



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

MÁRIO GONÇALVES DE MELO JÚNIOR

**CONTROLES DE NÍVEL E TEMPERATURA DE ALUMÍNIO LÍQUIDO
PARA TRANSFORMAÇÃO EM PÓ DE ALUMÍNIO**

ARAXÁ/MG

JUL/2016

MÁRIO GONÇALVES DE MELO JÚNIOR

**CONTROLES DE NÍVEL E TEMPERATURA DE ALUMÍNIO LÍQUIDO
PARA TRANSFORMAÇÃO EM PÓ DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira

ARAXÁ/MG

JUL/2016



Serviço Público Federal
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL/ ARAXÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC – ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL do aluno *Mário Gonçalves Melo Júnior*

Às 18h do dia 08 de julho de 2016, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Controle de Nível e Temperatura de Alumínio Líquido para Transformação em Pó de Alumínio** como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, o candidato foi considerado: Aprovado Com nota final de: 93 / 100.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno abaixo-assinado declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não estar a violar direitos de terceiros.

Mário Gonçalves Melo Júnior
Nome do aluno

Mário G. A. Melo Jr.
Assinatura

Araxá, 08 de julho de 2016.
local e data

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 08 de Julho de 2016.

Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira (Orientador)

Leandro Resende Mattioli
Prof. Me. Leandro Resende Mattioli

Prof. Dr. Natal Junio Pires

DEDICO ESTE TRABALHO

*Aos meus pais, que desde o começo do curso não mediram esforços em me apoiar.
À minha família, que sempre esteve a meu lado, em momentos difíceis, me dando apoio.
À minha namorada, que me auxiliou em todos os momentos e sempre me incentivou.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por capacitar-me e dar-me saúde, paciência e perseverança para enfrentar todas as adversidades.

Agradeço à minha família por apoiar-me nos momentos de dificuldades, por ouvir diversas vezes minhas reclamações, pelos conselhos e por fortalecer-me.

Agradeço à minha namorada por entender esse momento e me apoiar quando não tive tempo para ela, quando tive que estudar nos finais de semana e desmarcar compromissos.

Agradeço a todos que me apoiaram nesse trabalho, meu orientador, professores e amigos que, de alguma forma, contribuíram para esse trabalho.

RESUMO

Em uma fábrica que processa o alumínio sólido, fundindo e posteriormente transformando em pó de alumínio, localizada na cidade de Araxá-MG, existe a possibilidade de implantação de equipamentos de controle de nível e de temperatura no cadinho (recipiente em que o alumínio líquido, que vem do forno, é colocado e vazado para sair em forma de filete). Em vista dessa possibilidade, com este trabalho, intenta-se simular o controle de nível e de temperatura desse processo, que transforma alumínio líquido em pó de alumínio, utilizando Controladores Lógico Programáveis ou Microcontrolador. Esse interesse se deve ao fato de que, mantendo-se o nível e a temperatura constantes, a variação da pressão no cadinho será menor e o filete de alumínio mais uniforme. Logo, esse controle gera um ganho na qualidade da granulometria final do produto. Com a realização da simulação utilizando *softwares* para controle de nível e de temperatura, pode-se conferir a proposta, a qual, posteriormente, será implantada quente, possibilitando o controle final de nível e de temperatura.

Palavras-chave: Controle de nível. Controle de temperatura. Controle de pressão. Alumínio líquido. Granulometria. Simulação.

ABSTRACT

In an aluminum annealing factory located in Araxá, Minas Gerais, Brazil which processes solid aluminum and melted aluminum, and which subsequently transforms those forms of aluminum into aluminum powder, there is a possibility of implementation of a level control and temperature control equipment in a crucible (the container in which the liquid aluminum comes from the oven and is placed and poured out in a form of a fillet). In view of this possible implementation, this project attempts to simulate the level control and temperature control of this process, which turns liquid aluminum into aluminum powder, using Programmable Logic Controller or Microcontroller. The interest in this method is due to the fact that by keeping the level and temperature constant, the pressure variation in the crucible will be smaller, and the aluminum fillet will be more uniform, which allows this control to generate a gain in the quality of the granulometry in the final product. Running simulations using software to control level and temperature, it is possible to check the main proposal of this method of control implementation, which will be implemented later, allowing the final control of level and temperature derived from the simulations.

Keywords: Level control. Temperature control. Pressure Control. Liquid aluminum. Granulometry. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cadinho e forno de espera.....	16
Figura 2: Microcontrolador da família PIC.....	17
Figura 3: Controlador Lógico Programável.....	18
Figura 4: Desenho esquemático do Cadinho/Distribuidor.....	23
Figura 5: Croqui do forno de espera em vista frontal.....	25
Figura 6: Croqui do forno de espera em vista lateral.....	26
Figura 7: Malha do controle de temperatura.....	29
Figura 8: Malha do controle de nível.....	30
Figura 9: Malha do controle de pressão.....	31
Figura 10: Diagrama em Blocos das Malhas Fechada/Cascata.....	33
Figura 11: Circuito controlador de nível no cadinho.....	34
Figura 12: Válvula manual do pistão acionada.....	35
Figura 13: Posição final do pistão com acionamento manual.....	36
Figura 14: Ação do pistão quando a válvula automática é acionada pelo controlador.	37
Figura 15: Posição final do pistão.....	38
Figura 16: Circuito controlador de temperatura.....	39
Figura 17: Atuação do controlador na válvula automática.....	40
Figura 18: Circuito controlador de pressão.....	41
Figura 19: Circuito controlador de pressão.....	42
Figura 20: Sem pressão no bico pulverizador devido à posição da válvula.....	42
Figura 21: Pressão maior no bico.....	43
Figura 22: Tela inicial do RSLogix Emulate 5000.....	44
Figura 23: Tela inicial do RSLogix Emulate 5000.....	44
Figura 24: Tela de criação do driver de comunicação.....	45
Figura 25: Tela de configuração de drivers.....	45
Figura 26: Tela de configuração dos tópicos.....	46
Figura 27: Tela de configuração do controlador no RSLogix 5000.....	47
Figura 28: Tela de configuração do módulo I/O no RSLogix 5000.....	47
Figura 29: Tela de opção de seleção do modo de comunicação.....	48
Figura 30: Módulos de entradas e saídas do FLUIDSIM nas configurações padrão.....	49
Figura 31: Tela padrão do módulo de saídas do FLUIDSIM.....	49

Figura 32: Tela padrão de seleção do server OPC no FLUIDSIM.	50
Figura 33: Tela padrão de seleção do item OPC no FLUIDSIM.	50
Figura 34: Aba Tools do Intouch.	51
Figura 35: Tela Acces Names do Intouch.....	52
Figura 36: Tela Add Access Names do Intouch.....	52
Figura 37: Função Lead-Lag do RSLogix.....	53
Figura 38: Bloco de função “Lead-Lag” da rotina “Funcao_nivel”.	54
Figura 39: Propriedades do bloco “Lead-Lag” do nível do cadinho.	55
Figura 40: Bloco de função “Lead-Lag” da rotina “Funcao_temperatura”.	55
Figura 41: Propriedades do bloco “Lead-Lag” da temperatura do forno de espera...	56
Figura 42: Bloco de função “Lead-Lag” da rotina “Funcao_temperatura”.	57
Figura 43: Bloco PID de controle do nível do cadinho.	57
Figura 44: Bloco PID de controle da temperatura do forno de espera.	58
Figura 45: Bloco PID de controle da pressão do bico pulverizador.....	58
Figura 46: Tela principal do supervisório.	59
Figura 47: Tela “Setpoints” do sistema supervisório.....	59
Figura 48: Imagem do supervisório do forno recuado.	60
Figura 49: Imagem do forno basculado no supervisório.	61
Figura 50: Chama representando queimador acionado tanto para o forno basculado quanto para forno recuado.	61
Figura 51: <i>Script</i> da tela inicial para posição da chama de acordo com estado do forno.....	62
Figura 52: Válvula que representa a válvula proporcional de controle de pressão no bico pulverizador.	63
Figura 53: Válvula que representa a válvula proporcional de controle de pressão no bico pulverizador acionada.....	63
Figura 54: Representação do cadinho e do nível do cadinho no supervisório.	63
Figura 55: Montagem final do atuador (pistão) para controle de nível no cadinho. ...	64
Figura 56: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função senoidal do nível.	65
Figura 57: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função triangular do nível.	65
Figura 58: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função retangular do nível.	65

Figura 59: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função aleatória do nível.	65
Figura 60: Disposição de sensores no cadinho.	66
Figura 61: Configuração final do processo de controle de temperatura do forno de espera.	66
Figura 62: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno de espera em função senoidal.	67
Figura 63: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno em função triangular.	67
Figura 64: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno em função retangular.	67
Figura 65: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno em função aleatória.	68
Figura 66: Configuração da simulação do controle de pressão no bico pulverizador.	68
Figura 67: Gráfico de simulação do controle de pressão com função senoidal da pressão.	69
Figura 68: Gráfico de simulação do controle de pressão com função retangular da pressão.	69
Figura 69: Gráfico de simulação do controle de pressão com função triangular da pressão.	69
Figura 70: Gráfico de simulação do controle de pressão com função aleatória da pressão.	69
Figura 71: Configuração e módulo I/O para controle do nível do cadinho.	70
Figura 72: Módulo de entradas para comandos no queimador e no bico pulverizador.	71
Figura 73: Entradas do cartão de <i>setpoint</i>	72
Figura 74: Configuração das saídas do cartão <i>setpoint</i>	73
Figura 75: Gráfico de controle dos processos no RSLogix 5000.	74
Figura 76: Gráfico de controle dos processos no RSLogix 5000.	74
Figura 77: Rotina principal parte 1.	79
Figura 78: Rotina Principal parte 2.	79
Figura 79: Rotina para alterações de <i>setpoints</i> parte 1.	80
Figura 80: Rotina para alterações de <i>setpoints</i> parte 2.	80

Figura 81: Rotina para controle da temperatura do forno de espera parte 1.	80
Figura 82: Rotina para controle da temperatura do forno de espera parte 2.	81
Figura 83: Rotina para controle da temperatura do forno de espera parte 3.	81
Figura 84: Rotina para controle do nível do cadinho parte 1.	81
Figura 85: Rotina para controle do nível do cadinho parte 2.	82
Figura 86: Rotina para controle do nível do cadinho parte 3.	82
Figura 87: Rotina para controle da pressão no bico pulverizador parte 1.	82
Figura 88: Rotina para controle da pressão no bico pulverizador parte 2.	83
Figura 89: Rotina para controle da pressão no bico pulverizador parte 3.	83
Figura 90: Rotina para simulação do nível do forno de espera parte 1.	83
Figura 91: Rotina para simulação do nível do forno de espera parte 2.	84
Figura 92: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 1.	84
Figura 93: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 2.	84
Figura 94: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 3.	85
Figura 95: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 4.	85
Figura 96: Sintonia do PID de Temperatura.	86
Figura 97: Sintonia do PID de Nível.	86
Figura 98: Sintonia do PID de pressão.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Alguns termopares comerciais e suas características básicas	27
Tabela 2: Dados das variáveis de processo coletados na fábrica.	32
Tabela 3: Bits acionados de acordo com os valores no PID.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI – American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de padrões).

CLP – Controladores Lógico Programáveis.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear.

CV – Variável de controle.

FBM – Fábrica Brasileira de Metais.

GLP – Gás Liquefeito de petróleo.

I/O – Input/Output (Entrada/Saída).

IDE – Ambiente de desenvolvimento integrado.

IP – Internet Protocol (Protocolo de internet).

MC – Microcontrolador.

PID – Proporcional Integral Derivativo.

PV – Variável de processo.

SP – *Setpoint*.

SUMÁRIO

1. Introdução	15
2. Fundamentação teórica e revisão da literatura	19
2.1 Controle	19
2.2 Controle PID	20
2.3 Controladores Lógico Programáveis – CLP's	21
2.4 Linguagem Ladder	22
2.5 Sistemas supervisórios	22
2.6 Sensor de nível	22
2.7 Sensor de temperatura	25
2.8 Sensor de Pressão.....	28
2.9 Funções de Controle	29
2.10 Circuitos Controladores.....	31
3. Materiais e Métodos	32
3.1 Simulação do Nível	34
3.2 Simulação de Temperatura	39
3.3 Simulação da Pressão	40
3.4 Configuração do CLP	43
3.5 Configuração do Fluidsim.....	48
3.6 Configuração do supervisório.....	51
3.7 Programação dos controles	53
3.8 Criação do sistema supervisório	58
4. Resultados obtidos	64
4.1 Controle de Nível	64
4.2 Controle de Temperatura	66
4.3 Controle de Pressão	68
4.4 Controles via CLP	70
4.5 Resultados Finais.....	73
5. Conclusão	76
Referências.....	77
APÊNDICE A - ROTINAS DE PROGRAMAÇÃO DO CLP	79

1. Introdução

Em fábricas de metais líquidos, nas quais o material é trabalhado em altas temperaturas, há uma demanda por controlar rigidamente a temperatura do material a ser manuseado. Existe, também, em fábricas de pó de alumínio, a necessidade de se controlar a qualidade granulométrica do pó, para manter a qualidade do produto. Nessas fábricas, é fundamental que o nível de alumínio não varie muito, sendo especificado pelo fabricante o nível mínimo de alumínio líquido no cadinho, para que não diminua a pressão exercida pelo alumínio líquido e mantenha, assim, o filete que sai do cadinho sempre constante. Ademais, há também uma especificação do fabricante quanto ao nível máximo, para que o material não exceda o limite do cadinho e derrame, evitando desperdício de material e acidentes.

Distribuidor ou cadinho é um recipiente de metal, com isolamento refratário, preparado para receber o alumínio líquido proveniente do forno de espera, que recebe uma quantidade máxima de líquido. Na sua parte inferior, há um orifício calibrado por onde o líquido escoar por pressão exercida pelo peso do líquido (pressão da coluna do próprio líquido mais pressão atmosférica), pois o cadinho é aberto na parte superior. Sobre esse aspecto, a pressão absoluta é igual à pressão manométrica mais a pressão atmosférica; como a pressão atmosférica, nesse caso, é constante, pois não varia a altitude do cadinho, o que varia é a pressão manométrica, que é igual a peso específico do líquido vezes a gravidade vezes a altura. A equação a seguir ilustra o resultado final:

$$p_{abs} = p_{atm} + \rho g h$$

Onde isolando o h, que é a altura da coluna de líquido, tem-se:

$$h = \frac{p_{abs} - p_{atm}}{\rho g}$$

Pelas equações, fica claro que a altura da coluna de líquido, ou o nível do cadinho, é o fator principal para a pressão no orifício de vazamento do cadinho, visto que pressão atmosférica, peso específico e gravidade, são constantes.

Nesse sentido, para manter o nível de alumínio no cadinho, é indispensável o basculamento de um forno de espera, que derrame alumínio líquido no cadinho, conservando, desse modo, o nível. Por sua vez, para manter a temperatura, como se sabe, é necessário o aquecimento do forno de espera ou seu resfriamento. O cadinho e o forno de espera estão evidenciados na figura 1.



Figura 1: Cadinho e forno de espera.
Fonte: FBM (Fábrica Brasileira de Metais).

Sendo assim, em se tratando de fábrica, esse processo exige cuidados especiais em relação aos operadores, a fim de se evitar possíveis acidentes. Para tanto, uma sirene avisa quando o nível superior determinado for alcançado e/ou ultrapassado, e um sensor mede a temperatura de modo a evitar que o operador chegue perto do cadinho ou do forno e entre em contato com o calor.

Levando em conta o exposto, um controle de nível e de temperatura no processo, com o auxílio de microcontrolador embutido num Controlador Lógico Programável (CLP), com amostradores de temperaturas afastados do forno e do cadinho, traria grandes benefícios às fábricas que atuam nesse segmento e aos operadores, dado que propiciará a homogeneidade na granulometria final do pó de alumínio e a obtenção da temperatura instantânea do líquido sem a aproximação do operador do alumínio fundido.

Os microcontroladores são pequenos componentes eletrônicos, dotados de uma inteligência programável, que são utilizados no controle de processos lógicos. São pequenos, dado que, em uma única pastilha de silício encapsulada, existem todos os componentes necessários para o controle de um processo. Ademais, são dotados de inteligência programável por possuírem uma Unidade Lógica Aritmética,

na qual todas as operações matemáticas lógicas são executadas. Em vista dessas características, toda essa lógica é estruturada em forma de um programa e gravada dentro do componente, sendo que, toda vez que o microcontrolador é alimentado, ele realiza a execução desse programa interno. Sendo assim, os microcontroladores são utilizados em inúmeras aplicações, presentes na área de automação industrial, predial, automobilística, agrícola, nos eletrodomésticos, nas telecomunicações etc. Isso ocorre porque são robustos, porém pequenos, e sua implantação (*hardware* e *software*) é de custo menor (SOUZA, 2005). Na figura 2 ilustra-se um microcontrolador da família PIC.

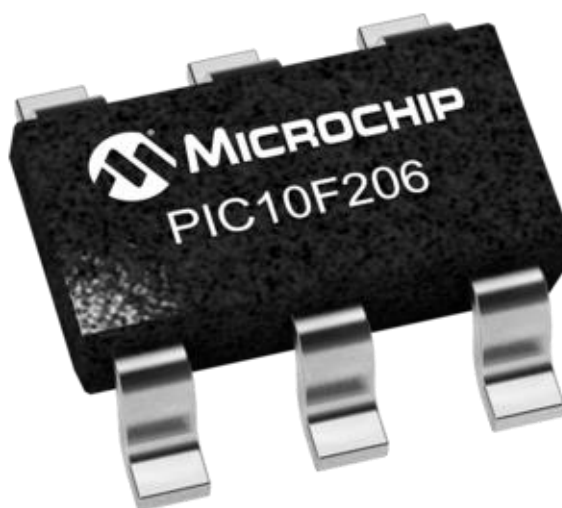


Figura 2: Microcontrolador da família PIC.
Fonte: Microchip (2016).

Os CLPs, por sua vez, são computadores projetados para serem usados em ambiente industrial, por isso são mais robustos que os computadores convencionais. Nesses computadores, os transdutores e os atuadores são conectados a robustos cartões de interface (FRANCHI; CAMARGO, 2012, p. 23). Ademais, utilizam uma memória programável para a armazenagem interna de instruções orientadas para o usuário implementar funções específicas, tais como lógica e temporização, objetivando controlar, por meio de entradas e saídas digitais e analógicas, máquinas ou processos (RIBEIRO, 1999, p.21). Nesse sentido, os CLPs são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas as suas funções previstas. Um exemplo de Controlador Lógico Programável é apresentado na figura 3.



Figura 3: Controlador Lógico Programável.
Fonte: Rockwell Automation (2016).

Em vista do exposto, objetiva-se, com este trabalho, implementar o controle de nível e de temperatura do processo por meio de CLP. Logo, parte-se da seguinte pergunta de pesquisa: é possível controlar o nível e a temperatura do cadinho, por meio de CLP, de modo a assegurar um ganho na qualidade do produto final e na segurança dos operadores? A fim de responder a essa pergunta, parte-se da seguinte hipótese de pesquisa: se houver o controle de nível e de temperatura do cadinho, conseqüentemente mantendo o nível, a temperatura, a pressão e a vazão do filete do metal líquido constantes, então a granulometria final do produto será homogênea, caracterizando um ganho de qualidade do produto final.

O estudo aqui apresentado será desenvolvido e futuramente aplicado em uma fábrica de alumínio em pó, localizada na cidade de Araxá-MG, na qual ainda não há esse tipo de controle. Logo, o objetivo geral que norteia essa proposta é: realizar o controle de nível e de temperatura de um processo que transforma alumínio líquido em pó de alumínio, utilizando CLP, mantendo, assim, a pressão constante no cadinho e, conseqüentemente, um filete homogêneo vazado. Esse fato levará a um ganho na qualidade final do produto, caracterizada nesse processo pela homogeneidade granulométrica final do pó de alumínio. Para alcançar esse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram contemplados, quais sejam: a) realizar controle de nível no cadinho definindo um limite mínimo e um limite máximo

de metal líquido dentro do cadinho; b) realizar basculamento do forno de espera quando atingido o nível mínimo, derramando mais metal líquido dentro do cadinho, e parar o basculamento quando atingido o nível máximo de metal líquido, evitando derramar metal líquido fora do cadinho; c) acionar um alarme de aviso quando atingido o nível mínimo e o nível máximo, alertando operadores que uma ação será realizada no forno de espera; d) promover um controle de temperatura, mantendo a temperatura especificada pela fábrica constante, utilizando sensores que resistam a ambientes hostis; e) mostrar em um painel o valor atual da temperatura, impedindo que o operador realize manualmente a medição desses valores, evitando, assim, a sua exposição a esse ambiente hostil e possíveis acidentes; f) utilizar CLP para realizar esses controles, supervisionar e atuar no processo.

Com efeito, a automação traz inúmeras vantagens para fábricas em geral, como segurança aos trabalhadores, controle na qualidade e na homogeneidade do produto e do processo, dentre outras. Em fábricas que utilizam metais líquidos, ou seja, trabalham com altas temperaturas, a automação e o controle do processo necessitam de uma tratativa diferente, pois os sensores, além da precisão, necessitam resistir ao ambiente hostil imposto na indústria, resistindo à temperatura alta, à poeira etc. Logo, o controle de nível e de temperatura no cadinho de uma empresa que transforma alumínio líquido em pó de alumínio é relevante ao passo que trará ganhos na qualidade final do produto e garantirá a segurança dos operadores, isso porque, controlando o nível e a temperatura, será possível manter a pressão na vazão do filete de alumínio líquido constante, fato essencial para uma granulometria homogênea final do produto, o que garante a qualidade do produto. Ademais, ao fazer esses controles, com o auxílio do CLP, colocam-se em prática conhecimentos adquiridos em sala de aula, utilizando conhecimento de matérias distintas em prol de um objetivo comum, fato que traz inúmeros benefícios à fábrica e ao pesquisador. Com relação a esse último, tal pesquisa proporciona conhecimentos tanto teóricos quanto práticos, além de um ganho de experiência bastante relevante.

