormente, o PV é o valor da saída do PMC 731. No PID_TEMPERATURA o SP é a saída do PID_PRESSAO_T, o PV é a saída do TMD834. No bloco SMPL_TEMP é definido se a malha está em automático ou manual. Caso esteja no modo manual é pelo UP_TEMP e DOWN_TEMP que se controla o aumento ou a diminuição da temperatura.

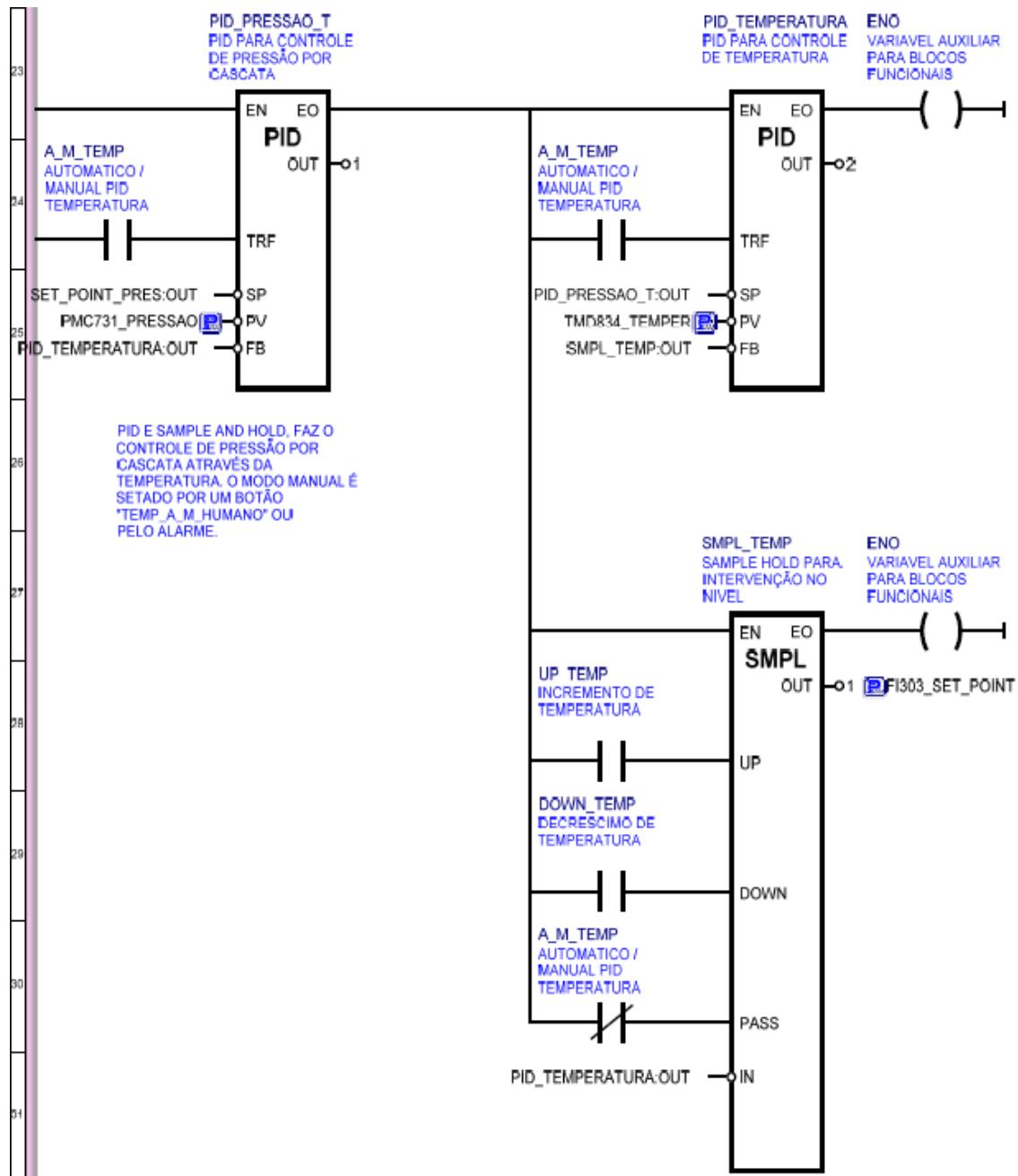


Figura 20 - Diagrama Ladder - Controle Cascata para Temperatura

Na figura 21, encontra-se o comparador GTr_NIVEL, que aciona a saída ALRM_NIVEL_ALTO, caso o nível ultrapasse 90% da capacidade. Acionado o ALRM_NIVEL_ALTO, a bobina S_R_ALM_NVL_ALTO é setada, fazendo com que a bobina A_M_NIVEL seja acionada, fazendo com que o PID_NIVEL passe para o modo manual, isso também pode ocorrer se o operador acionar o contato NIVEL_A_M_HUMANO, ou ainda caso o comparador LTr_3 acionar a bobina ALRM_NIVEL_BAIXO, o que ocorre quando o nível está abaixo de 15%.

S_R_ALM_NVL_ALTO também aciona a bobina DOWN_NIVEL, o que pode ser feito pelo operador acionando DOWN_NIVEL_HUMAN, DOWN_NIVEL é desabilitado caso S_R_ALM_NVL_BAIX seja acionado, esta variável será tratada logo adiante. DOWN_NIVEL irá forçar o PID_NIVEL a abaixar o nível na caldeira.