2. Fundamentação teórica e revisão da literatura

2.1 Controle

O controle de processos industriais (manufaturas, produção etc.), de modo automático e não manual, é denominado automação. A automação é amplamente utilizada atualmente em indústrias químicas, siderúrgicas, automotivas etc. Os processos automatizados buscam melhorar a produtividade além de fornecer produtos mais precisos, confiáveis, exatos e robustos (DORF; BISHOP, 2001, p. 6).

Os sistemas de controle buscam o aumento da produtividade e a melhoria no desempenho de certos dispositivos ou processos. A automação é o controle do processo, dispositivo ou sistema. Com ela, utiliza-se o controle automático de processo para gerar produtos dentro das tolerâncias aplicáveis e obter alto grau de precisão (DORF; BISHOP, 2001, p. 7).

Um sistema que estabeleça alguma relação comparando entrada de referência e saída, utilizando a diferença (erro) como meio de controle, é denominado sistema de controle com realimentação. Já um sistema no qual o erro atuante realimenta o controlador, minimizando o erro e acerto da saída do sistema para um valor desejado (*setpoint*), é chamado sistema de controle de malha fechada (OGATA, 2010, p. 6).

2.2 Controle PID

O PID é um algoritmo de controle robusto e simples, ele é composto por três coeficientes: Proporcional, integral e derivativo, que são variados para obter respostas. Segundo OGATA (2010), mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente empregam algoritmos de controle PID ou PID's modificados.

De acordo com OGATA (2010), quando o modelo matemático de uma planta não é conhecido, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser aplicados, controles PID se mostram mais úteis.

2.3 Controladores Lógico Programáveis – CLP's

Controladores Lógico Programáveis são definidos, conforme Ribeiro (1999), pela IEC (International Electrotechnical Commission), organização de padronização de tecnologias elétricas, como:

Sistema eletrônico operando digitalmente, projetado para uso em um ambiente industrial, que usa uma memória programável para armazenagem interna de instruções orientadas para o usuário para implementar funções específicas, tais como lógica, sequencial, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas suas funções previstas.

Em qualquer indústria, é necessária a utilização de algum tipo de controlador para garantir que os processos sejam seguros e viáveis. Nessa medida, o CLP se destaca entre outros sistemas, com relés, por exemplo, pois possui características de programação que o torna mais eficiente do que outros equipamentos industriais (FRANCHI; CAMARGO, 2012). Dentre as características de programação do CLP, aquelas que se destacam são: a flexibilidade e a facilidade para alterar os programas; os programas serem salvos e usados em outro processo ou como *backup*; e a possibilidade de informar ao operador a parte defeituosa do processo em caso de defeito (FRANCHI; CAMARGO, 2012).

Nesse sentido, percebe-se que o CLP tem um campo de aplicação vasto, por isso é amplamente utilizado em processos nos quais é necessário controle e supervisão, sendo empregado em processos de fabricação industrial até processos de transformação de matéria-prima (FRANCHI; CAMARGO, 2012).

2.4 Linguagem Ladder

A Linguagem Ladder é uma linguagem gráfica muito utilizada, baseada na lógica de contatos virtuais, cujo programa aciona bobinas de saídas segundo valores aferidos por sensores ou chaves conectados à entrada dos CLPs, com o intuito de ligar motores, lâmpadas ou realizar contagem, temporizações ou controles proporcionais, integrais e derivativos (ROQUE, 2014, p. 45).

2.5 Sistemas supervisórios

Os programas de automação realizados em escala industrial podem ser difíceis de compreender, pois grandes processos implicam em inúmeros CLP's, contatos, sensores e saídas; o que torna difícil identificar eventuais erros ou realizar mudanças em códigos Ladder que contenham muitas linhas (ROQUE, 2014, p. 260). Logo, para facilitar a visualização e o gerenciamento dos sistemas automatizados, criaram-se ambientes de desenvolvimento integrado (IDE), conhecidos por sistemas supervisórios, que possuem interfaces gráficas programáveis, capazes de gerar relatórios, alarmes e mostrar, na tela do computador, o desenvolvimento do processo em tempo real (ROQUE, 2014, p. 260).

2.6 Sensor de nível

Para se obter o controle do nível no forno/cadinho, são necessários sensores que indiquem esse nível. Levando em conta as difíceis condições técnicas e operacionais desse equipamento, alguns outros aspectos são importantes para a escolha do sensor certo, como os construtivos mecânico e refratário. Dessa maneira, a temperatura, a viscosidade do líquido, a espessura e a localização do cadinho são alguns desses aspectos que influenciam na escolha do sensor. A figura 4 representa um esquema do cadinho disponibilizado pela empresa na qual este estudos será futuramente aplicado.

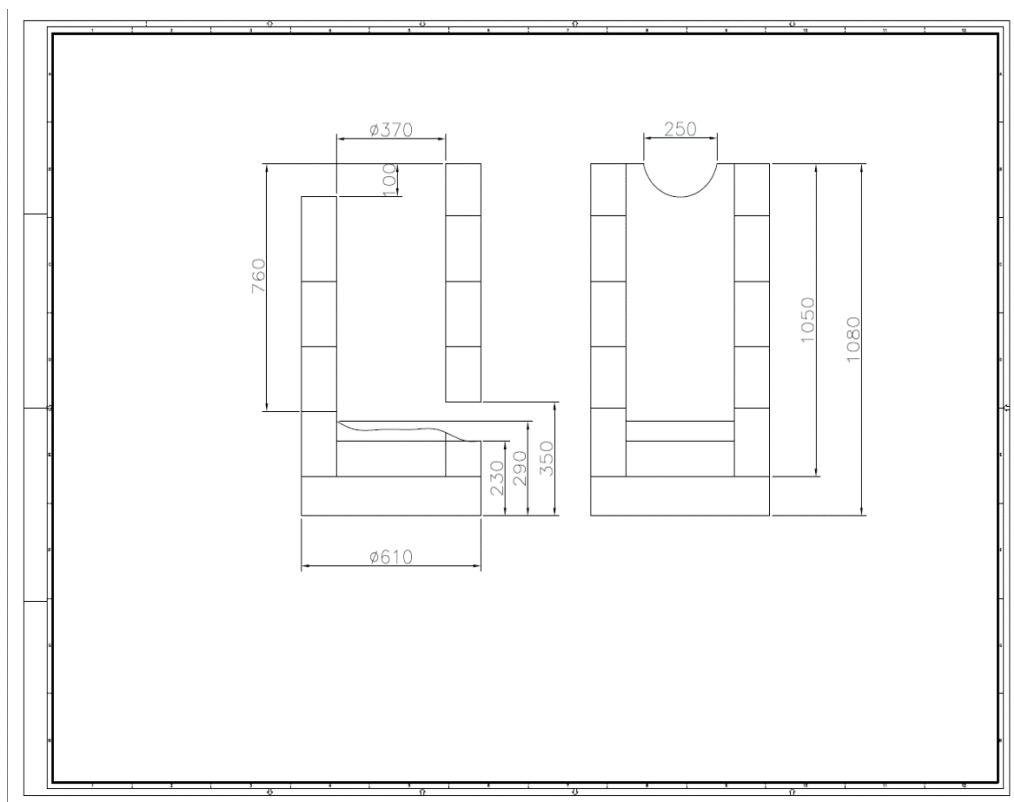


Figura 4: Desenho esquemático do Cadinho/Distribuidor.
Fonte: FBM (Fábrica Brasileira de Metais).

Interpretando a figura 4, é possível depreender as características do cadinho em estudo:

- Diâmetro externo de 610 mm;
- Diâmetro interno de 370 mm;
- Espessura do refratário de 120 mm (diferença entre diâmetro externo e o diâmetro interno);
- Altura total externa de 1080 mm e interna de 790 mm;
- Altura da coluna de líquido de 760 mm.

Levando em consideração essas características, é necessário salientar que é preciso, para calcular o volume de líquido que o cadinho comporta, considerar que há uma rampa que começa na altura de 230 mm e termina em 290 mm.

Em vista do exposto, os sensores de nível externos por radiação se tornam a melhor escolha, pois esses sensores trabalham de acordo com o princípio da radiometria, ou seja, considera-se que nem as propriedades físicas e nem as químicas terão influência nas medidas. Além disso, esse método, que se caracteriza por não requerer manutenção, ainda é inserido na etapa eletrônica, como uma compensação de efeitos de temperatura. Ademais, esses sensores podem alcançar

precisões de ordem de décimos de milímetros. Em contrapartida, são sensores muito caros e de aplicações específicas, que necessitam de calibrações por grupos especiais da CNEN¹ (Cf. BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

Sendo assim, uma segunda opção seria os sensores de nível interno por ultrassom, os quais, através de sinais ultrassônicos, utilizam frequências entre 20 e 200 kHz. O princípio de funcionamento desses sensores consiste em medir o tempo de eco de um sinal enviado por um transdutor. O transdutor, que emite o sinal, pode fazer também a leitura. Quando esse transdutor atua como transmissor, ele é excitado com um sinal elétrico gerando uma onda mecânica. Por sua vez, quando o transdutor atua como receptor, ele recebe um sinal mecânico e converte-o em sinal elétrico (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007, p. 379).

Ao selecionar os sensores ultrassônicos, é imprescindível levar em conta que a velocidade do som varia com a temperatura. Em vista disso, dado que no processo trabalhado a temperatura será uma variável consideravelmente importante, é necessário medir a temperatura e compensar os resultados empiricamente para diminuir os erros causados por essa variável (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). Além disso, deve-se considerar a posição em que o sensor ultrassônico deve ser instalado, visto que o cadinho tem entrada de calor na parte superior, onde geralmente são instalados os sensores ultrassônicos, o que pode variar muito a velocidade do som e atrapalhar a medição do sensor. Nessa medida, a aplicação desse sensor não é aconselhável nesse caso.

Uma terceira opção de sensores seria os indiretos de nível por efeito da temperatura, instalados acopladamente numa lógica de *steps*, os quais podem apresentar resultados satisfatórios no caso em estudo. Assim, usando sensores como termopares, levando em consideração que a temperatura do metal líquido é diferente da temperatura onde o metal não está presente nas paredes com refratários, pelos termopares, detectar-se-ia a presença ou não do alumínio, possibilitando o controle de nível do metal no cadinho. Essa opção de sensores indiretos, porém, não permite um controle contínuo do nível, visto que, por meio deles, apenas seria possível saber a presença do alumínio líquido em níveis pré-

¹ Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (2015), a CNEN “é uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), criada em 1956 e estruturada pela Lei 4.118, de 27 de agosto de 1962, para desenvolver a política nacional de energia nuclear. Órgão superior de planejamento, orientação, supervisão e fiscalização, a CNEN estabelece normas e regulamentos em radioproteção e é responsável por regular, licenciar e fiscalizar a produção e o uso da energia nuclear no Brasil”.

determinados (onde estariam localizados os termopares embutidos na parede refrataria). Logo, a utilização de um sistema microprocessado, se lógico e analógico, permite uma maior flexibilidade e interação das medições de nível indireto com o sistema de controle do processo na planta.

2.7 Sensor de temperatura

Na etapa de controle de temperatura, os sensores de temperatura mais indicados para a indústria são os termopares e termoresistências, sendo que o elemento sensor de temperatura é geralmente montado dentro de uma bainha ou de um termo-poço de proteção. É comum modelar esses sensores como um sistema de 1ª ordem (GARCIA, 2009, p. 463).

Um aspecto importante a ser considerado na instalação desses sensores é sua localização, no forno/bica, nos locais exatos em que irão realizar as medições para indicação e controle, levando em conta a influência da fonte de calor existente e as difíceis condições técnicas e operacionais. O croqui do forno é apresentado nas figuras 5 e 6.

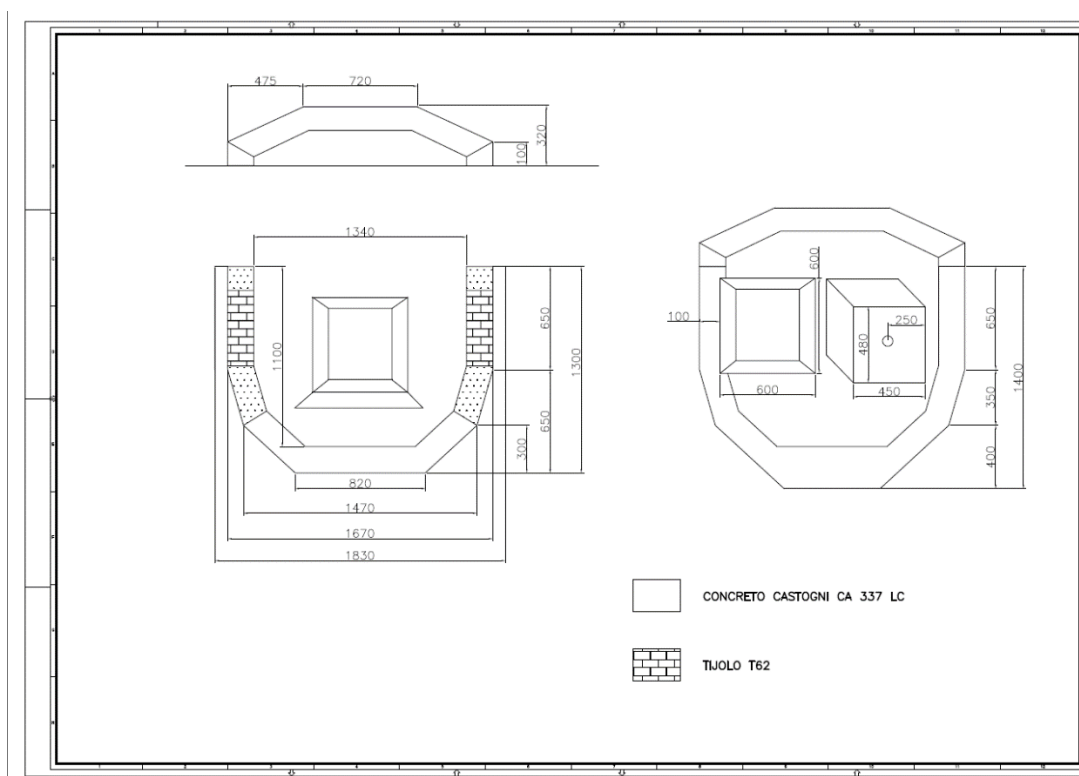


Figura 5: Croqui do forno de espera em vista frontal.
Fonte: FBM (Fábrica Brasileira de Metais).

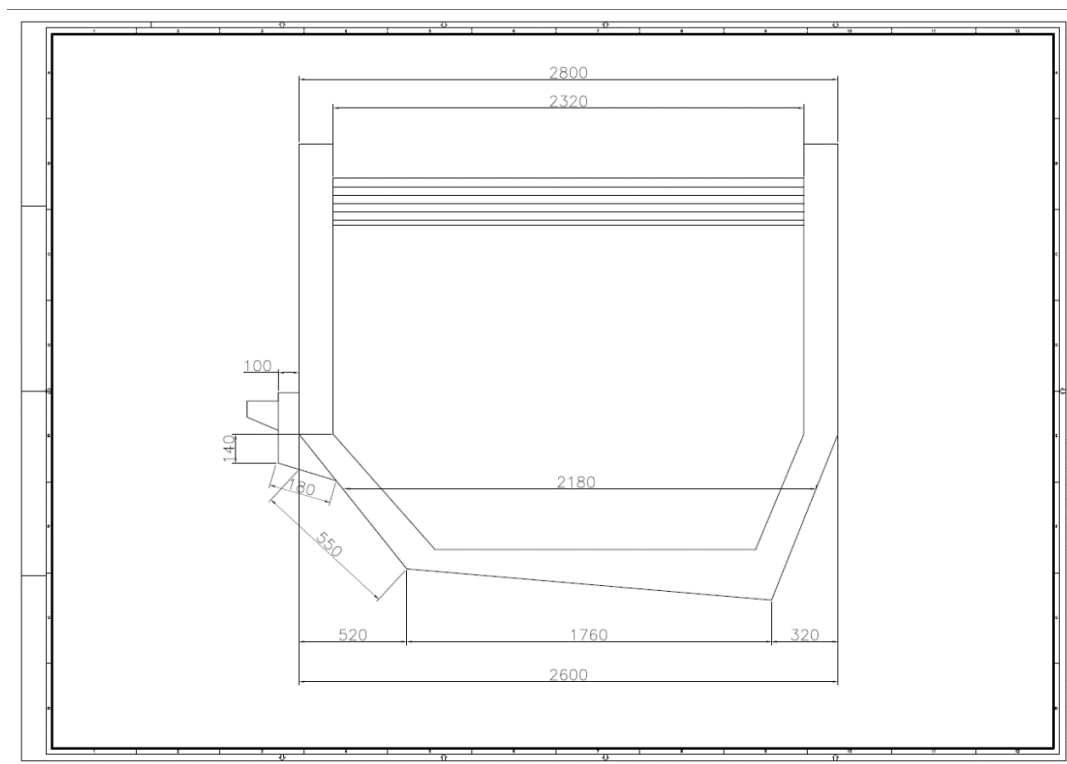


Figura 6: Croqui do forno de espera em vista lateral.
Fonte: FBM (Fábrica Brasileira de Metais).

Em vista das figuras 5 e 6, as características do forno são as seguintes:

- Largura externa de 2600 mm;
- Largura interna de 2320 mm;
- Espessura do refratário de 280/2 mm (diferença entre a largura externa e a largura interna).

Conforme salientado, os termopares têm características importantes a serem destacadas nesse processo, tais como: resistência à oxidação e à corrosão, linearidade e fácil soldagem na manutenção do usuário. Ademais, existem diversos modelos de termopares comerciais, com características específicas diferentes, que são importantes para a escolha do sensor exato para cada aplicação (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2006).

Tabela 1: Alguns termopares comerciais e suas características básicas (padrão ANSI).

Tipo	Range (°C)	Saída (fundo de escala – mV)	Incerteza (°C)
B	38 a 1800	13,6	-
C	0 a 2300	37,0	-
E	0 a 982	75,0	±1,0
J	184 a 760	43,0	±2,2
K	-184 a 1260	56,0	±2,2
N	-270 a 1300	51,8	-
R	0 a 1593	18,7	±1,5
S	0 a 1538	16,0	±1,5
T	-184 a 400	26,0	±1,0

Fonte: Balbinot e Brusamarello (2006, p. 341).

Inicialmente, os termopares tipo J (ferro-constantan) até 760°C, os mais baratos, atenderiam às demandas aqui expressas, mas não satisfatoriamente acima de 760°C, por conterem ferro, além de não serem indicados para ambientes oxidantes. Conforme ponderado, a temperatura de trabalho normalmente usada no cadinho e/ou forno está bem próxima ao limite máximo desse termopar, inviabilizando seu uso, pois podem ocorrer variações que sairiam da faixa de leitura desse sensor.

Os termopares do tipo K (cromel-alumel), por sua vez, se encaixam tecnicamente melhor nesse processo, pois eles apresentam uma boa resistência mecânica a altas temperaturas oxidantes e são utilizados principalmente em tratamentos térmicos, fornos, processo de fundição e banhos. O range alcançado por esse sensor é de -184°C a 1260°C e, satisfatoriamente, até 1150°C (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2006).

Outros termopares apresentam características semelhantes ao do tipo K e podem ser usados nesse processo, como: o termopar do tipo N, que tem um range que alcança -270°C a 1300°C; o termopar do tipo R, de range 0°C a 1593°C; e o

termopar do tipo S, que alcança um range de 0°C a 1538°C. Esses excedem a necessidade com folga, mas exageram nos preços. Portanto, termopares tipo K são mais indicados para essa aplicação, isso porque, além das características anteriormente citadas, o custo desses termopares é relativamente em conta, o que os coloca à frente de outros sensores de temperatura (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2006). Além do mais, no caso em estudo, deve-se ter dois termopares instalados acopladamente, um para medição do alumínio líquido e outro para o controle do forno/gás propriamente dito, além de um terceiro, já existente, de verificação da medição móvel por imersão do termopar, como operado na atualidade.

2.8 Sensor de Pressão

Para relacionar a pressão instantânea no anel de pulverização do alumínio líquido, deve-se instalar um sensor/transmissor/indicador roscável na base existente, para entrada eletrônica do controle remoto ao controle do compressor variável. Para essa função, tem-se os tipos aplicáveis, quais sejam: tipo células capacitivas e pressão piezorresistivos.

Os sensores de pressão tipo células capacitivas são utilizados em uma faixa extensa de pressão (10^{-3} a 10^7 Pa). Em um sensor de pressão capacitivo diferencial, o diafragma é colocado entre dois eletrodos C[uF] fixos; sendo que, quando submetido a uma pressão, um dos capacitores terá sua capacitância aumentada, enquanto no outro a capacitância é diminuída (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). Esses sensores de pressão capacitivos são amplamente utilizados, pois abrangem uma grande faixa de pressão. Eles fornecem precisões da ordem de 0,1% da leitura ou 0,01% do fundo de escala. Alguns sensores mais modernos utilizam técnicas de fabricação que os tornam mais resistentes a ambientes corrosivos e menos sensíveis a capacitâncias parasitas e a influências externas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

Os sensores de pressão piezorresistivos, por sua vez, variam a resistência elétrica de elementos sensores quando submetidos a uma força e a uma consequente deformação. Contudo, devido às técnicas de microeletrônica, podem ser feitas compensações de temperatura, que otimizam os resultados e garantem excelente desempenho desses sensores. Além disso, o avanço dessas técnicas

possibilitou a miniaturização dos sensores sem perda de confiabilidade e precisão (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). Acresce-se ainda que esses sensores geralmente apresentam algumas características, como: sensibilidade maior que 10 mV/V, boa linearidade sob uma temperatura constante e capacidade de perceber mudanças de pressão sem apresentar histerese (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

Nessa medida, qualquer desses elementos se aplica à faixa de pressões variadas, atendendo à necessidade do processo e mantendo a indicação manométrica local para supervisão operacional.