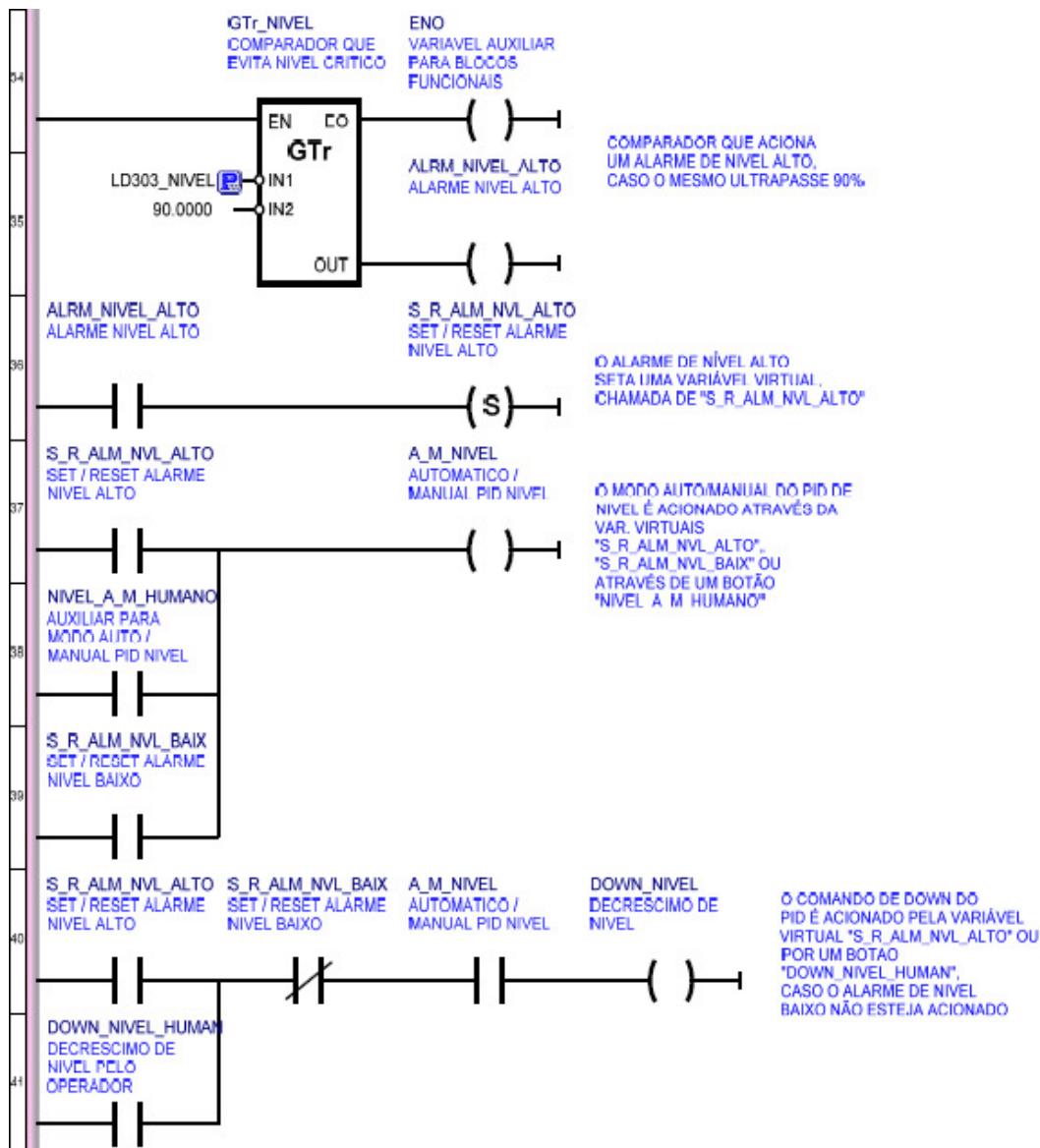


Figura 21 - Diagrama Ladder - Intertravamento para Nível Alto

Na figura 22, há o comparador que habilita a saída NIVEL_ALTO_OK caso o nível esteja abaixo de 80%. NIVEL_ALTO_OK reseta a bobina S_R_ALM_NVL_ALTO, fazendo com que o PID_NIVEL retorne para o modo automático, isso se o contato NIVEL_A_M_HUMAN não estiver habilitado.

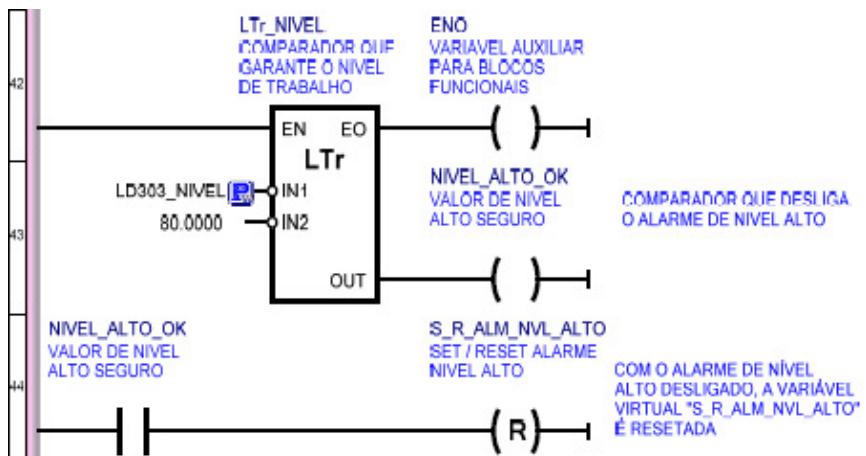


Figura 22 - Diagrama Ladder - Confirmação de Nível Seguro

Na figura 23, apresenta-se o comparador LTr_3 que aciona a saída ALRM_NIVEL_BAIXO, caso o nível fique abaixo de 15% da capacidade.