2.9 Funções de Controle

Para o melhor entendimento do processo, planejou-se e foram criados diagramas de blocos que representam as malhas utilizadas no trabalho.

Em sistemas de aquecimento de fornos industriais, como o sistema de temperatura do forno de espera, segundo Souza e Pinheiro (2008, p. 61), a relação entre a temperatura no forno e o calor utilizado para aquecer o forno é a função de transferência do sistema.

$$\frac{T(s)}{q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

A figura 7 ilustra a malha de controle de temperatura do forno. Nela, a função de transferência da temperatura, indicada apenas por “Tempe”, se compara com a função de transferência citada.

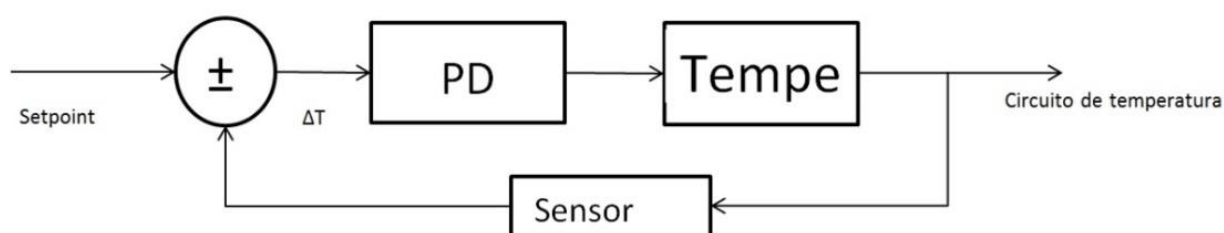


Figura 7: Malha do controle de temperatura.

Para sistemas de níveis com tanque de escoamento livre, como o cadinho, ainda segundo Souza e Pinheiro (2008, p. 55), a relação entre altura da coluna de líquido dividido pela quantidade de líquido que entra no reservatório (cadinho) é a função de transferência do sistema que relaciona a variação do nível do reservatório em função da vazão de entrada.

$$\frac{h(s)}{qi(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

Já a figura 8 mostra a malha de controle de nível do cadinho. A função de transferência do nível, indicada na malha apenas por “Nível”, se compara com a função de transferência citada.

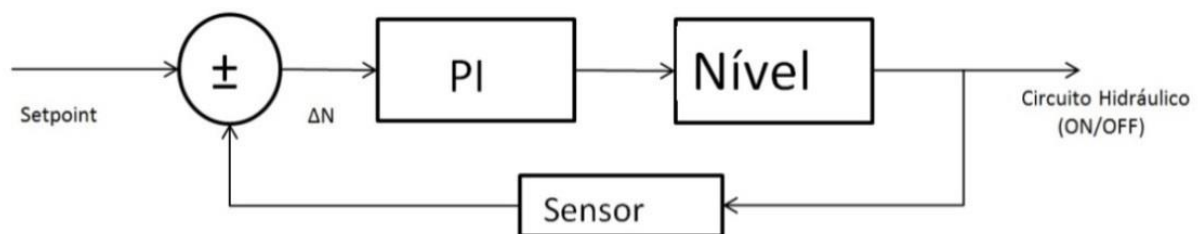


Figura 8: Malha do controle de nível.

Para a função de transferência representativa da pressão, utiliza-se uma função de primeira ordem como a descrita pela seguinte equação:

$$F(s) = \frac{R}{RCs + 1}$$

A figura 9, por sua vez, evidencia a malha de controle de pressão no bico pulverizador. A função de transferência, indicada na malha como “Pressão”, se comporta como uma função de transferência de primeira ordem, seguindo o modelo da equação acima.

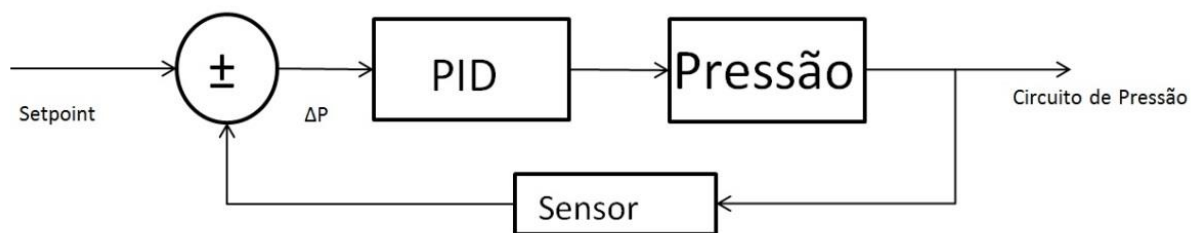


Figura 9: Malha do controle de pressão.

2.10 Circuitos Controladores

Os Circuitos Controladores são os circuitos que atuam diretamente no processo, seja acionando o pistão para levantar o forno e derramar mais alumínio líquido para controlar o nível, seja acionando as chamas dos queimadores para aumentar a temperatura. No circuito controlador de nível (circuito fechado por 'steps' hidráulico do levantador do forno/bica), além da válvula manual para acionamento do pistão, uma válvula automática deve ser instalada em um *by-pass* (caminho alternativo) e acionada pelo controlador de modo que a válvula manual continue funcionando em uma eventualidade.

3. Materiais e Métodos

Tendo em vista os objetivos antes apresentados, o método de pesquisa empregado neste trabalho foi norteado por alguns passos de pesquisa, quais sejam: pesquisa bibliográfica, coleta e levantamento de dados, realização do controle de nível e de temperatura simulado em *softwares*, efetivação dos testes e divulgação dos resultados.

No que se refere ao primeiro passo, pesquisa bibliográfica, foi feita a parametrização dos dados de leituras, para dar embasamento à pesquisa. Essa pesquisa foi norteada pelo interesse em melhor compreender trabalhos que se relacionam com este no que concerne ao controle de nível e de temperatura, à utilização de CLP, entre outros aspectos.

Posteriormente, um experimento foi conduzido, inicialmente, para coletar dados sobre as variáveis de processo existentes no equipamento atualmente operado em manual. Nesse experimento, foram levadas em conta as demandas do processo, bem como as opções sugeridas pela gerência da fábrica.

Em seguida, definiu-se o modelo de controle (referenciais). Nessa medida, os pontos de controles a atuar foram definidos para a melhor solução do controle manual e, assim, foram posicionados, em dispositivos fixos, em cada localização das variáveis de processo.

Tabela 2: Dados das variáveis de processo coletados na fábrica.

Variáveis	Total	Máximo	Mínimo	Setpoint
Nível cadinho (mm ³)	242417070,1	230296216,6	213327021,7	215751192,4
Temperatura (°C)		760	700	720
Pressão (BAR)		6,5	6,3	6,4
Nível forno de espera (Kg)	2577	2500	375	375(Carregamento)

Após o levantamento de dados, adequou-se esses dados ao modelamento a ser estudado para se obter os resultados controlados. Nesse momento, os algoritmos de controle PID foram requeridos para tentar melhorar a falta de controle atual/manual operacional. Na sequência, depois de levantar os dados e definir os controles, foi utilizado um *software* para programação de CLP e um *software*

supervisório para melhorar o entendimento, além de *softwares* auxiliares. Cumpridas essas etapas, foi possível apresentar os resultados. Em uma primeira versão, apresenta-se uma simulação do modelamento adotado com curvas tanto em Malha Aberta (atual) quanto em Malha Fechada (proposta). Diante disso, uma vez simuladas as soluções previstas/possíveis, essas foram implementadas no Laboratório de Instrumentação e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG – Unidade Araxá-MG, para comprovação dos resultados.

Concluída essa etapa de simulação e obtendo-se resultados favoráveis, pretende-se implementar, futuramente, tal estudo na Fábrica Brasileira de Metais (FBM), o que dependerá do aceite da área de produção de alumínio em pó, a custos da própria empresa detentora do processo.

Na figura 10, pode-se ver uma primeira proposta de controle das duas variáveis em modo cascata, cujos módulos de temperatura e de nível serão acrescidos dos PID's parametrizados, conforme simulações e testes abaixo descritos.

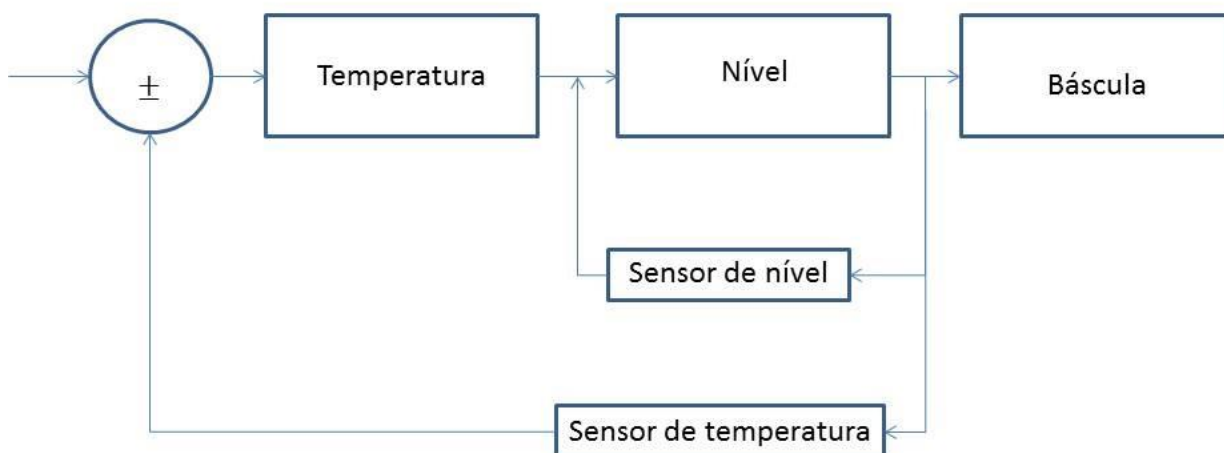


Figura 10: Diagrama em Blocos das Malhas Fechada/Cascata.

3.1 Simulação do Nível

Para simular e demonstrar de forma gráfica os circuitos controladores, foram utilizados dois *softwares*, o Fluidsim pneumático e o Fluidsim hidráulico. O Fluidsim se torna uma ferramenta importante no aprendizado de um futuro engenheiro, pois permite que se façam os desenhos dos circuitos, simule seus funcionamentos, mostrando o fluxo do fluido e as variáveis envolvidas, como pressão, vazão etc. Além disso, esse *software* disponibiliza uma representação gráfica dos circuitos com as variáveis escolhidas. Na sequência são apresentadas as figuras que demonstram a simulação de modelamento de controle de nível:

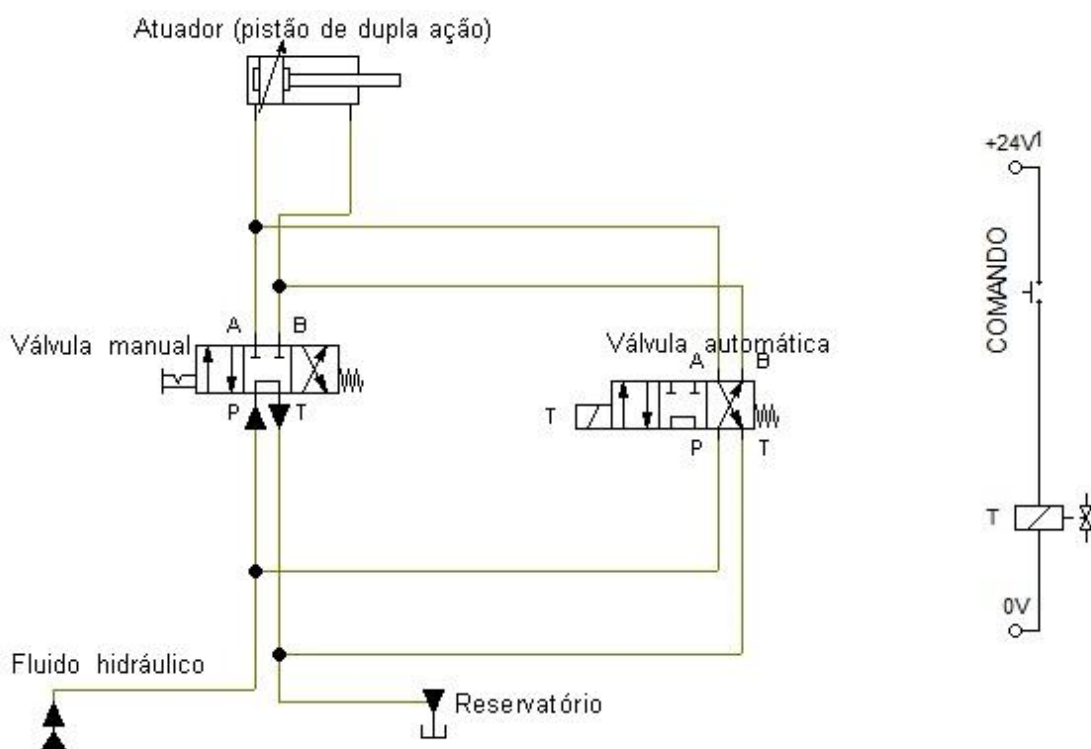


Figura 11: Circuito controlador de nível no cadinho.

A figura 11 evidencia o circuito controlador de nível no início do processo, sem nenhuma válvula acionada, além do circuito elétrico representativo que realiza o acionamento da válvula automática. A figura 12, por sua vez, exibe que o pistão, após o acionamento da válvula manual, move-se, levantando o forno.

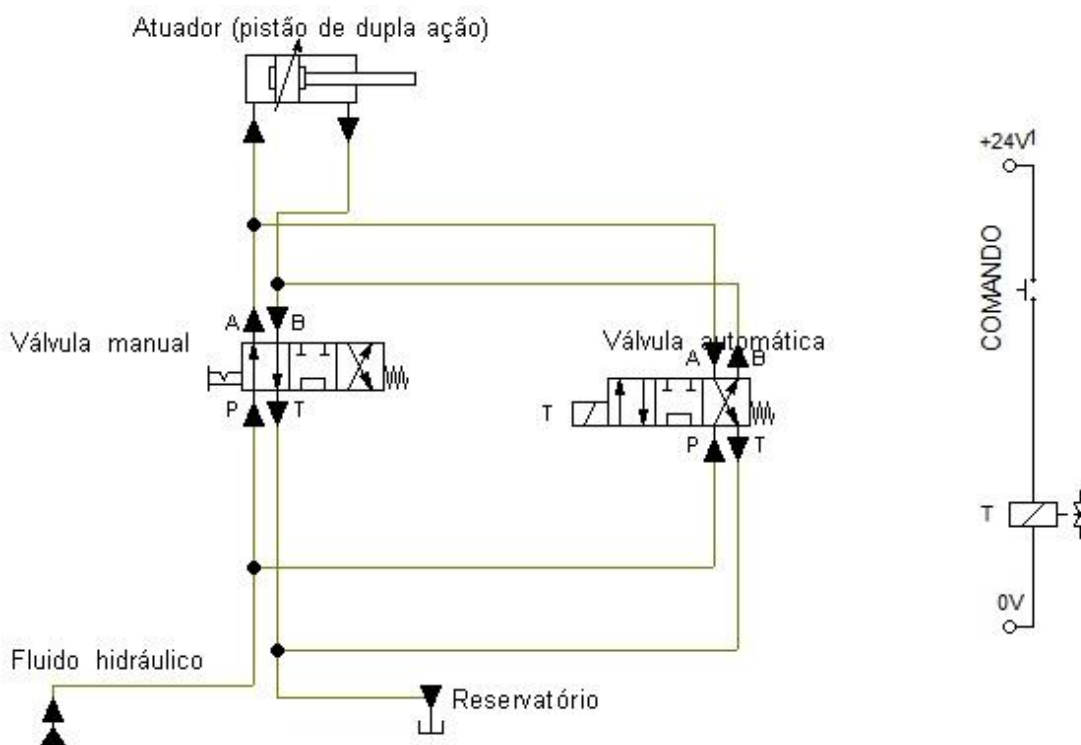


Figura 12: Válvula manual do pistão acionada.

A figura 12 ilustra o acionamento da válvula no sentido em que o fluxo empurra o pistão, iniciando o levantamento do forno. Além disso, mostra que nenhum comando foi dado à válvula automática. A seguir, na figura 13, expõe-se o posicionamento final do pistão após o acionamento manual.

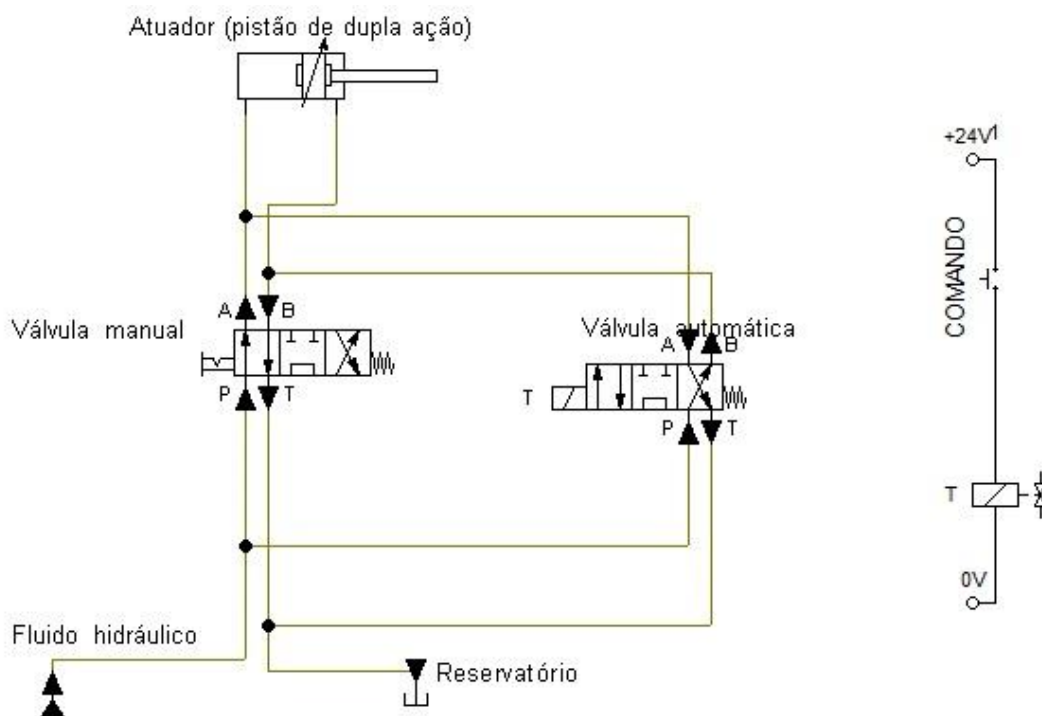


Figura 13: Posição final do pistão com acionamento manual.

Após acionar a válvula manual no sentido contrário, ela voltará ao estado inicial, conforme figura 13, terminando o ciclo de acionamento manual e garantindo que o acionamento automático possa começar quando necessário e/ou configurado. Na figura 14 ilustra-se o funcionamento do *by-pass* e da válvula automática:

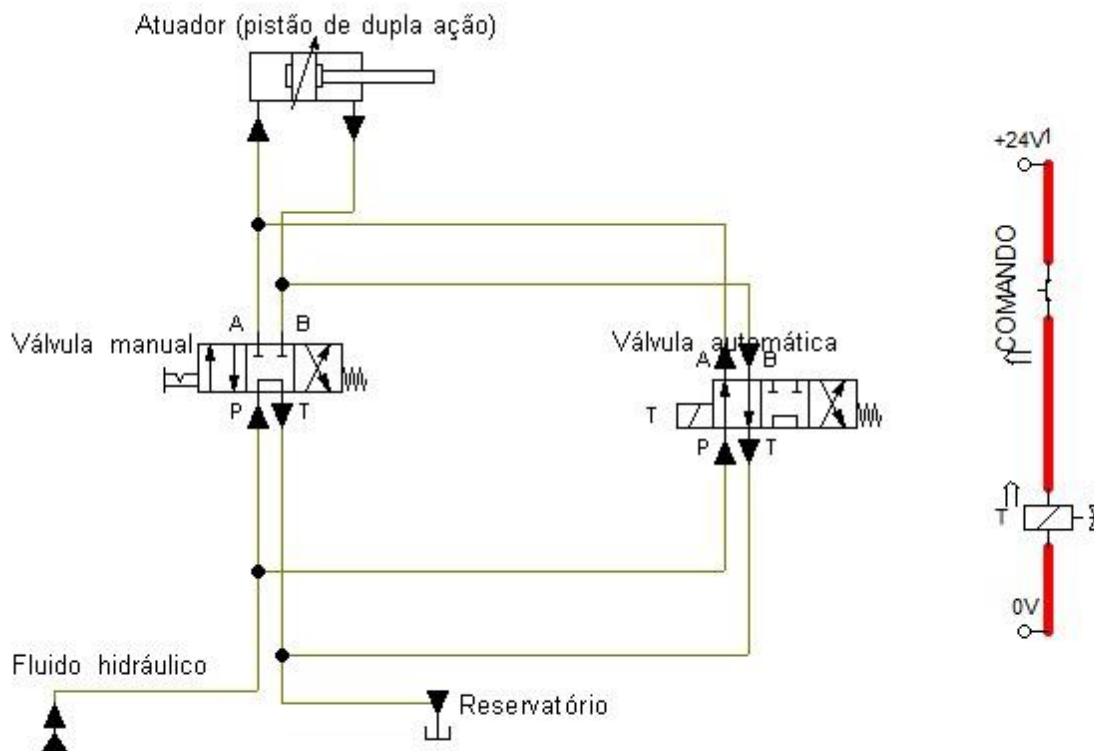


Figura 14: Ação do pistão quando a válvula automática é acionada pelo controlador.