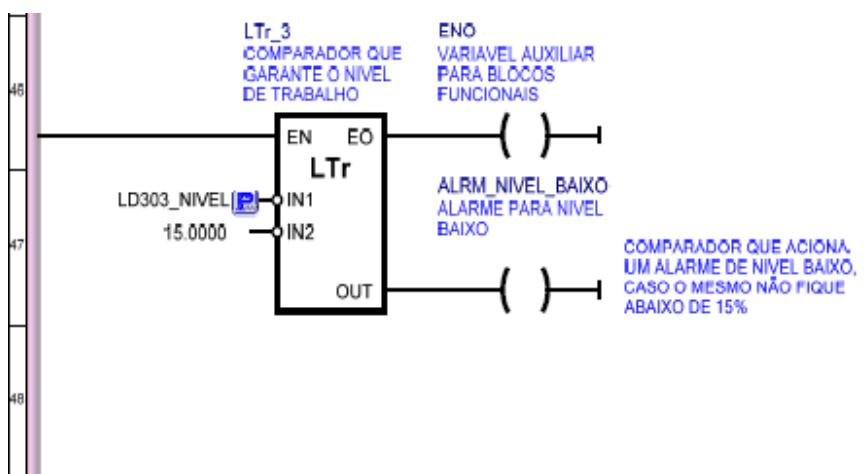


Figura 23 - Diagrama Ladder - Alarme de Nível Baixo

Na figura 24, a lógica acontece da seguinte forma, acionando-se o ALRM_NIVEL_BAIXO seta-se a bobina S_R_ALM_NVL_BAIX, fazendo com que a bobina A_M_NIVEL seja acionada, fazendo com que o PID_NIVEL passe para o modo manual, como citado anteriormente, e também se aciona UP_NIVEL, fazendo isso o PID_NIVEL irá forçar o nível da caldeira a aumentar. Além disso, se S_R_ALM_NVL_ALTO não estiver setado, o operador pode ativar o contato UP_NIVEL_HUMAN que acionará a bobina UP_NIVEL, que forçará o PID_NIVEL a elevar o nível na mini-caldeira.

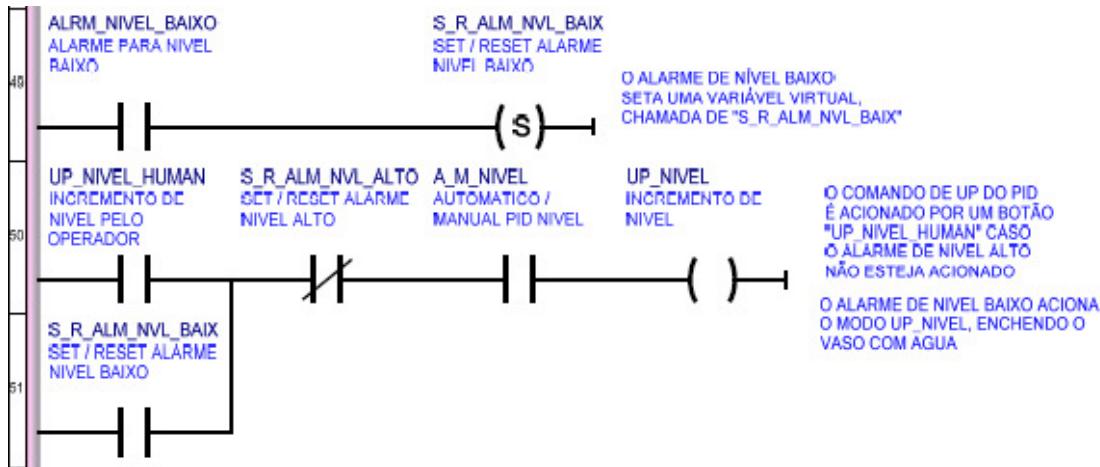


Figura 24 - Diagrama Ladder - Intertravamento para Nível Baixo

Na figura 25, o comparador GTr_3 aciona a bobina NIVEL_BAIXO_OK caso o nível se eleve acima de 25% da capacidade, resetando a bobina S_R_ALM_NVL_BAIX fazendo o PID_NIVEL retornar para o modo automático.

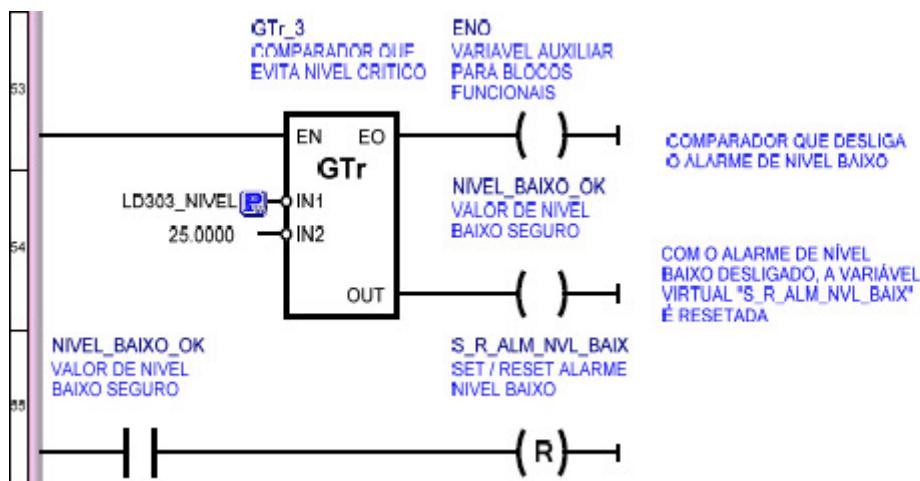


Figura 25 - Diagrama Ladder - Confirmação de Nível Seguro

Na figura 26, encontra-se a malha de controle de nível por cascata. Nela se encontram os blocos funcionais PID_PRESSAO_N, PID_NIVEL e SMPL_NIVEL.