A figura 14 evidencia o acionamento da válvula automática por um comando elétrico, apresentado em vermelho. Ademais, essa figura mostra a ação do pistão começando a levantar o forno. Confira, na figura 15, a posição final do pistão.

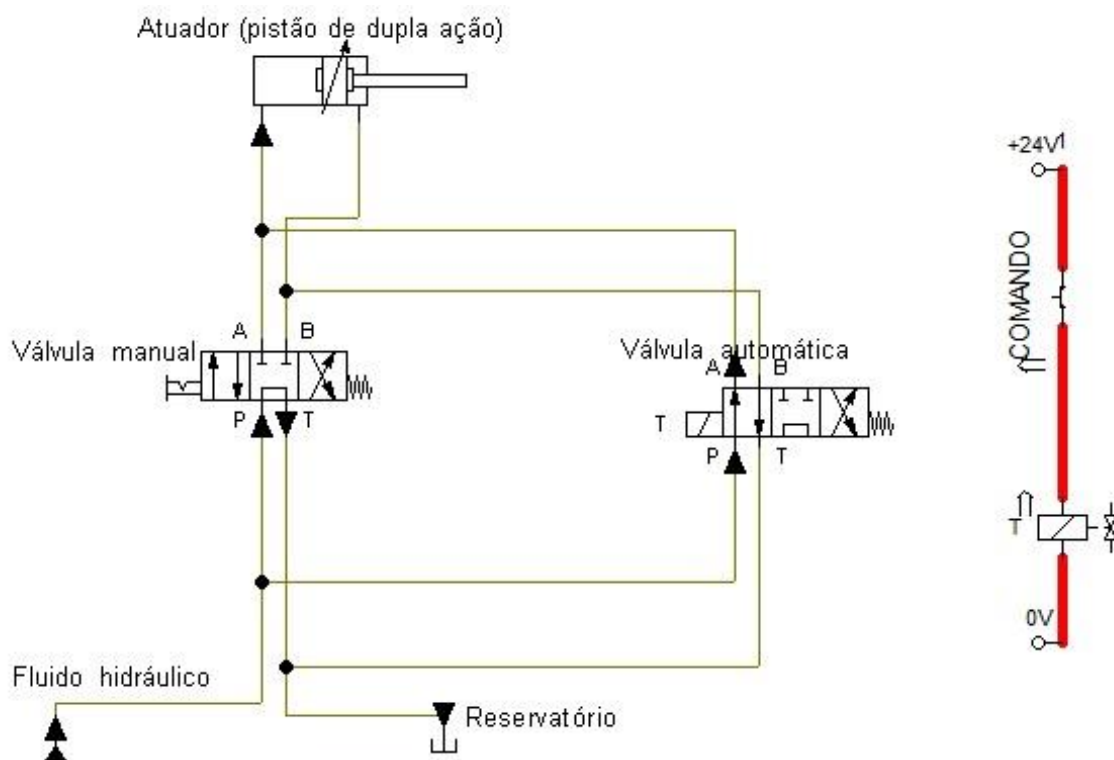


Figura 15: Posição final do pistão.

A figura 15 explicita a posição final do pistão após o comando do controlador de acionar a válvula e empurrar o pistão, levantando o forno. Quando o cadinho chegar ao nível estipulado, o controlador cessa o comando e a válvula volta à posição original. Logo, o forno desce pelo efeito de seu próprio peso, voltando à posição inicial, conforme exemplificado na figura 11.

3.2 Simulação de Temperatura

Para controlar a temperatura, outro circuito controlador é necessário. A figura 16 representa o mesmo sem nenhuma válvula acionada.

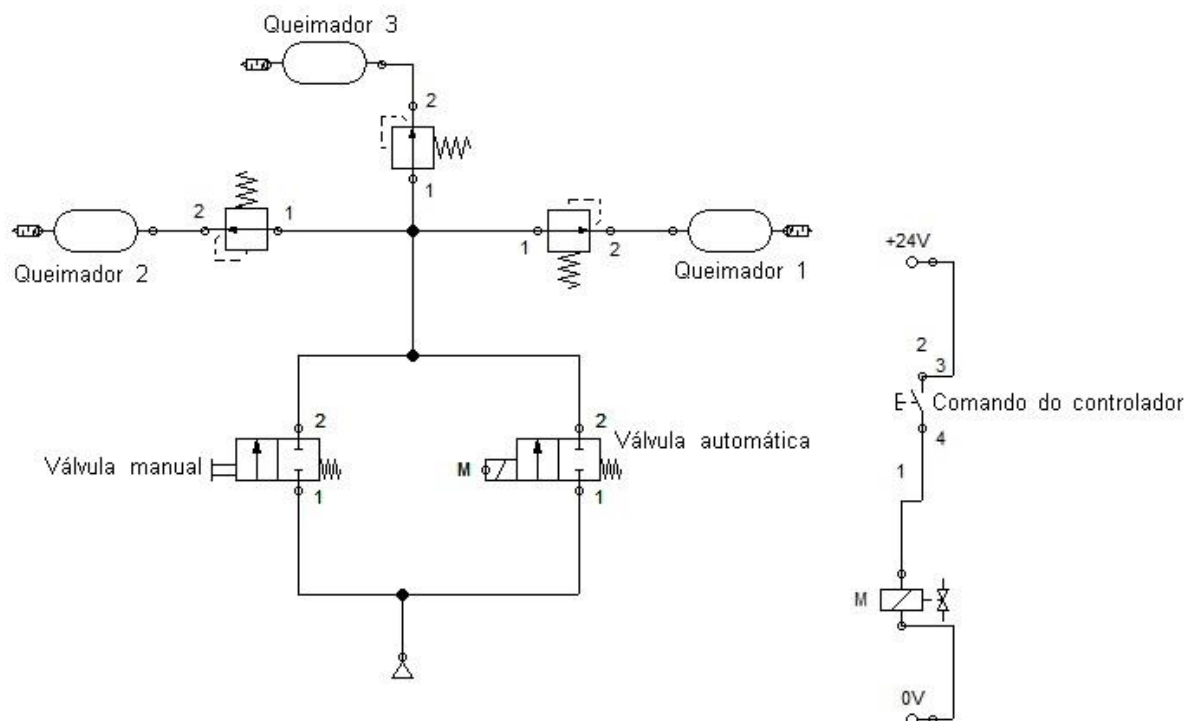


Figura 16: Circuito controlador de temperatura.

Esse segue o mesmo padrão do circuito controlador de nível: há uma válvula manual que funciona quando necessário e a válvula automática, instalada em *bypass*, que é acionada pelo controlador; ambas acionam de forma igualitária os queimadores. Salienta-se que o gás usado no circuito controlador de temperatura é o gás GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Ademais, é usada uma válvula solenoide para o acionamento automático, além de válvulas de pressão para ajustar, de maneira diferente, a pressão em cada queimador, de acordo com as necessidades do processo.

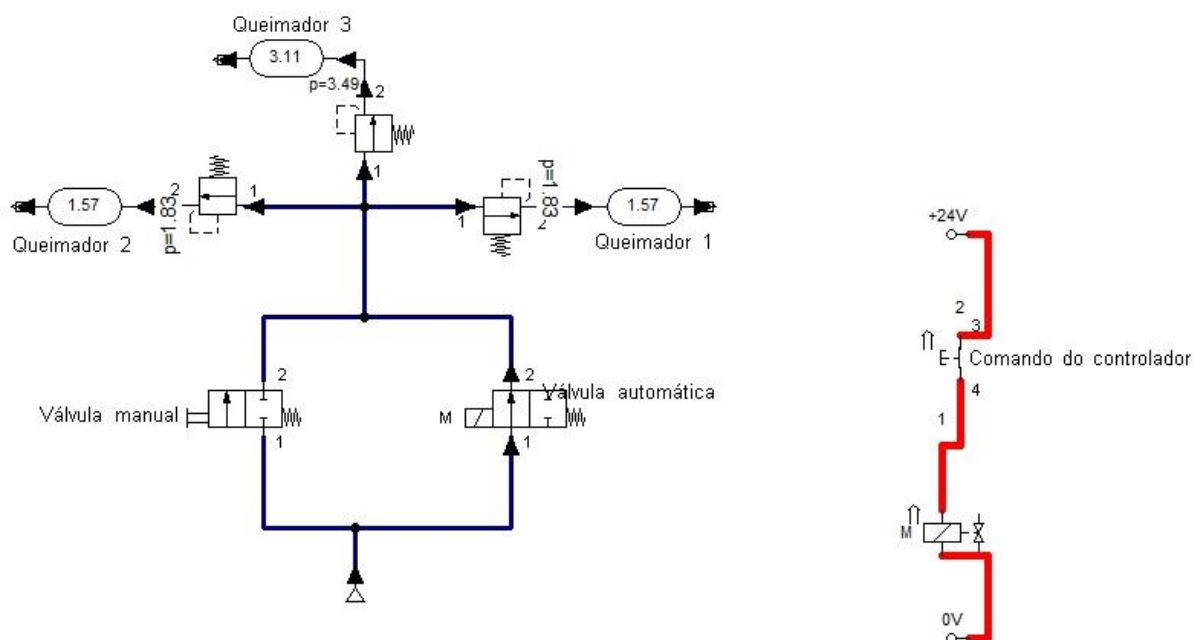


Figura 17: Atuação do controlador na válvula automática.

A figura 17 mostra o circuito controlador da temperatura evidenciando a válvula automática acionada, liberando gás para os queimadores, com o “Queimador 3” recebendo o dobro de gás.

3.3 Simulação da Pressão

Para o controle de pressão no bico pulverizador, outro circuito controlador será acionado, conforme a figura 18.

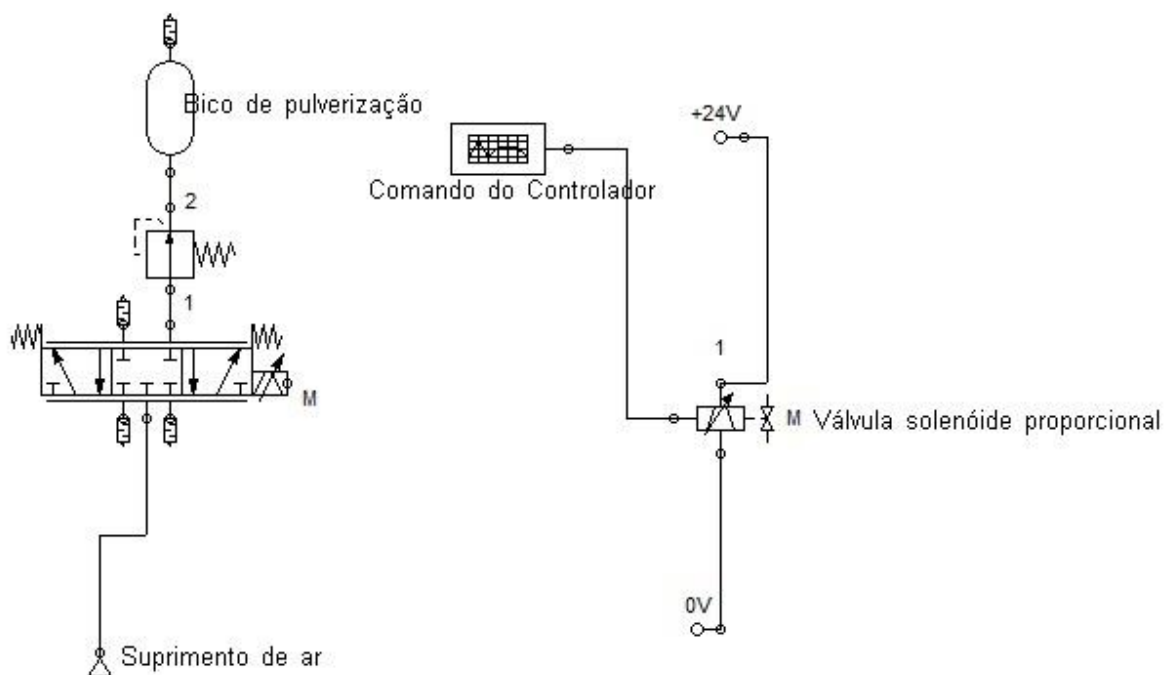


Figura 18: Circuito controlador de pressão.

A figura 18 expõe o circuito controlador em seu estado inicial, ou seja, sem nenhum comando e sem a válvula estar atuada. Comandos vindos do controlador atuam na válvula solenoide proporcional que move, liberando o fluxo de ar vindo do compressor para o bico pulverizador, conforme a figura 19.

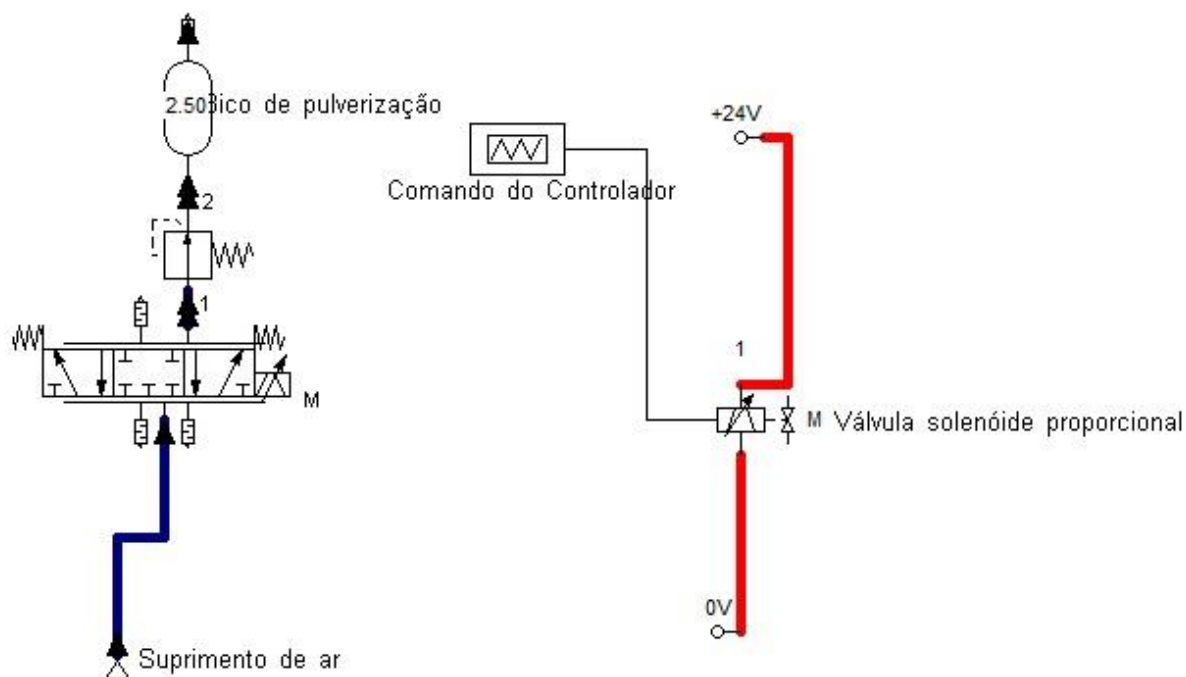


Figura 19: Circuito controlador de pressão.

De acordo com o comando do controlador, a válvula se posiciona de três maneiras diferentes, as quais foram ilustradas nas figuras 18, 19 e 20, liberando ou não ar para o bico pulverizador. As figuras 20 e 21 representam outras posições da válvula, de acordo com os comandos do controlador.

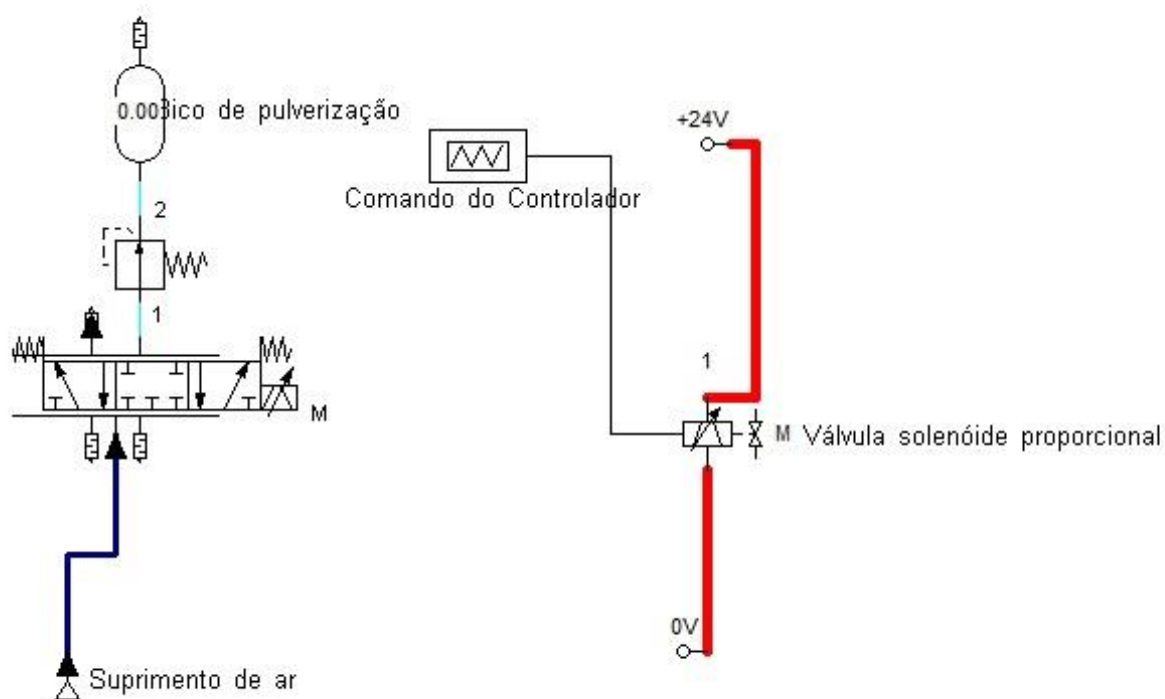


Figura 20: Sem pressão no bico pulverizador devido à posição da válvula.

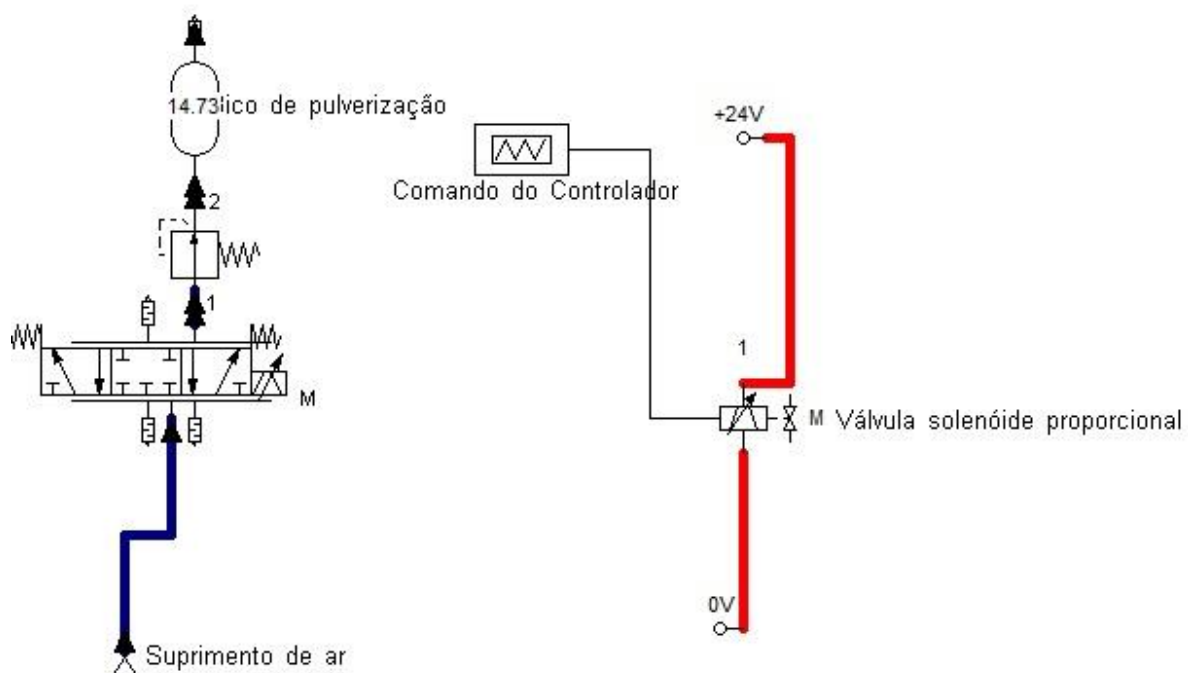


Figura 21: Pressão maior no bico.

3.4 Configuração do CLP

Conforme ressaltado na introdução e na fundamentação teórica deste trabalho, para a simulação do controle de nível e de temperatura do processo, a melhor opção para a indústria seria por CLP. Nessa medida, para programar o CLP, alguns *softwares* se fazem necessários. Entre esses, a figura 22 mostra o RSLogix Emulate 5000 que simula o módulo CLP com todos os *slots*.