No PID_PRESSAO_N o SP é a saída do bloco multiplicador referido anteriormente, o PV é o valor da saída do PMC 731. No PID_NIVEL o SP é a saída do PID_PRESSAO_N, o PV é a saída do LD303. No bloco SMPL_NIVEL é definido se a malha está em automático ou manual. Caso esteja no modo manual é pelo UP_NIVEL e DOWN_NIVEL que se controla o aumento ou a diminuição do nível.

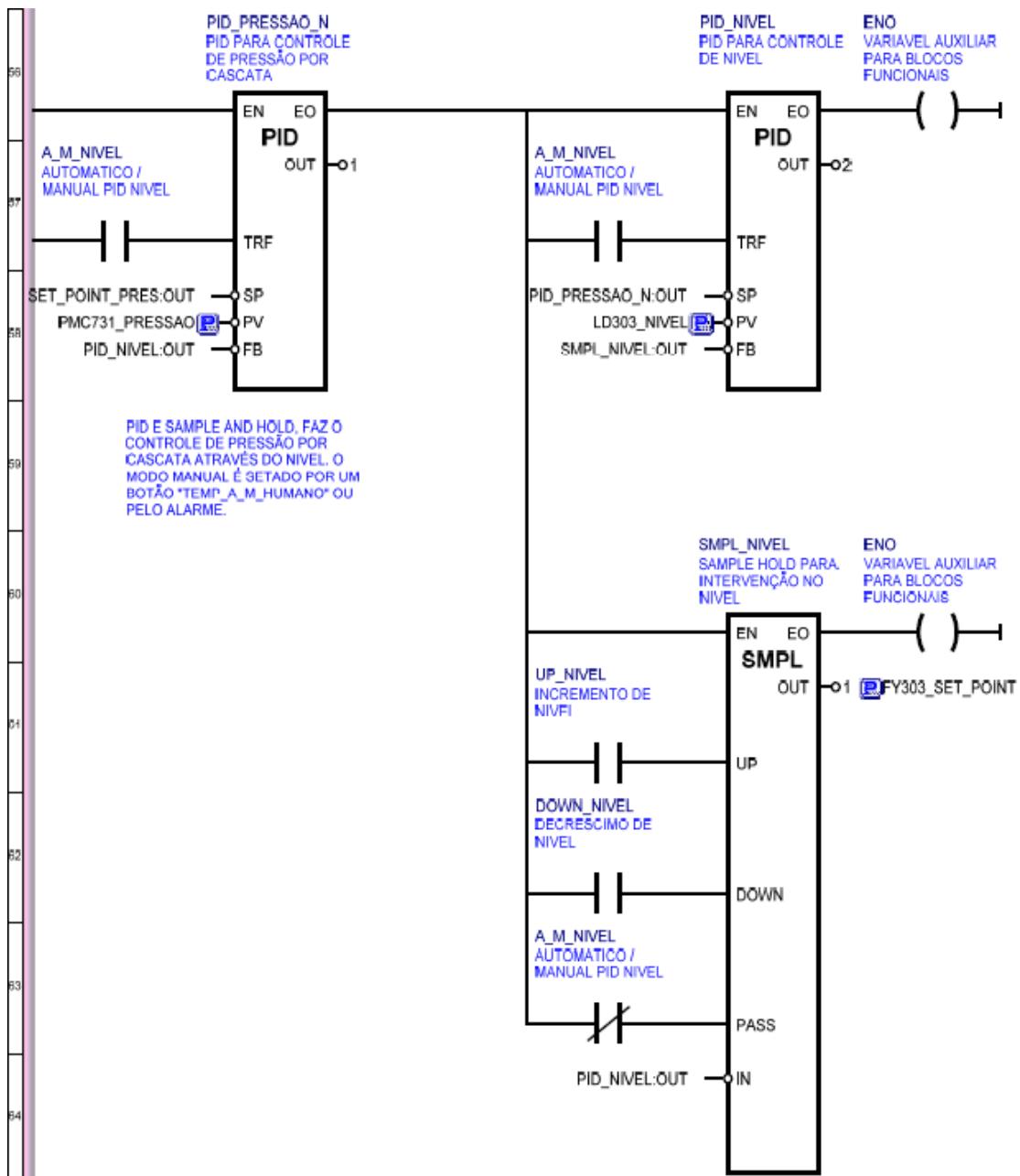


Figura 26 - Diagrama Ladder - Controle Cascata para Temperatura

3.5) Sistema de Supervisão

O Sistema Supervisório tem como objetivo a comunicação, ou seja, a monitoração e a intervenção humana do processo que ocorre na mini-caldeira elétrica. Para realizar a supervisão foi utilizado o *software Indusoft Web Studio*, o qual utiliza o sistema SCADA para supervisionar a mini-caldeira.

Para Albuquerque e Alexandria,

[...] O sistema SCADA é um sistema responsável pela coleta e transferência de informações lógicas e analógicas sobre o estado corrente do sistema, pela exibição desses dados na sala de controle e pelo comando remoto de dispositivos. [...]

O termo controle supervisório denota o processo de monitorar à distância uma atividade, transmitindo diretrizes e operação aos controladores localizados à distância e recebendo de volta a indicação da realização das ações de controle.

O sistema SCADA desenvolvido apresenta cinco escravos, três coletando dados da mini-caldeira e enviando estes dados até o mestre e outros dois escravos atuando sobre o sistema, todos se comunicando através do Protocolo de Comunicação PROFIBUS PA. Na estação mestre são visualizados os dados, permitindo o operador executar tarefas de controle remotamente (ALBUQUERQUE;ALEXANDRIA).