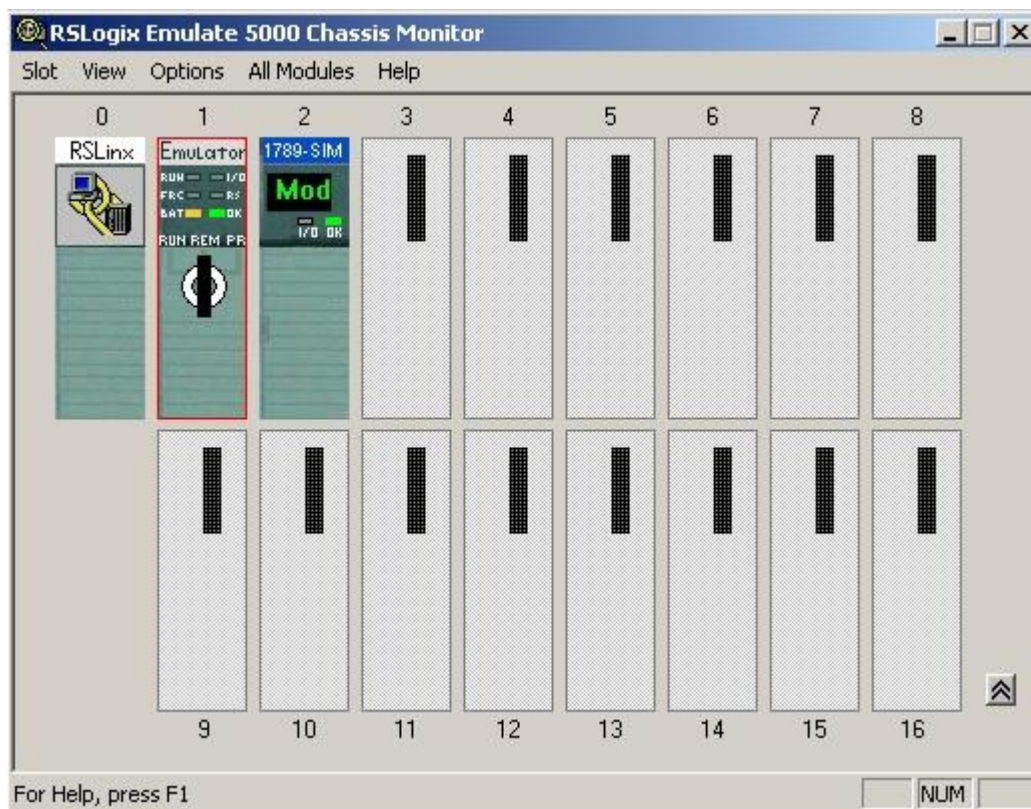


Figura 22: Tela inicial do RSLogix Emulate 5000.

Na figura 22 evidencia-se, no *slot 0*, a ligação do *software* com outro *software* usado no processo, o RSLinx. No *slot 1* é demonstrado o módulo do CLP simulando o módulo real. No *slot 2* está retratado um cartão I/O (Cartão de entradas e saídas). Todos os outros *slots* estão vazios.

Para comunicar o CLP virtual e o *software* que programa o CLP, é utilizado um programa auxiliar, o RSLinx Classic Professional.

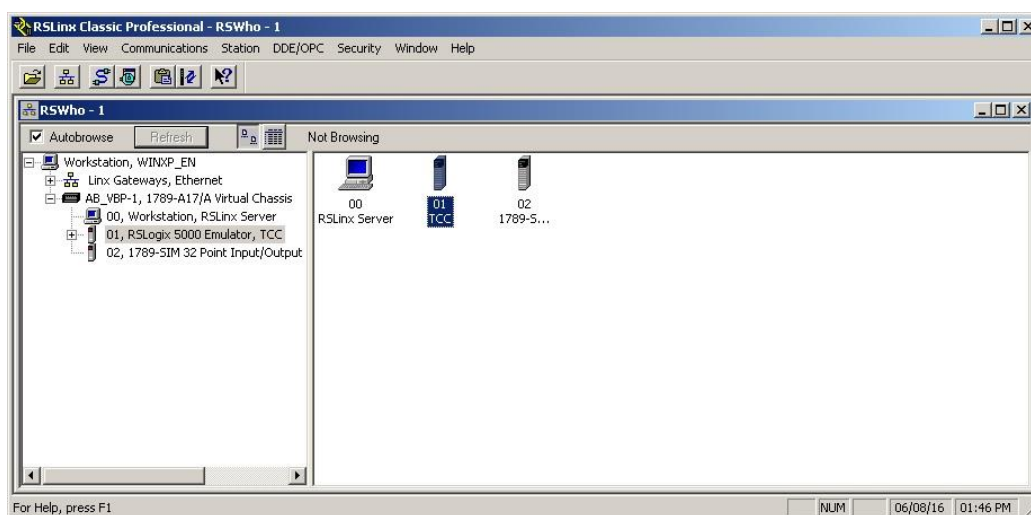


Figura 23: Tela inicial do RSLogix Emulate 5000.

Na figura 23 ilustra a tela de comunicação do RSLinx Classic. Pode-se perceber que os módulos criados no RSLogix Emulate 5000 aparecem nessa tela acompanhados pelo número do *slot* escolhido no Emulate.

Outra etapa a seguir no RSLinx é a criação do driver de comunicação entre o CLP e o RSLogix 5000.

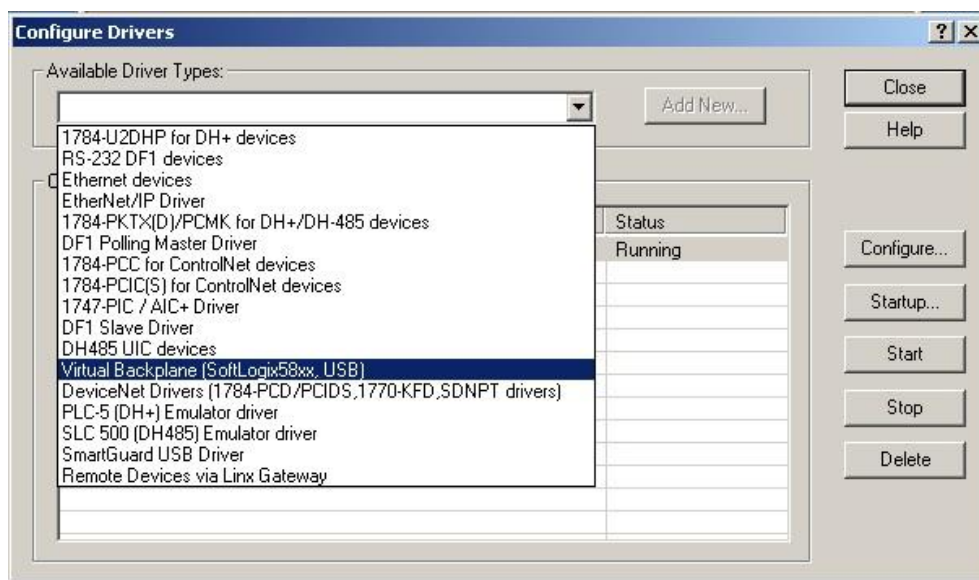


Figura 24: Tela de criação do driver de comunicação.

Na figura 24 demonstra-se a criação do driver de comunicação. Já figura 25 pode-se vê-lo em funcionamento.

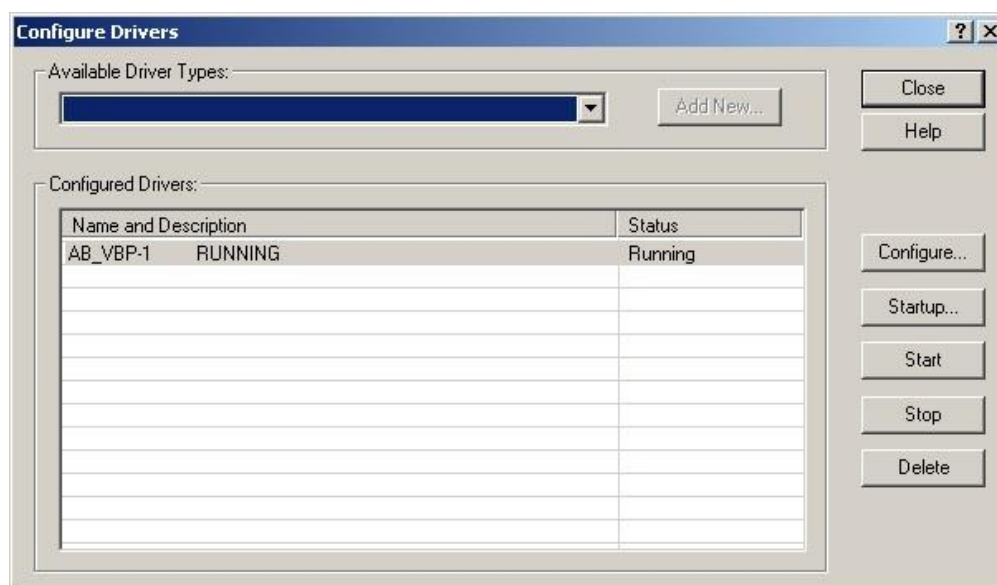


Figura 25: Tela de configuração de drivers.

A última etapa do RSLinx é a comunicação DDE/OPC. Para tanto, deve-se criar um tópico com nome idêntico ao utilizado no RSLogix para a comunicação ideal.

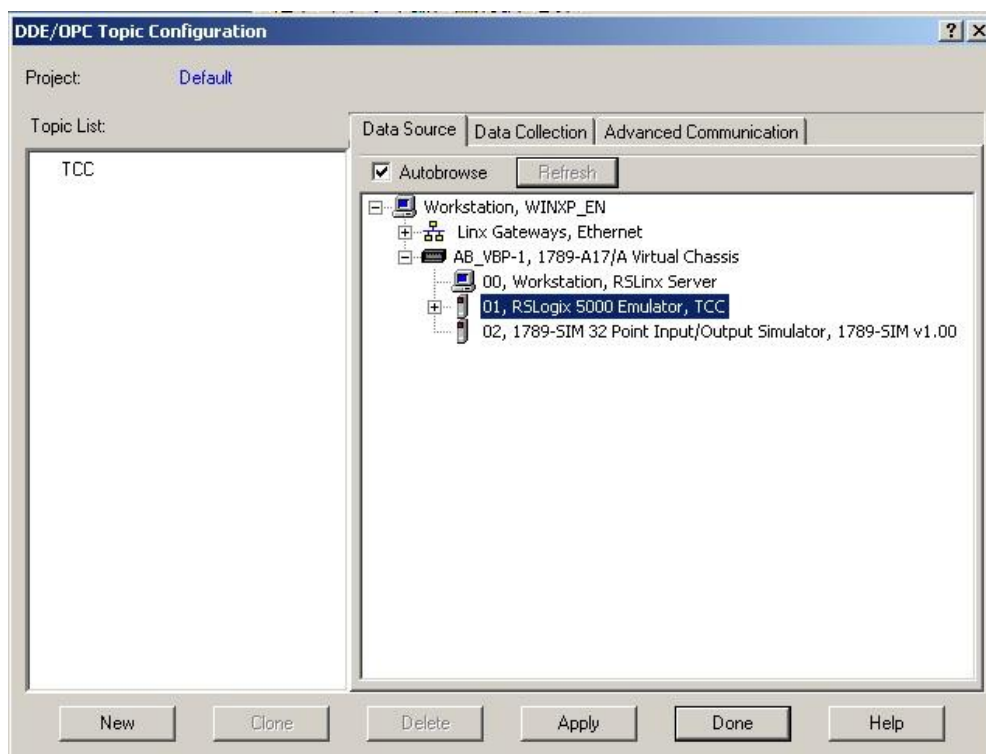


Figura 26: Tela de configuração dos tópicos.

Na figura 26 percebe-se a existência de uma ligação entre o tópico listado em Topic List e o CLP emulado e locado no *slot* 1 no RSLogix Emulate.

Após configurar esses *softwares*, faz-se uso do RSLogix 5000 para configurar, programar e modificar os CLP's. Para a comunicação entre esses *softwares*, como nos outros, é preciso configurar o programa para a comunicação.

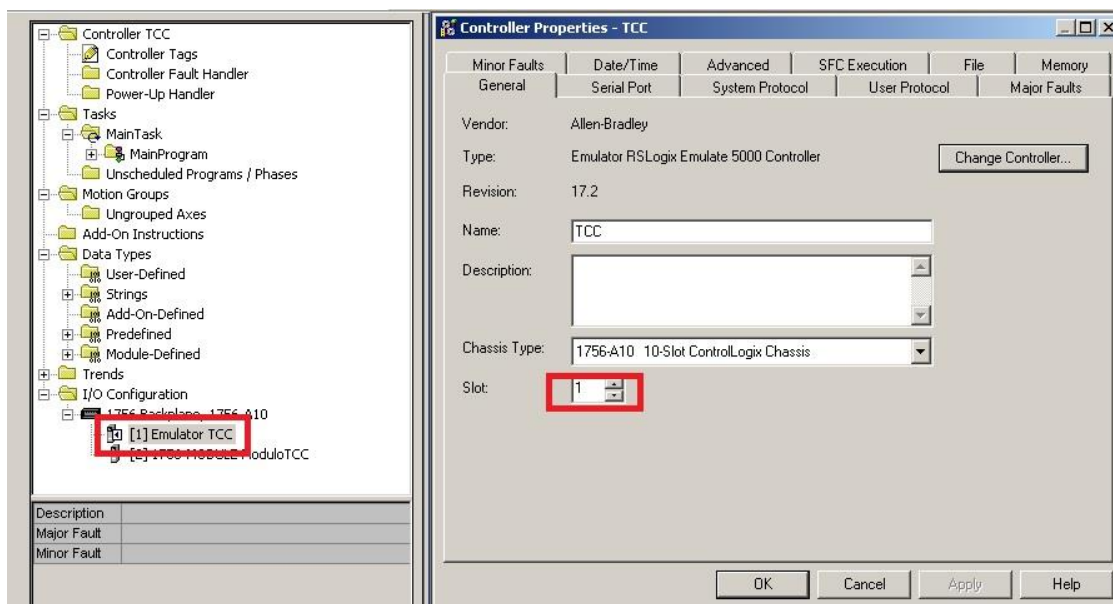


Figura 27: Tela de configuração do controlador no RSLogix 5000.

Depois de se criar um novo projeto no RSLogix 5000, é necessário configurar o controlador. A figura 27 mostra essa configuração.

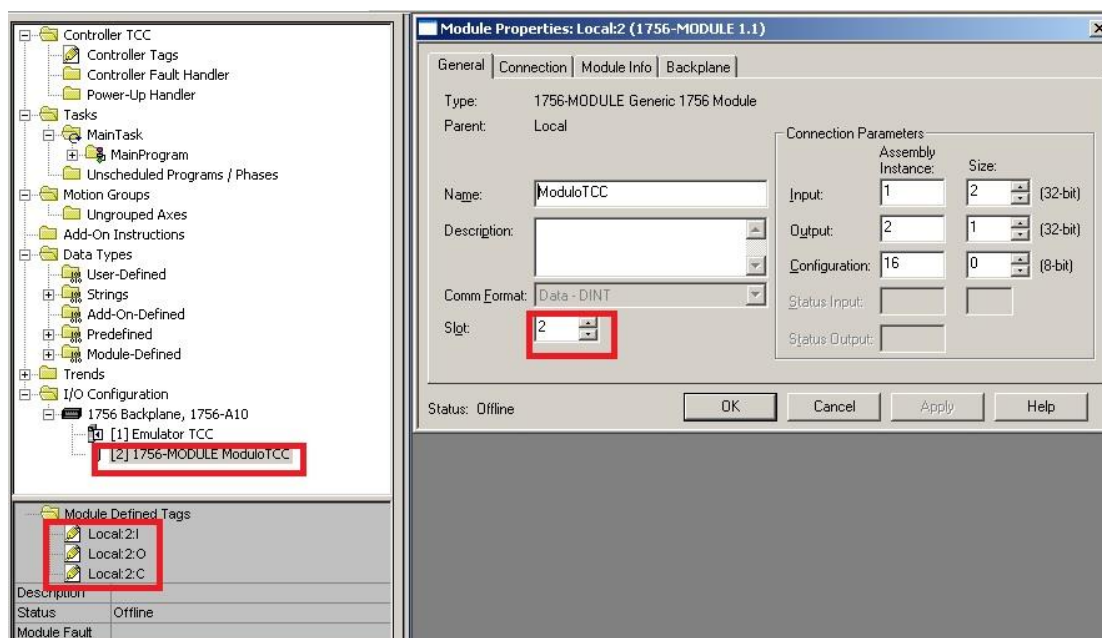


Figura 28: Tela de configuração do módulo I/O no RSLogix 5000.

Para programar as entradas e saídas do CLP, também é necessário configurar o módulo I/O no RSLogix 5000. A figura 28 ilustra essa configuração. No “Module Defined Tags” pode-se ver a criação das entradas e saídas indicadas por “Local”, seguidas pelo número do slot do módulo I/O no RSEmulate no caso “2”, e pela letra representativa de entrada e saída (I para input e O para output).

3.5 Configuração do Fluidsim

Outro *software* usado para simular o processo é o FLUIDSIM. Esse *software* simula as válvulas de comando e atuadores. Nesse caso, também se faz necessária a configuração para comunicação com os outros *softwares*. O FLUIDSIM comunica com o RSLinx através da comunicação OPC; o RSLinx funcionando como OPC Server.

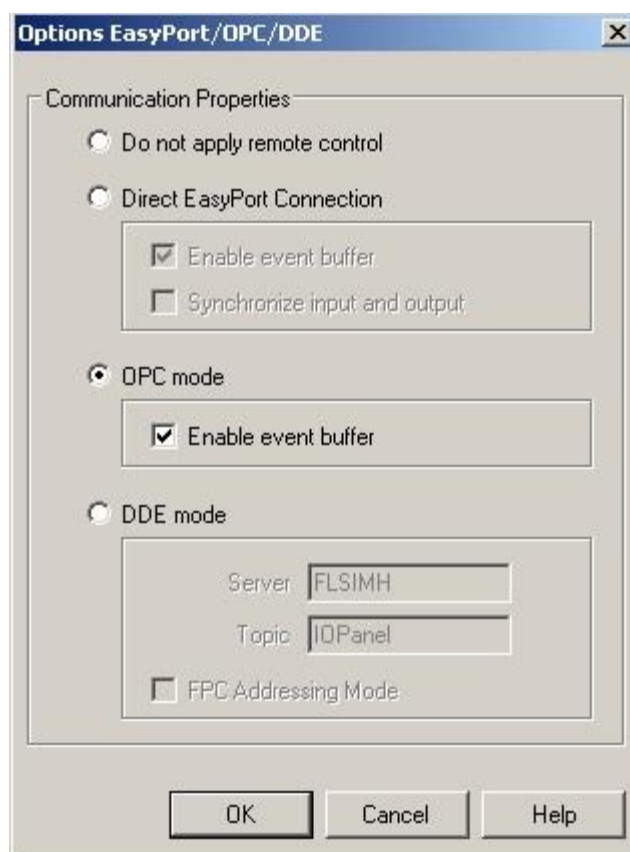


Figura 29: Tela de opção de seleção do modo de comunicação.

A figura 29 apresenta a tela de escolha do modo de comunicação na aba Opções no FLUIDSIM. Nessa tela, escolheu-se o modo OPC. Selecionada a opção de comunicação, parte-se para a configuração dos módulos de entrada e saída disponíveis no FLUIDSIM, conforme a figura 30.

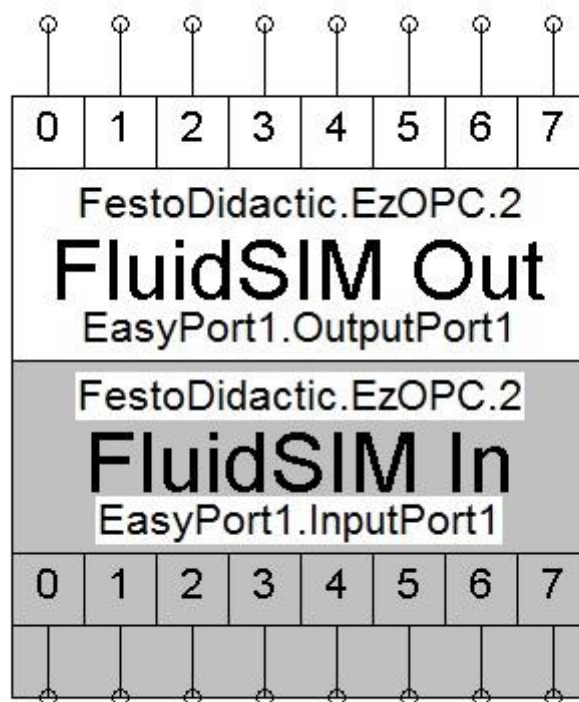


Figura 30: Módulos de entradas e saídas do FLUIDSIM nas configurações padrão.

Para selecionar o server OPC, clica-se no módulo e abre-se a tela de configuração apresentada na figura 31.

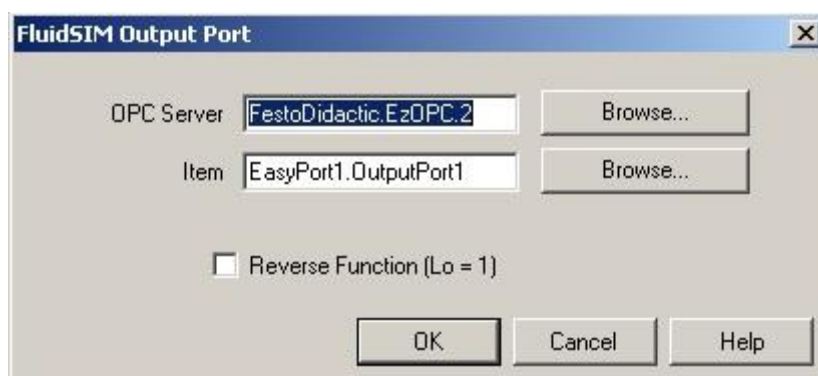


Figura 31: Tela padrão do módulo de saídas do FLUIDSIM.