Na tela de supervisão, quando o controle de temperatura e/ou nível está definido como **AUTOMÁTICO**, o operador só pode definir a pressão desejada na saída e os parâmetros (K_P , T_d e T_i) dos PID's de nível, temperatura e pressão. Assim sendo, a lógica de controle promoverá todos os cálculos e ações para que a pressão esteja sempre na intensidade desejada. Quando o controle de nível ou temperatura está definido como **MANUAL**, o operador pode aumentar ou diminuir a variável desejada, respeitando certos limites.

A tela do supervisório é mostrada logo abaixo na figura 27, observando que os PID's estão com os parâmetros zerados e no modo automático:

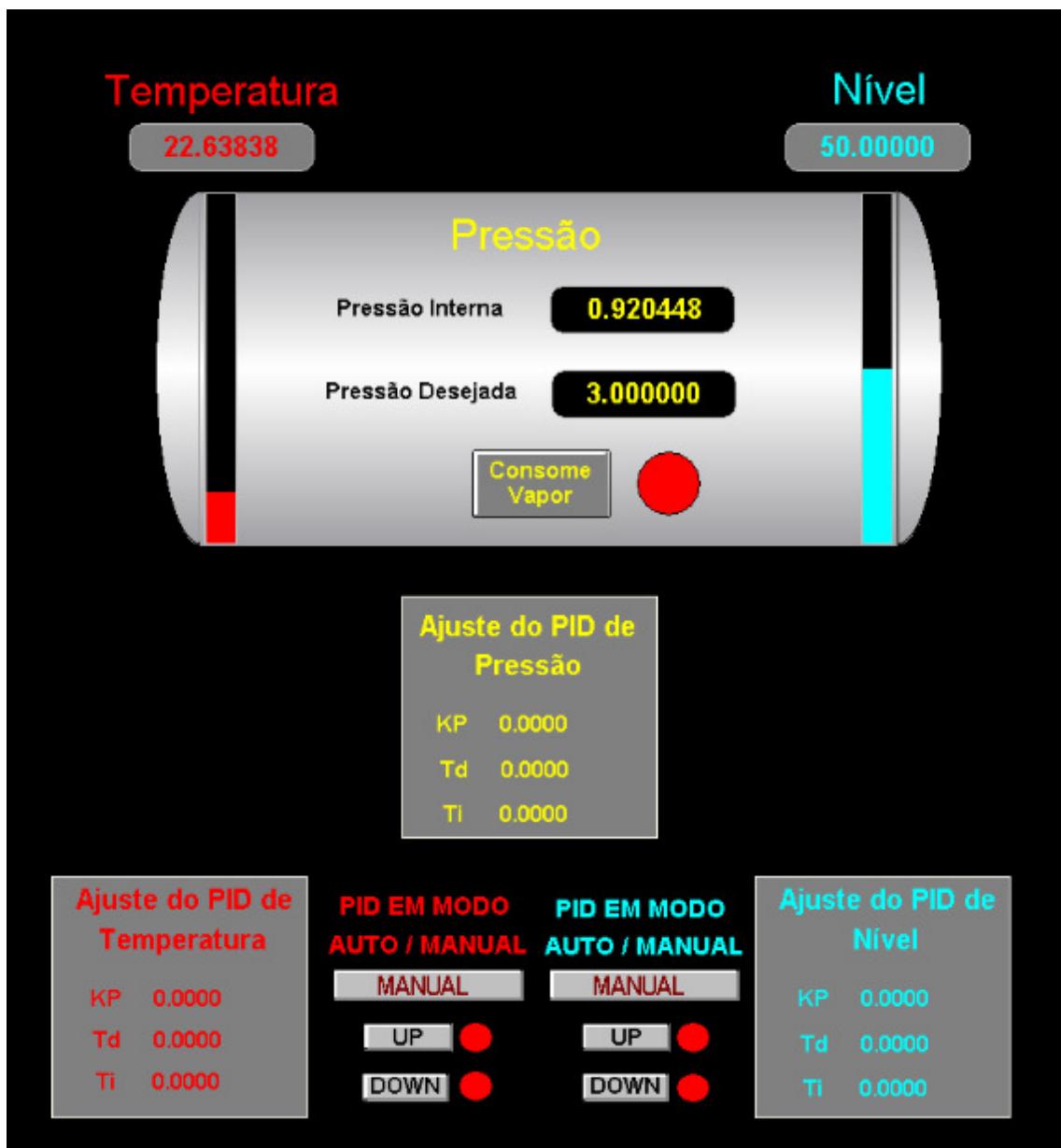


Figura 27 - Tela do Sistema Supervisório

O botão “Consumo Vapor” é usado para abrir a válvula solenóide que libera o vapor. Os botões “MANUAL/AUTOMÁTICO” são utilizados para definir o modo de operação de cada PID. Os botões “UP” e “DOWN” são utilizados para aumentar ou diminuir a grandeza de interesse, quando o PID da mesma está definido para o modo **MANUAL**.

Os ajustes dos parâmetros do PID são definidos nos quadros cinza, para isto basta clicar sobre o valor do parâmetro, alterar para o valor desejado e confirmar. O mesmo procedimento deve ser feito quando se deseja mudar o valor da “*Pressão Desejada*”.

Os valores mostrados em “*Pressão Interna*”, “*Nível*” e “*Temperatura*” são os valores reais lidos instantaneamente pelos transdutores, sendo que para Temperatura e Nível existe um gráfico para cada grandeza, que é um recurso visual, proporcional ao máximo e mínimo de cada grandeza.

Nas figuras abaixo, ilustra-se várias configurações da tela do supervisório.

Inicialmente, na figura 28 foram alterados os valores dos parâmetros dos PID's, mantendo os PID's no modo Automático e sem consumir o vapor.

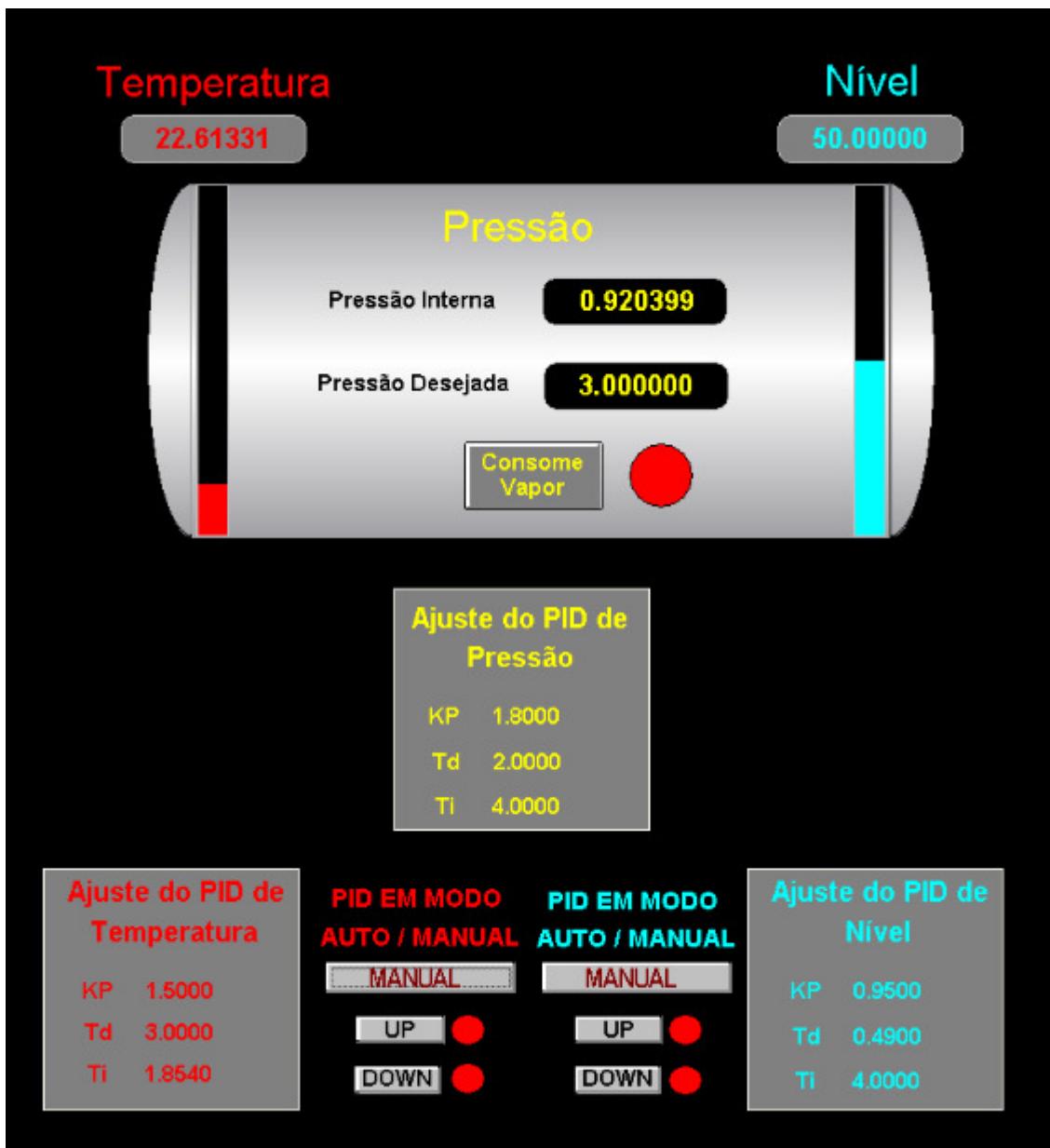


Figura 28 - Tela do Sistema Supervisório - Configuração dos Parâmetros do PID's

Na figura 29, os parâmetros dos PID's foram alterados novamente e passou-se o PID de temperatura para o modo Manual.