A figura 31 evidencia o módulo de saídas, porém o módulo de entradas apresenta a mesma forma de configuração, sendo necessário configurá-los separadamente.

Entrando na opção “Browse”, percebe-se que o programa mostra as opções de server disponíveis.

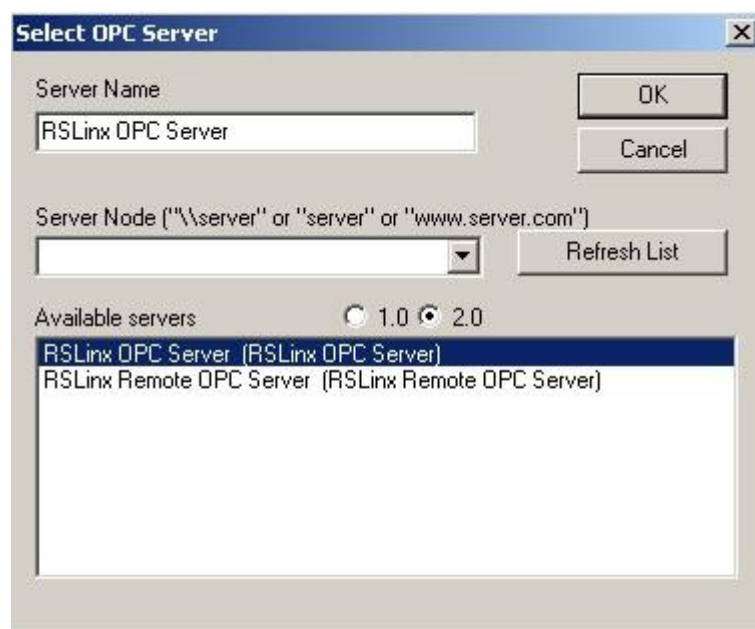


Figura 32: Tela padrão de seleção do server OPC no FLUIDSIM.

Na figura 32 aparecem os servers disponíveis, além de oferecer opção de “Server Node” para servers em outras máquinas ou domínios.

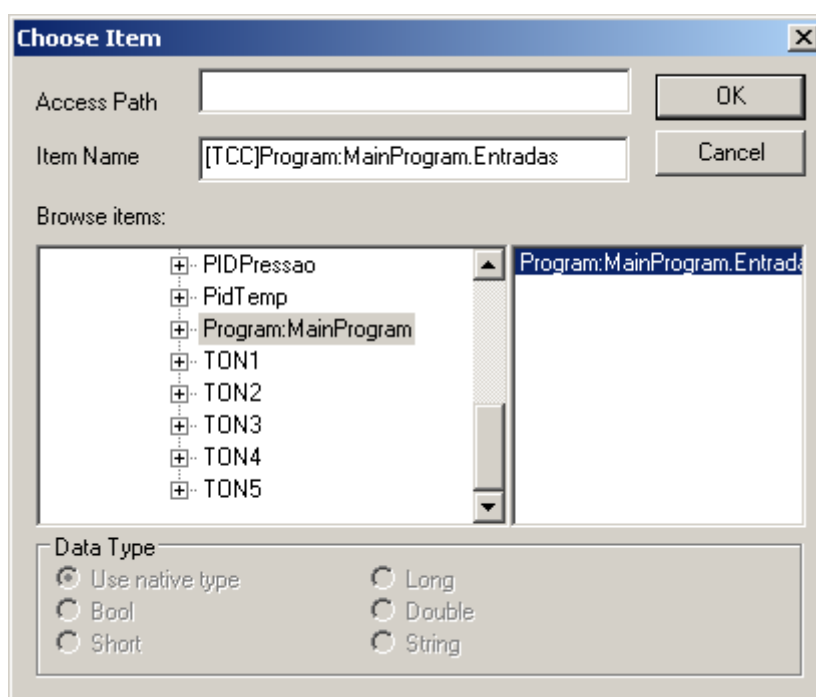


Figura 33: Tela padrão de seleção do item OPC no FLUIDSIM.

A figura 33 evidencia a tela mostrada quando se clica em “Browse”, presente na opção Item da figura 31. Nesse momento, o programa traz automaticamente todas as Tags criadas no RSLogix.

3.6 Configuração do supervisório

Para o sistema supervisório foi utilizado o *software* Intouch versão de demonstração. Para comunicar o Intouch com os demais programas também foram necessárias algumas configurações.

Ao se criar uma aplicação no Intouch, é necessário elaborar um “Access Names” para comunicar com o RSLinx e ter acesso às Tags criadas no RSLogix. A figura 34 ilustra, na aba “TOOLS”, a opção a ser escolhida para acessar ao “Access Names”.

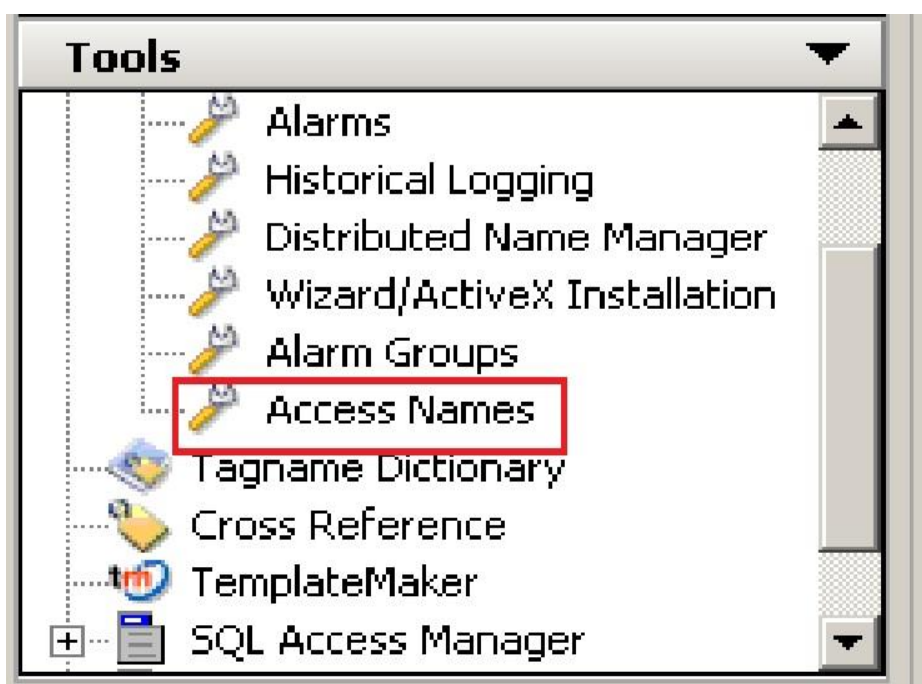


Figura 34: Aba Tools do Intouch.

Após acessar o “Access Names”, a tela mostrada na figura 35 evidencia a opção “Add” por meio da qual é possível criar um novo “Access Name”.



Figura 35: Tela Acces Names do Intouch.

Ao clicar em “Add”, uma tela, como a ilustrada na figura 36, apresentar-se-á, evidenciando algumas opções importantes para a comunicação do Intouch com o RSLinx.



Figura 36: Tela Add Access Names do Intouch.

Na tela de adição de “Access Names”, na opção Access, deve-se inserir o nome escolhido. Em “Node Name”, deve-se escolher, se o RSLinx estiver em outro computador ou outro domínio, o IP do computador no qual está hospedado. Em

“Application Name”, deve-se colocar o nome da aplicação a se comunicar, RSLinx, no caso. Em “Topic Name”, insere-se o nome do tópico criado no RSLinx, de acordo com a figura 26. Em seguida, marca-se a opção “DDE” em protocolo a ser usado. Após essa etapa, deve-se criar as Tags no Intouch usando o “Access Names” criado, empregando o mesmo nome das Tags criadas no RSLogix.

3.7 Programação dos controles

Configurada a comunicação entre todos os *softwares*, parte-se para a programação do CLP, usando o RSLogix, a linguagem Ladder e a linguagem de diagramas de blocos. Para tanto, inicia-se pelas funções de transferências das malhas de controles para o nível do cadinho, para a temperatura do forno de espera e para a pressão do bico pulverizador.

The LDLG instruction uses this equation:

$$H(s) = \left[\frac{1 + Lead \times s}{1 + Lag \times s} \right]$$

Figura 37: Função Lead-Lag do RSLogix.

A figura 37 representa o bloco de função “Lead-Lag” utilizado no RSLogix. Como é possível notar, zerou-se o “Lead” para a função ficar idêntica às funções de transferências das malhas de controles de todos os processos, as quais foram evidenciadas no referencial.

Primeiramente, criou-se a função “Lead-Lag” para o nível do cadinho, que representa a função de transferência citada no referencial deste estudo e evidenciada na figura 8.

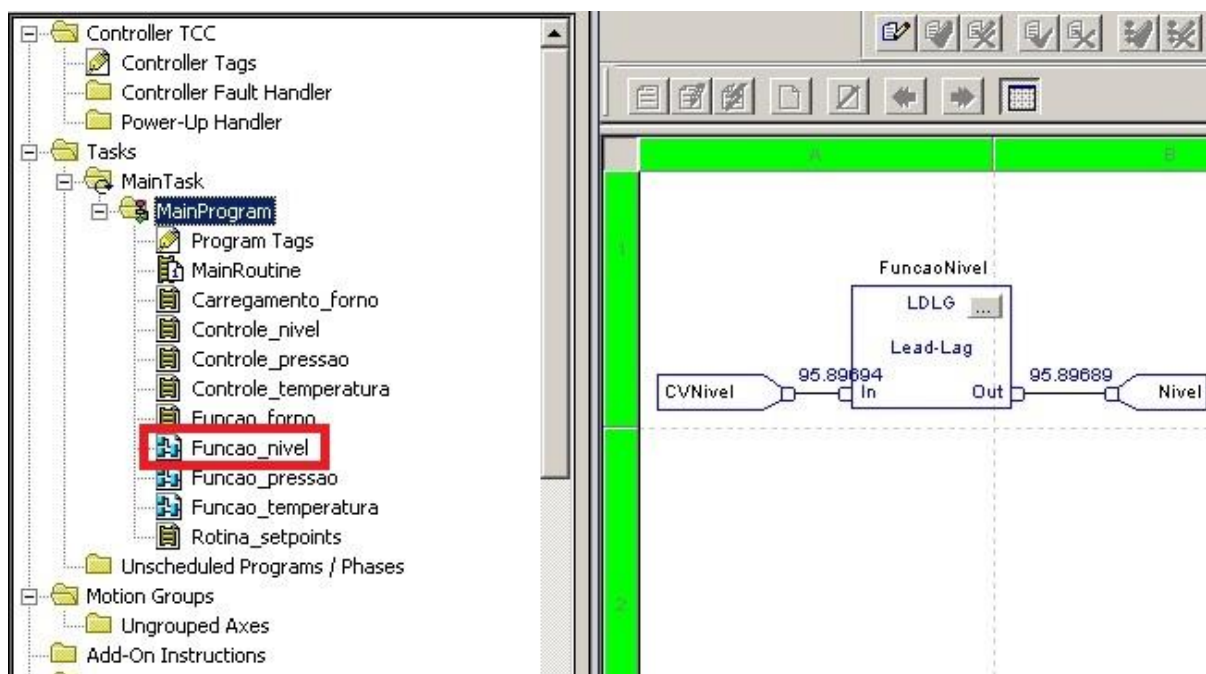


Figura 38: Bloco de função “Lead-Lag” da rotina “Funcao_nivel”.

A figura 38 evidencia a rotina chamada “Funcao_nivel” em ligação de diagrama de blocos, por meio da qual foi criada a função “Lead-Lag” de nível do cadinho, contendo uma entrada e uma saída.

Na figura 39 destaca-se que a opção “Lead” está em zero, além do que o “Lag” não está zerado, fato que mantém as propriedades da função de transferência de nível do cadinho.

Apresenta-se, na figura 40, a função “Lead-Lag” que representa a função de transferência da malha de controle de temperatura do forno de espera, ilustrada na figura 7. Nota-se que existe uma entrada e uma saída.

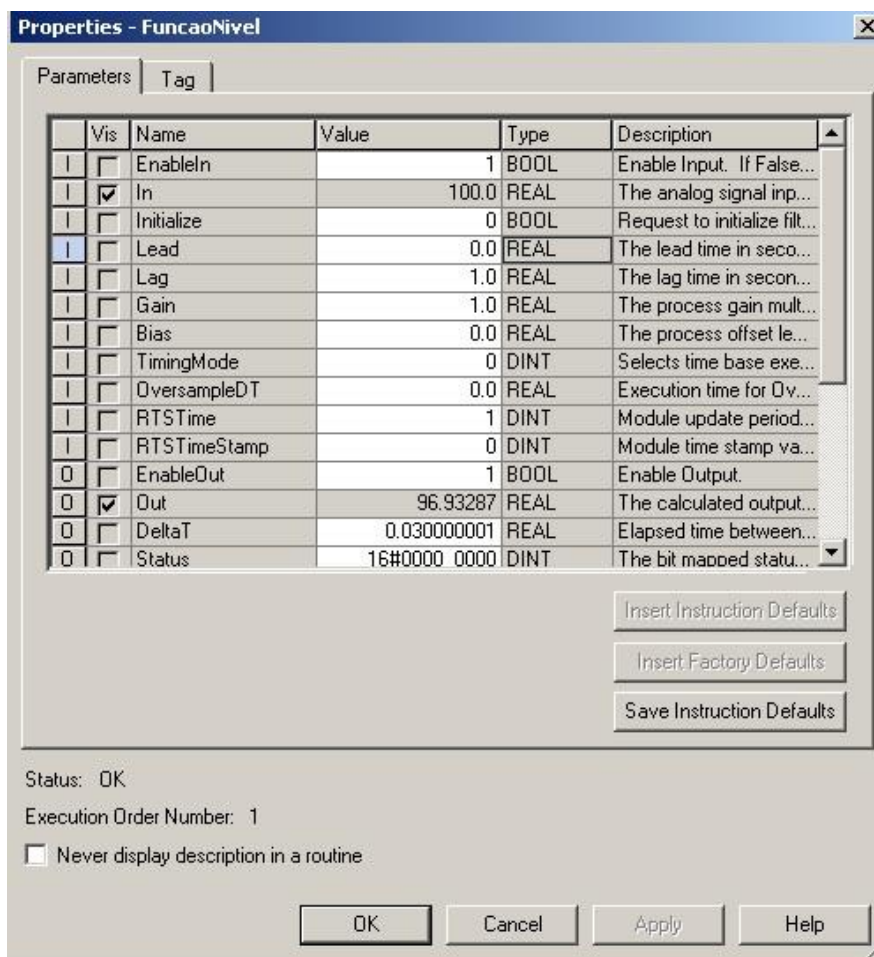


Figura 39: Propriedades do bloco “Lead-Lag” do nível do cadinho.

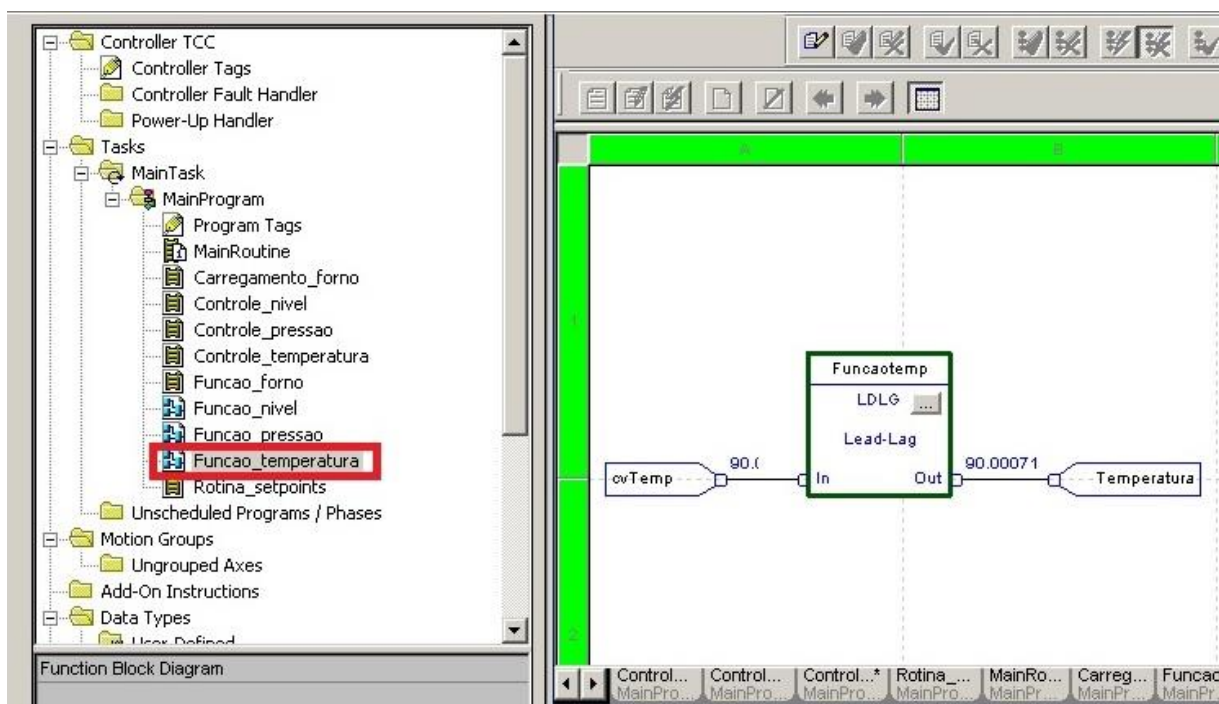


Figura 40: Bloco de função “Lead-Lag” da rotina “Funcao_temperatura”.

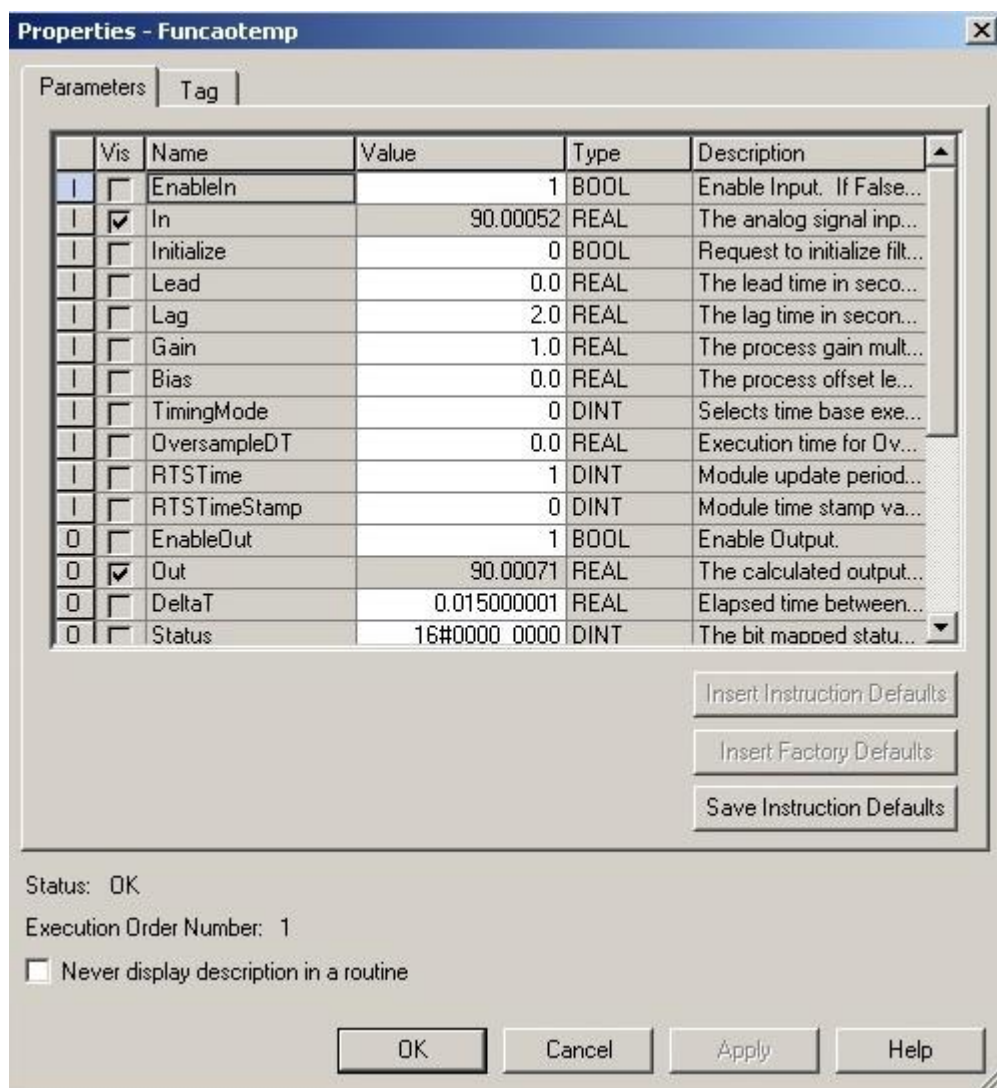


Figura 41: Propriedades do bloco “Lead-Lag” da temperatura do forno de espera.

Da mesma forma como se configurou o “Lead-Lag” do nível do cadinho, configura-se o “Lead-Lag” da temperatura do forno de espera, conforme figura 41. Nesta, observa-se que o “Lead” está zerado, porém em “Lag” optou-se por inserir um valor maior do que o do nível do cadinho, para simular o atraso que a temperatura tem em relação ao nível (temperatura é uma variável muito lenta).

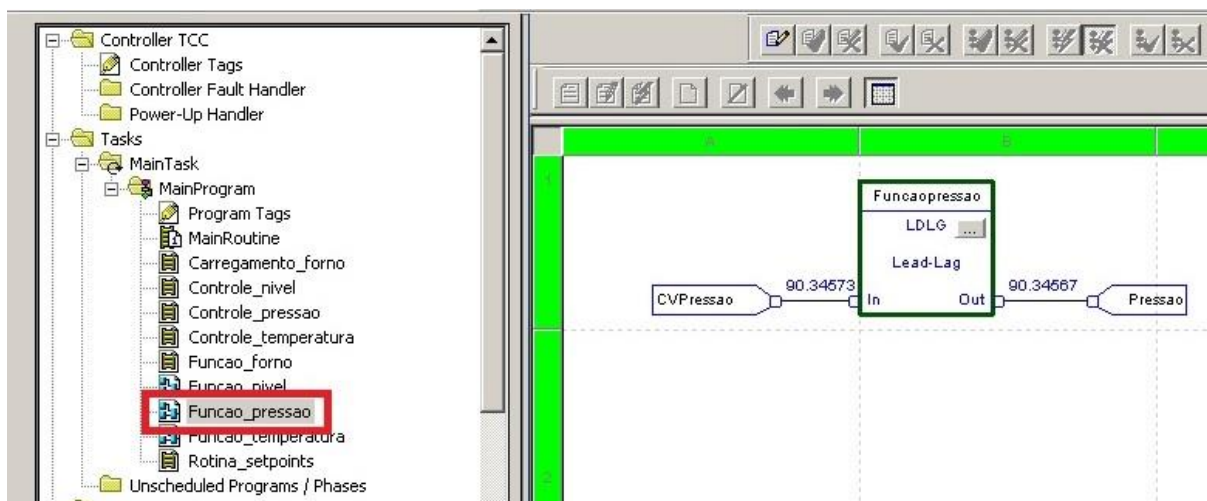


Figura 42: Bloco de função “Lead-Lag” da rotina “Funcao_temperatura”.

Na figura 42 apresenta-se a função “Lead-Lag” que representa a função de transferência da malha de controle da pressão do bico pulverizador ilustrada na figura 9. Nota-se que existe uma entrada e uma saída.

As entradas das funções “Lead-Lag” da temperatura, do nível e da pressão estão ligadas às CV’s dos PID’s respectivos; já as saídas das funções “Lead-Lag” estão ligadas às PV’s dos PID’s, os quais simulam os valores de sensores, portanto, realimentando as malhas de controle dos respectivos processos.

As figuras 43, 44 e 45 mostram os PID’s dos processos, evidenciando as CV’s e as PV’s tagueadas idênticas às entradas e às saídas das funções “Lead-Lag”.

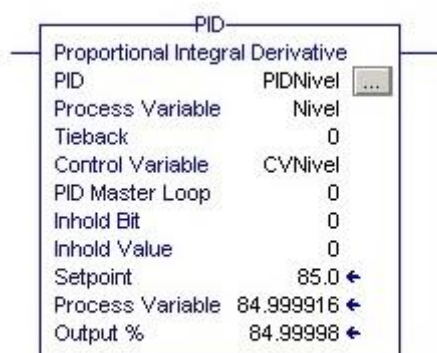


Figura 43: Bloco PID de controle do nível do cadinho.

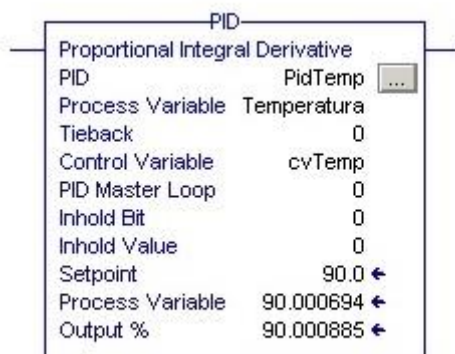


Figura 44: Bloco PID de controle da temperatura do forno de espera.

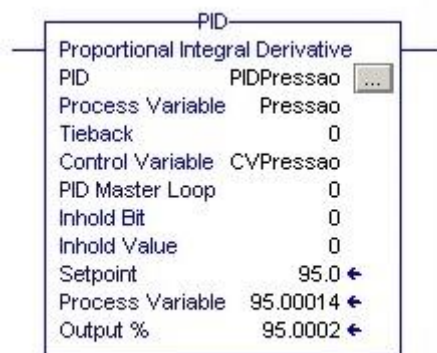


Figura 45: Bloco PID de controle da pressão do bico pulverizador.

A programação em ladder e todas as rotinas desenvolvidas no CLP estão apresentadas no apêndice deste documento em forma de figuras.

3.8 Criação do sistema supervisório

Com o CLP programado, parte-se para a criação de um supervisório, a fim de facilitar a operação, com telas de supervisão do processo, comandos e visualização de alarmes. A aplicação do supervisório conta com duas telas. A primeira é a tela principal, conforme figura 46. Nessa estão representados o forno de espera, o cadinho e o comando para iniciar e parar o processo. Essa tela permite, ainda, a visualização de alarmes, de *setpoints* e de valores de nível no cadinho, pressão no bico pulverizador e temperatura no forno de espera. Além disso, conta com a visualização do nível do forno de espera, bem como os indicadores de carregamento do forno de espera.

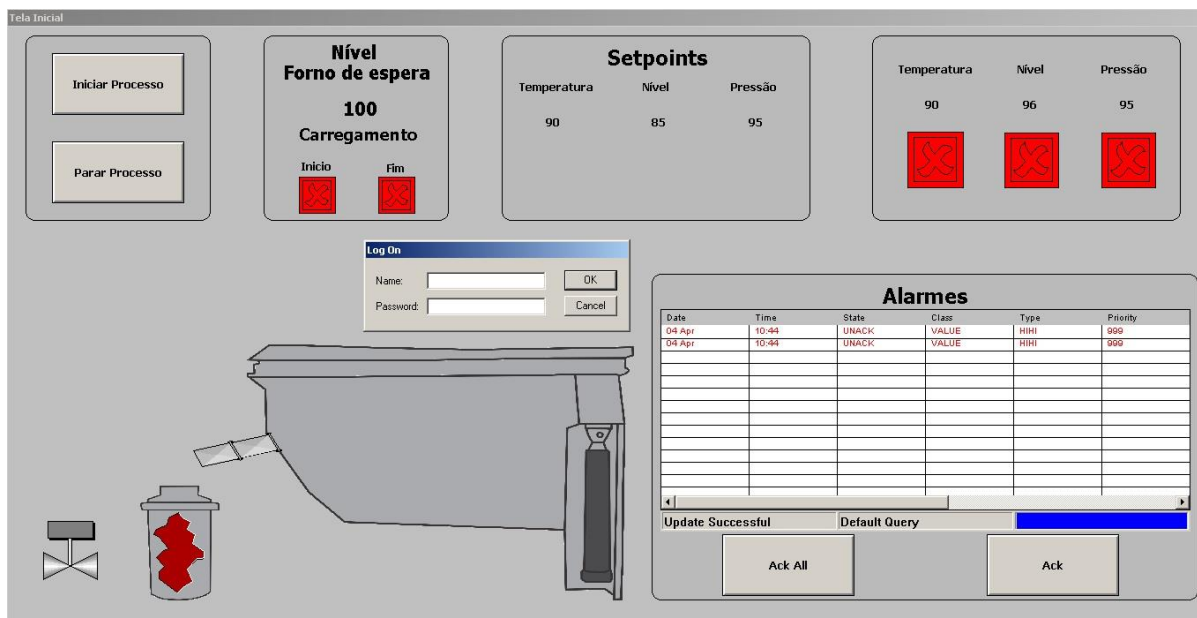


Figura 46: Tela principal do supervísório.

A segunda tela (figura 47) possibilita a edição dos valores de *setpoints* do processo. Ela é aberta por um botão de editar *setpoints* na tela principal e apenas é acessada com o *login*, com nível de segurança compatível.

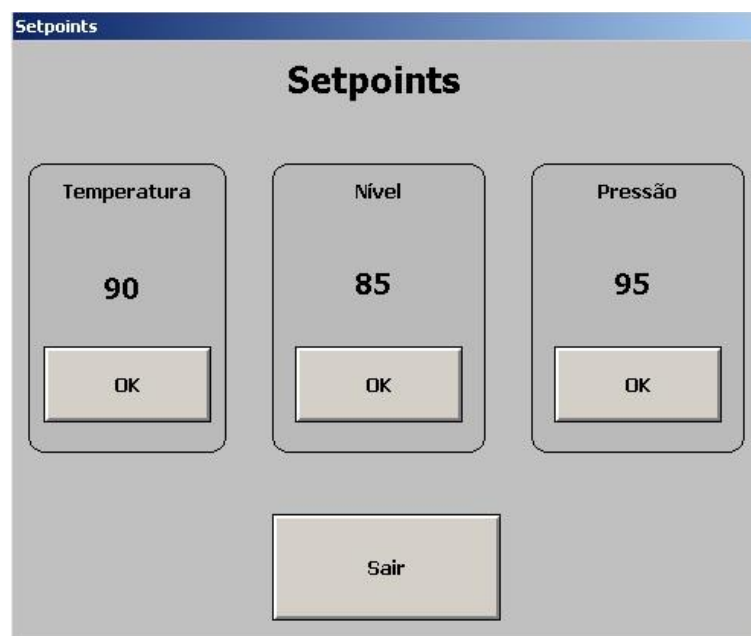


Figura 47: Tela "Setpoints" do sistema supervísório.

Quando se inicia o sistema supervísório, ele abre a tela inicial e, por conseguinte, a tela "Log On" para o reconhecimento de qual usuário está operando o sistema supervísório. Salienta-se, sobre esse aspecto, que é possível adicionar vários usuários com níveis de acesso (segurança) diferentes.

Ressalta-se ainda que na tela inicial, no quadro de alarmes, existem dois botões, o botão “Ack All” (acknowledge all) e o botão “Ack” (acknowledge). O primeiro reconhece todos os alarmes ativados, já o segundo reconhece apenas o alarme selecionado.

O botão “Editar *Setpoints*” só fica visível quando o usuário logado possui nível de acesso 9999, que é o último nível. Logo, apenas quem tiver esse nível de acesso terá permissão de adentrar na tela “*Setpoints*” e editar os valores de *setpoints* do processo.

Para representar o forno de espera, duas imagens foram empregadas, a saber: uma quando o forno está na posição inicial recuado, confira figura 48; e outra quando o forno está basculhado, conforme figura 49.

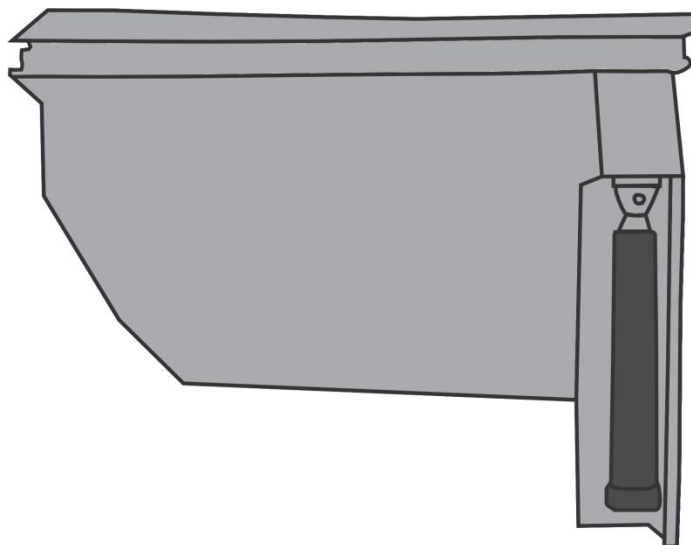


Figura 48: Imagem do supervisório do forno recuado.

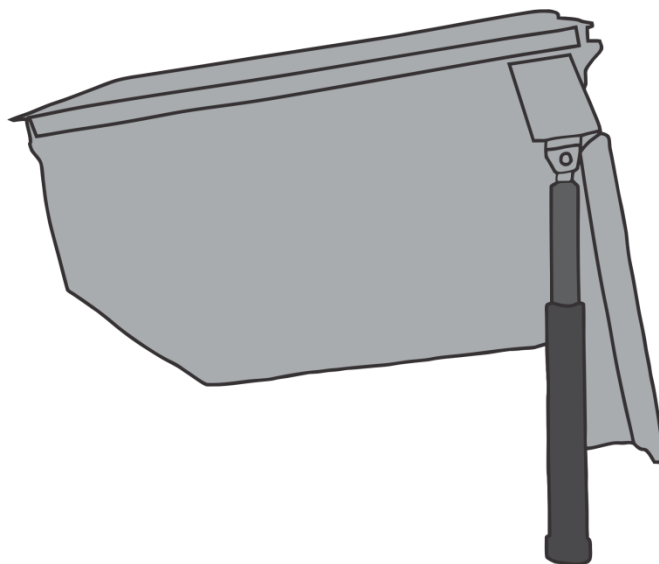


Figura 49: Imagem do forno basculado no supervisório.

Para representar o queimador atuando no processo, uma chama foi inserida no supervisório, conforme figura 50. Para melhor representação da chama, foram incluídas duas imagens: uma que segue o forno recuado e uma que segue o forno basculado. Para isso, uma pequena programação foi inserida no *script* da tela, conforme figura 51.

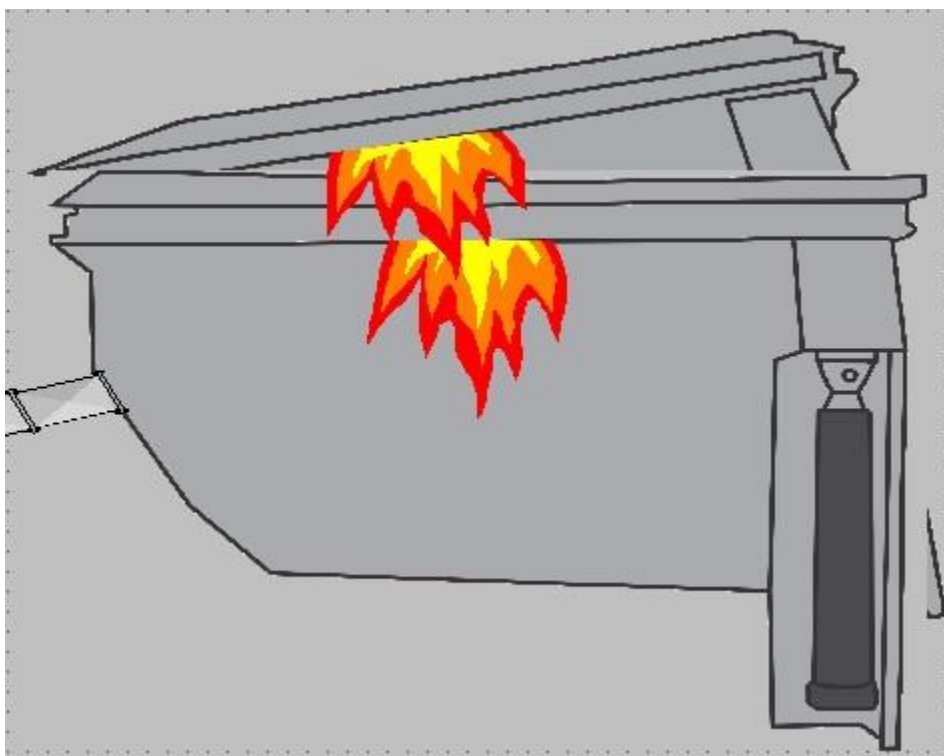


Figura 50: Chama representando queimador acionado tanto para o forno basculado quanto para forno recuado.

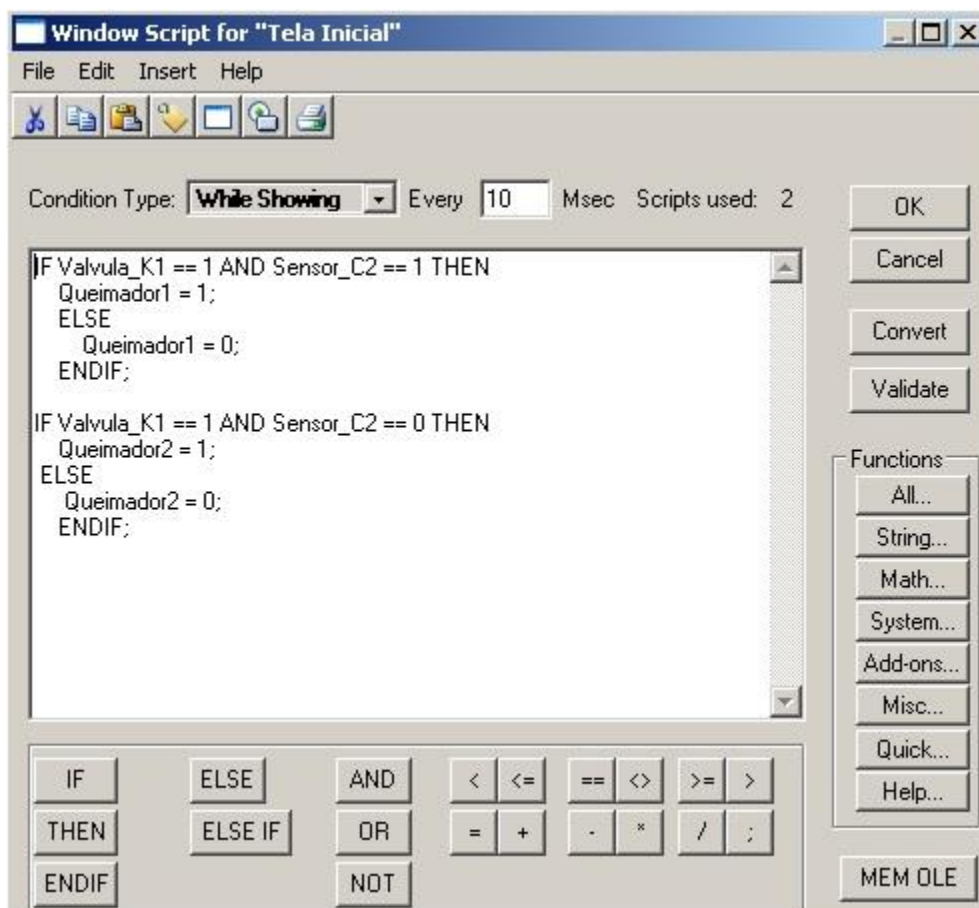


Figura 51: Script da tela inicial para posição da chama de acordo com estado do forno.

Como é possível observar na figura 51, quando a “Valvula_K1”, que representa a válvula automática do queimador, estiver acionada e o “Sensor_C2”, que representa o forno basculado, também estiver acionado, ele aciona o “Queimador1”, que representa a imagem da chama que acompanha o forno basculado. Já quando a “Valvula_K1” estiver acionada, porém o “Sensor_C2” não estiver, ele aciona o “Queimador2”, que representa a chama que acompanha o forno recuado.

A válvula proporcional de controle de pressão no bico pulverizador está ilustrada na figura 52. No supervisor, quando ela está acionada, uma linha vermelha em volta de toda a válvula a representa em funcionamento, conforme figura 53.

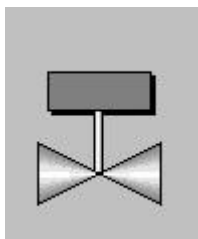


Figura 52: Válvula que representa a válvula proporcional de controle de pressão no bico pulverizador.

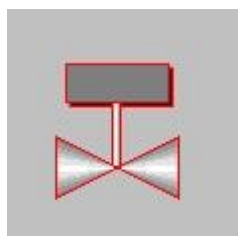


Figura 53: Válvula que representa a válvula proporcional de controle de pressão no bico pulverizador acionada.

Para representar o nível do cadinho, criou-se a imagem demonstrada na figura 54. Nela, verifica-se que o nível é representado pela cor vermelho e a parte sem líquido retratada pela cor vermelho escuro.



Figura 54: Representação do cadinho e do nível do cadinho no supervisório.

4. Resultados obtidos

Para o controle de nível em lógica de *steps* utilizando o *software* didático da Festo, o Fluidsim Hidráulico, os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que o sistema correspondeu aos estímulos introduzidos no controlador PID.

4.1 Controle de Nível

A figura 55 mostra como ficou a montagem final para o controle de nível no Fluidsim.

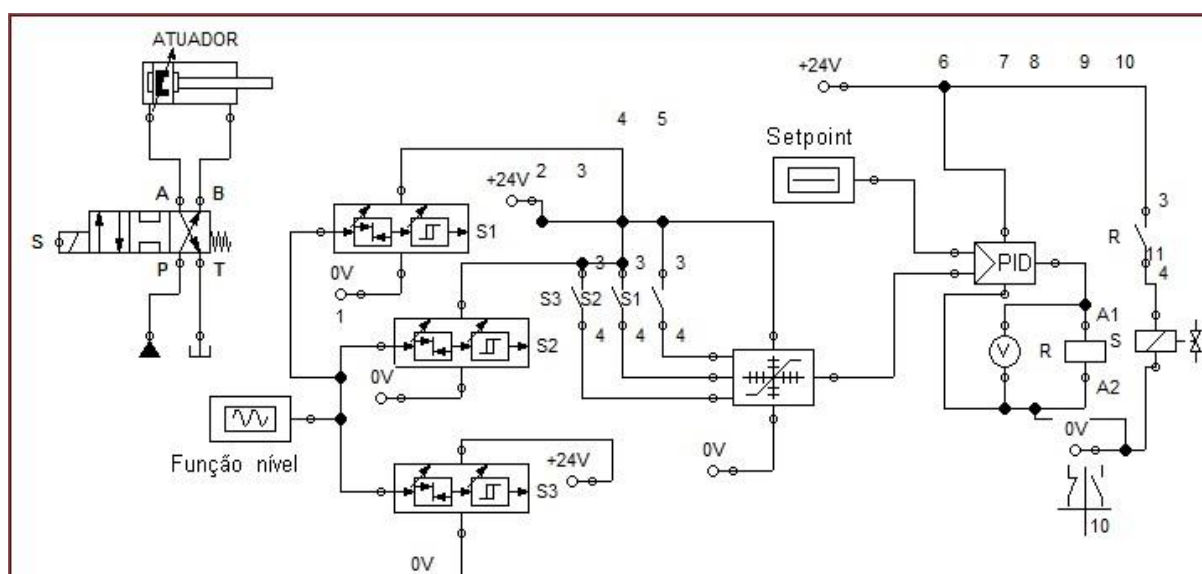


Figura 55: Montagem final do atuador (pistão) para controle de nível no cadinho.