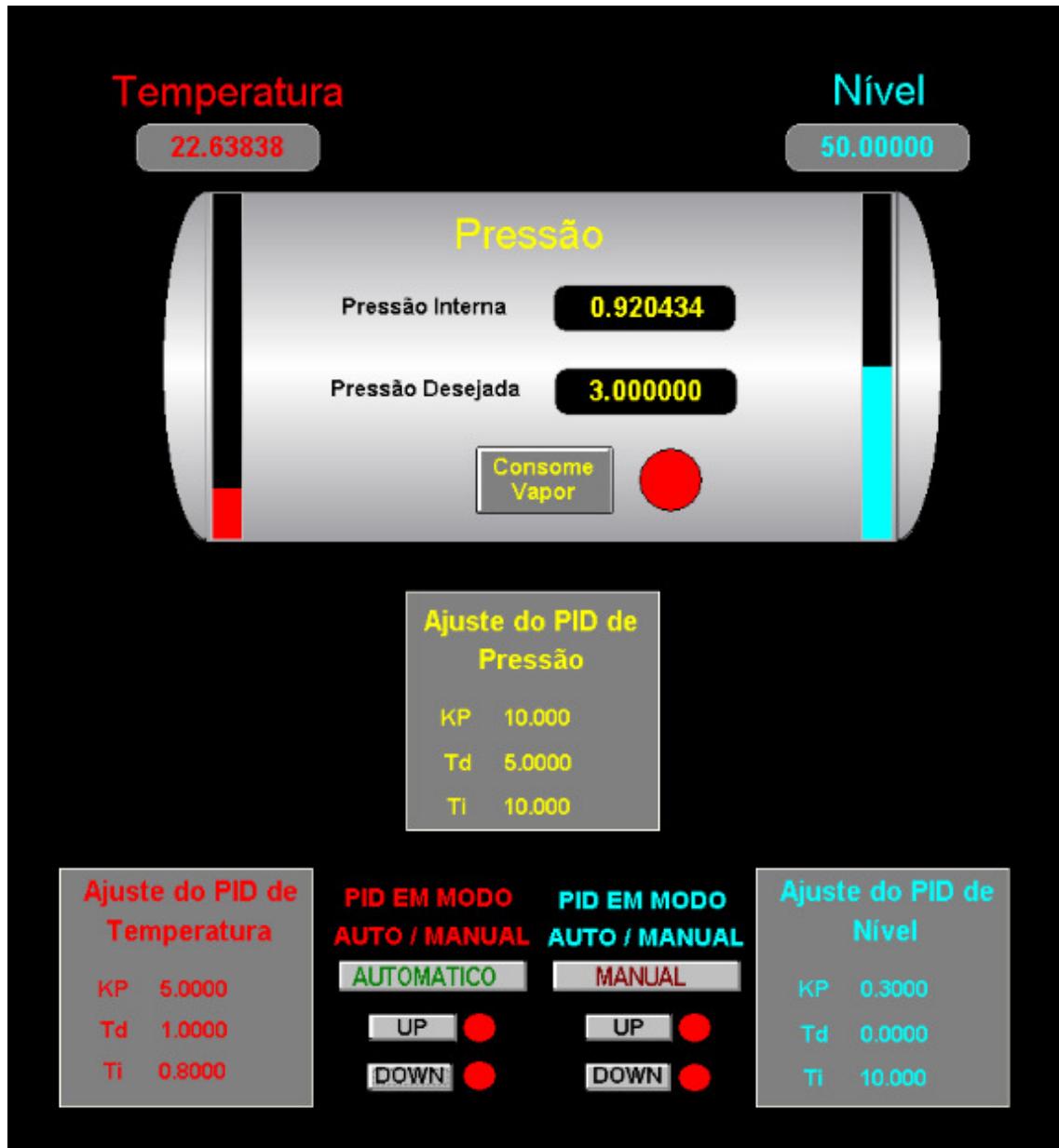


Figura 29 - Tela do Sistema Supervisório - Configuração dos Parâmetros do PID's e PID Temperatura Modo Automático

Na figura 30, os parâmetros dos PID's foram alterados mais uma vez, mantendo o PID de temperatura no modo Manual solicitando o aumento de temperatura, também passando o PID de nível para o modo Manual solicitando o decréscimo no nível e, finalmente, consumindo o vapor.

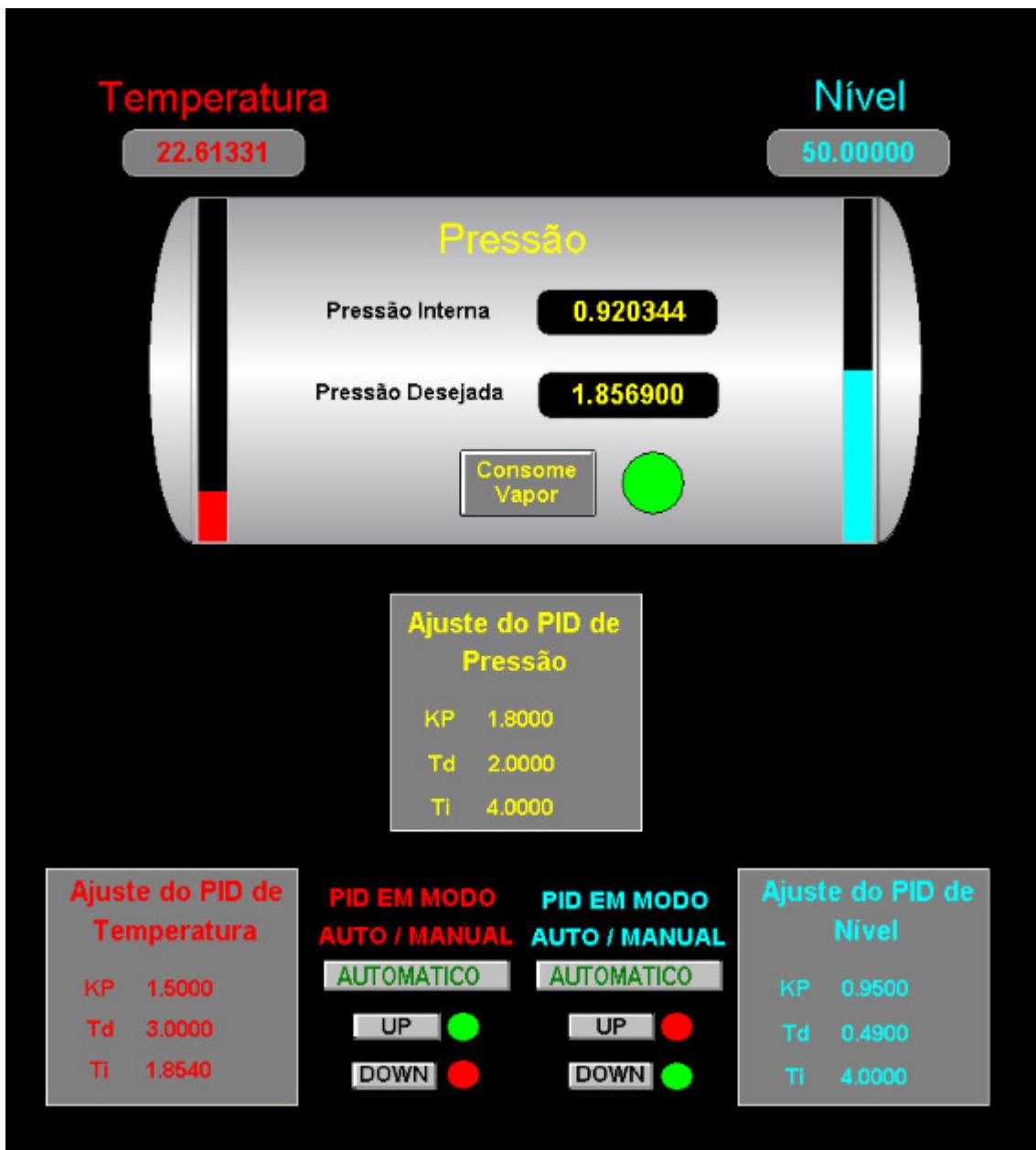


Figura 30 - Tela do Sistema Supervisório - Configuração dos Parâmetros do PID's, PID's no Modo Automático, Atuação nas Grandezas e Consumo de Vapor

4. Conclusão

Este trabalho tem como importância introduzir o aprendizado do controle de processos automáticos aplicado à tecnologia Profibus. Além disso, a simulação de uma planta em menor escala é muito importante, pois se pode entender a complexidade e a responsabilidade que são necessárias em projetos industriais.

Para implementar um projeto de controle de uma caldeira ou qualquer outra aplicação, é necessário uma série de estudos iniciais sobre o controle a ser aplicado. Para isso foi necessário a confecção de um fluxograma de processo, o que foi possível graças aos diagramas de bloco das malhas de controle.

Através disto, para realizar a automação e a supervisão da mini-caldeira elétrica, fez-se a escolha e calibração adequada dos dispositivos de medição e controle para a caldeira, criou-se uma lógica baseada na teoria de controle em cascata por PID's, além do desenvolvimento de uma tela de supervisório para o monitoramento e intervenção no processo.

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 seja realizado qualquer procedimento, 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. Além do intertravamento através da lógica de programação e do intertravamento mecânico, foi necessário a montagem de um revestimento da caldeira com um material que pudesse resistir choques mecânicos, pressões elevadas e alta temperatura.

5. Referências Bibliográfica

- ALBUQUERQUE, P. U. B., ALEXANDRIA, A. R., **Redes industriais: aplicações em sistemas digitais de controle distribuído.** São Paulo: Ensino Profissional, 2009.
- ALTAFINI, C. R., **Disciplina de máquinas térmicas** In: Universidade de Caxias do Sul. Apostila sobre caldeiras. Caxias do Sul, 2002.
- BRANDÃO, D. **Notas de aula.** Escola de Engenharia de São Carlos –USP, Departamento de Engenharia Elétrica - SEL 0406 – Automação, 2009.
- CAMPOS, M. C. M. M., Herbert C. G. T., **Controles típicos de equipamentos e processos industriais** -- São Paulo: Editora Blucher, 2006.
- CAPELLI, A., **Automação Industrial, controle do movimento e processos contínuos.** São Paulo: Ensino Profissional, 2009.
- Cerabar Profibus PA S Pressure Transmitter Operating Instructions.** Endress+Hauser. Arquivo PDF.
- EUROGAM. **Automação Industrial.** Disponível em <<http://www.eurogam.com.br/>>.
- FRANCHI, C. M., Camargo, V. L. A., **Controladores Lógicos Programáveis.** São Paulo: Ética, 2008.
- INDUSOFT Web Studio. **User's Guide and Technical Reference Manual.** Arquivo em PDF.
- MENDES, R. Santos. **Engenharia de automação industrial. Sba Controle & Automação**, vol.13, n.1, 2002, p.84-85.
- MORAES, C.C.; CASTRUCCI, P.L. **Engenharia de Automação Industrial.** São Paulo, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001.
- PIRES, J.N., **Automação Industrial.** Disponível em:
<<http://robotics.dem.uc.pt/norberto/ai/prefacio.htm>>
- SANTOS, J.J.H. **Automação Industrial: uma introdução.** Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979.
- SMAR, **DFI302 Fieldbus Universal Bridge-** Manual do Usuário. Smar equipamentos industriais. 2010.
- SMAR, **DFI302 - Plataforma de Controle e Automação de Processos.** Smar equipamentos industriais. Disponível em
<<http://www.smar.com/brasil2/products/df73.asp>>
- [6]SMAR, **FI303 Conversor Profibus PA para correntes com três** - Manual do Usuário- operação e manutenção, Smar equipamentos industriais. Arquivo PDF 2010.

[5]SMAR, FY303 - Posicionador de Válvulas Profibus PA. Smar equipamentos industriais. Disponível em <<http://www.smar.com/brasil2/products/fy303.asp>>

SMAR, FY303 Posicionador de válvulas Profibus PA- Manual do Usuário- operação e manutenção. Smar equipamentos industriais. Arquivo PDF, 2006.

[3]SMAR, LD303 Transmissor de Pressão Profibus PA- Manual do Usuário- operação e manutenção. Smar equipamentos industriais. Arquivo PDF, 2005.

SMAR, System 302, automação empresarial. Smar equipamentos industriais. Arquivo PDF, 2008.

TECHPLUS. Soluções em automação. Disponível em:

<[http://www.techplus.com.br/.>](http://www.techplus.com.br/.)

TEIXEIRA, H. C. G., Controles típicos de equipamentos e processos industriais. Edgard Blucher, 2006.

[4]Temperature transmitter, TMD 834 Betriebsanleitung- Operating instructions. Endress+Hauser. Arquivo PDF,

WIKIPEDIA. Automação Industrial. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Automa%C3%A7%C3%A3o_industrial/>