A figura 55 evidencia apenas o *by-pass* da válvula automática. Na função nível, foram introduzidos S1, S2 e S3, que funcionam como instrumentos, fazendo a lógica de *steps*.

As figuras 56, 57, 58 e 59 demonstram os resultados em formas de gráficos diretos do Fluidsim, evidenciando o atuador, o *setpoint*, os *steps* e a função representativa do nível.

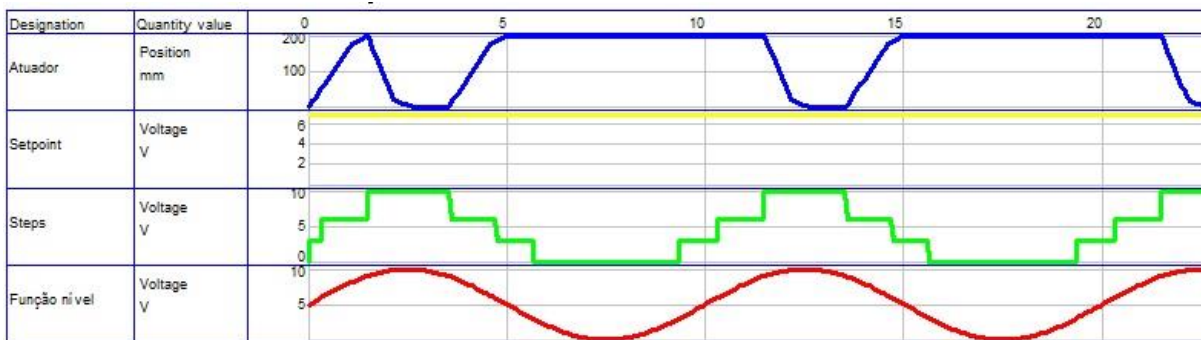


Figura 56: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função senoidal do nível.

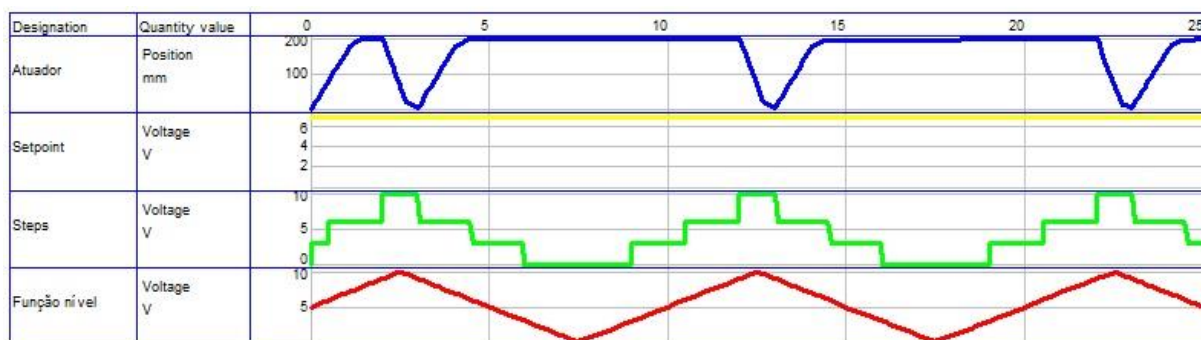


Figura 57: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função triangular do nível.

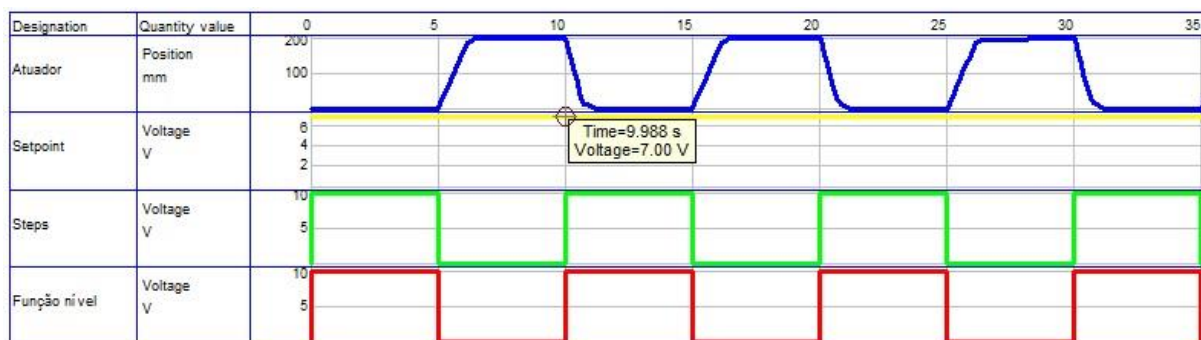


Figura 58: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função retangular do nível.



Figura 59: Gráfico de simulação da resposta do atuador em função aleatória do nível.

Para essa aplicação foi proposto três sensores termopares tipo K (S1, S2 e S3) que, na presença do alumínio líquido, detectariam um aumento na temperatura e

indicariam o nível de alumínio líquido no cadinho. A localização dos sensores foi proposta de acordo com a figura 60.

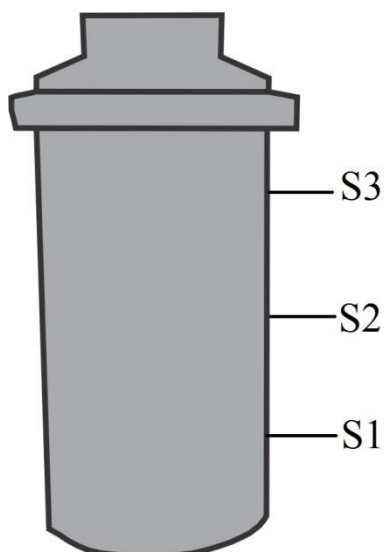


Figura 60: Disposição de sensores no cadinho.

4.2 Controle de Temperatura

Para a simulação da temperatura no Fluidsim pneumática, os resultados foram satisfatórios, visto que atenderam à demanda do processo. A montagem final do controle de temperatura está demonstrada na figura 61.

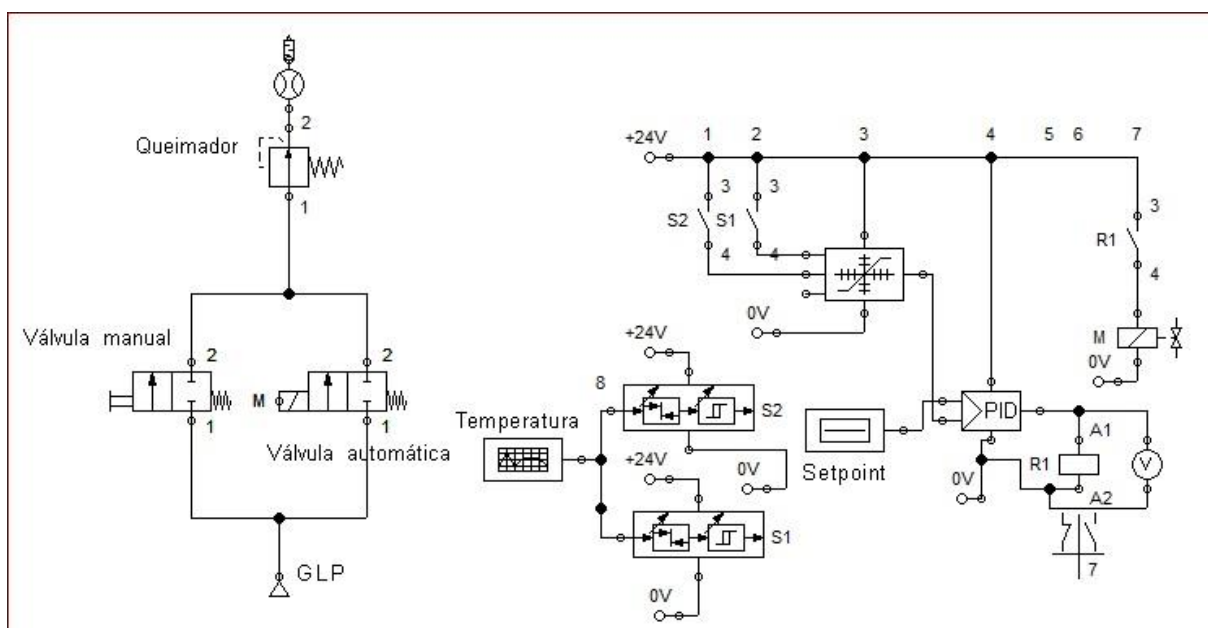


Figura 61: Configuração final do processo de controle de temperatura do forno de espera.

Os resultados estão evidenciados em forma de gráficos, conforme as figuras 62, 63, 64 e 65. Na figura 61, percebem-se dois sensores, S1 e S2, que delimitam a faixa de operação e garantem redundância e segurança ao processo. Os sensores escolhidos para esse fim são termopares do tipo K, por serem os mais indicados às circunstâncias desta pesquisa, além de serem os sensores usados (porém manualmente) atualmente na fábrica.

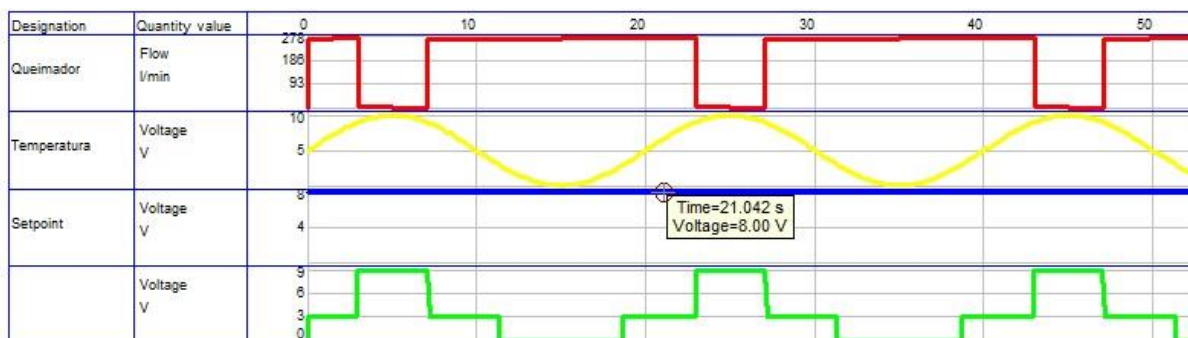


Figura 62: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno de espera em função senoidal.

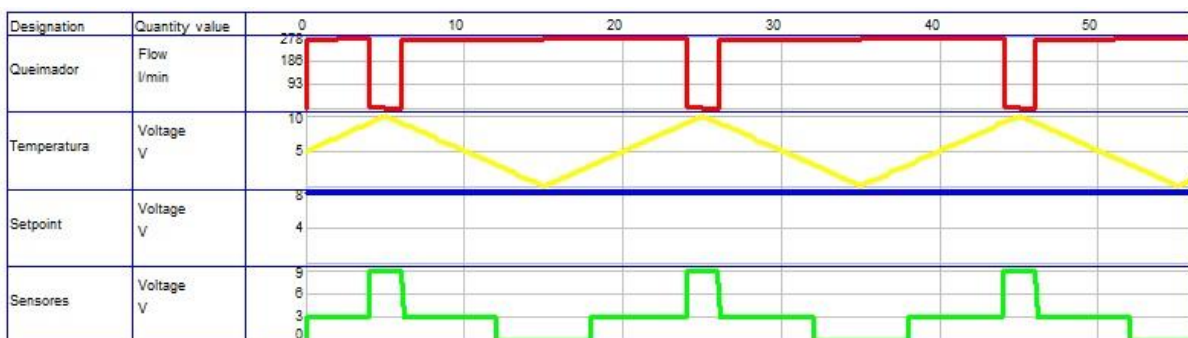


Figura 63: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno em função triangular.



Figura 64: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno em função retangular.



Figura 65: Gráfico de simulação do controle da temperatura do forno em função aleatória.

4.3 Controle de Pressão

Para o controle de pressão no bico pulverizador, os resultados obtidos também foram satisfatórios, pois atendem à demanda do processo. A montagem final no Fluidsim pneumática é ilustrada na figura 66.

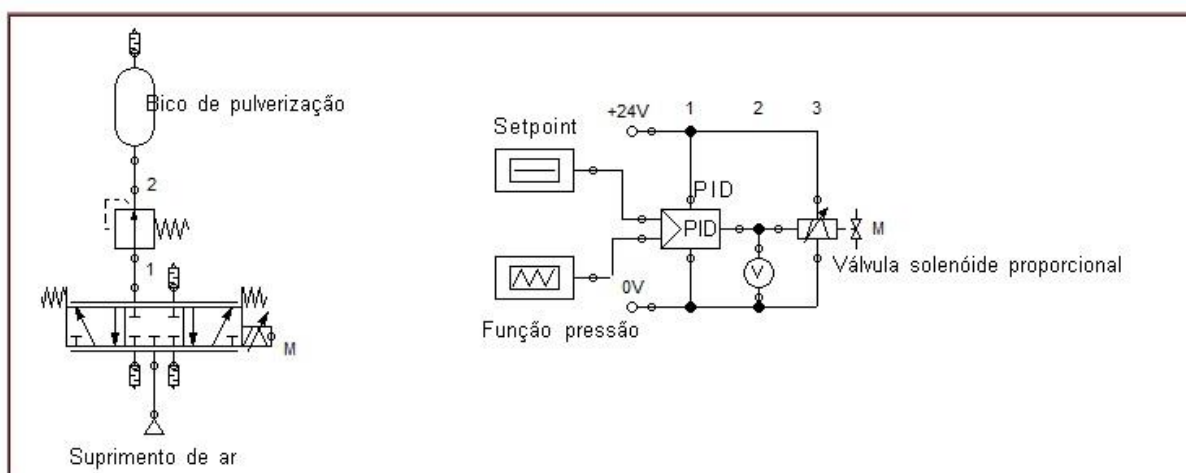


Figura 66: Configuração da simulação do controle de pressão no bico pulverizador.

Na figura 66, está representado o *by-pass* com a válvula automática acionada pela válvula solenoide proporcional. O balão de pressão está retratando o bico pulverizador.

Os resultados do experimento estão evidenciados em forma de gráficos nas figuras 67, 68, 69 e 70.

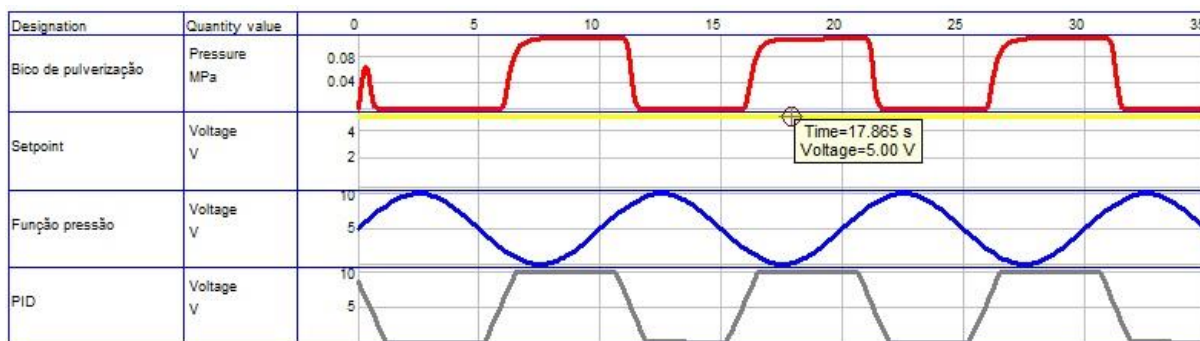


Figura 67: Gráfico de simulação do controle de pressão com função senoidal da pressão.

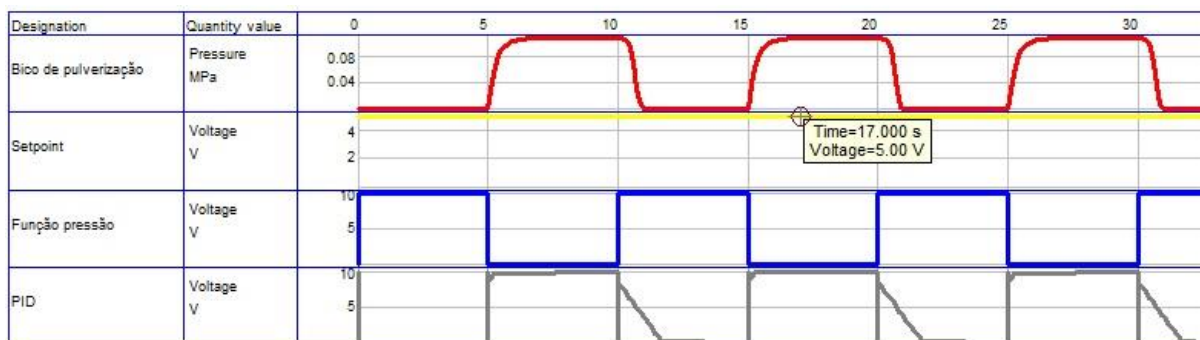


Figura 68: Gráfico de simulação do controle de pressão com função retangular da pressão.

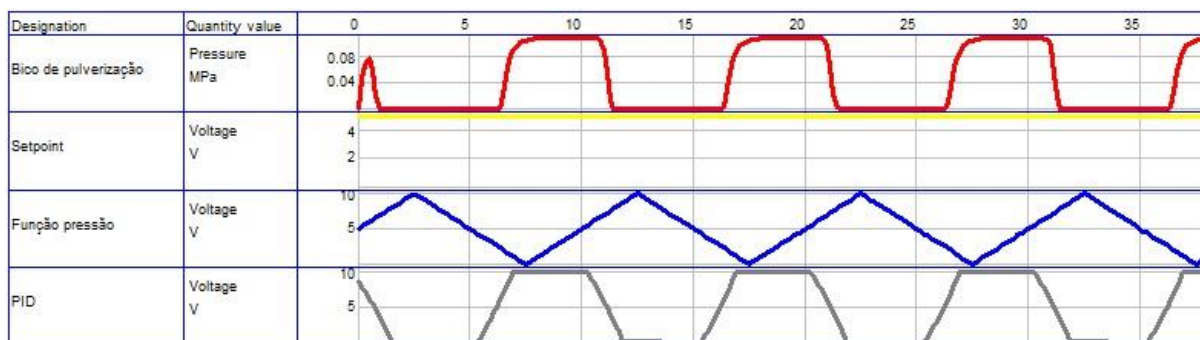


Figura 69: Gráfico de simulação do controle de pressão com função triangular da pressão.

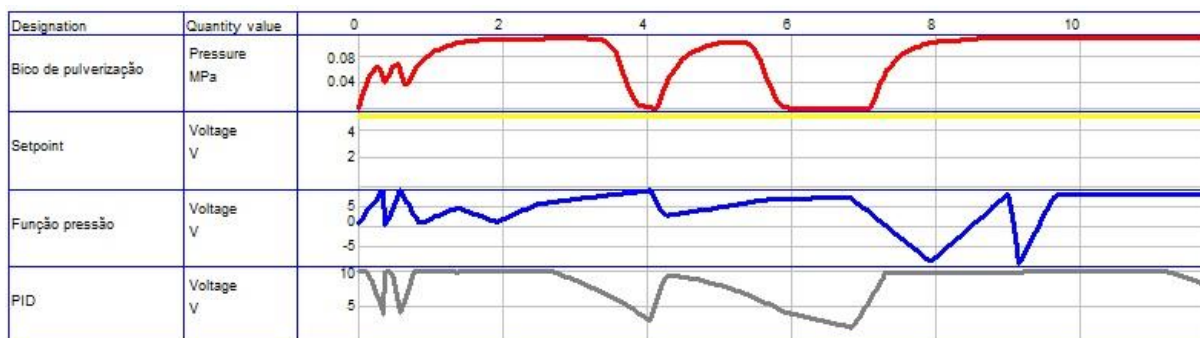


Figura 70: Gráfico de simulação do controle de pressão com função aleatória da pressão.

4.4 Controles via CLP

Com o controle das malhas funcionando separadamente no Fluidsim, parte-se para o controle usando o CLP, visto que, pelo exposto no referencial deste trabalho, o CLP é o controlador mais indicado para o ambiente industrial, além de ser uma demanda da própria empresa, pois, no futuro, seu uso possibilitará a implementação de automação de outros processos usando o mesmo equipamento.

Para simular o pistão, utilizou-se o Fluidsim hidráulica, porém, com comando vindo do CLP, um módulo I/O foi implementado no Fluidsim hidráulica para receber os dados do CLP. O mesmo acontece com a pressão e a temperatura no Fluidsim pneumática. As figuras 71 e 72 ilustram o resultado final.

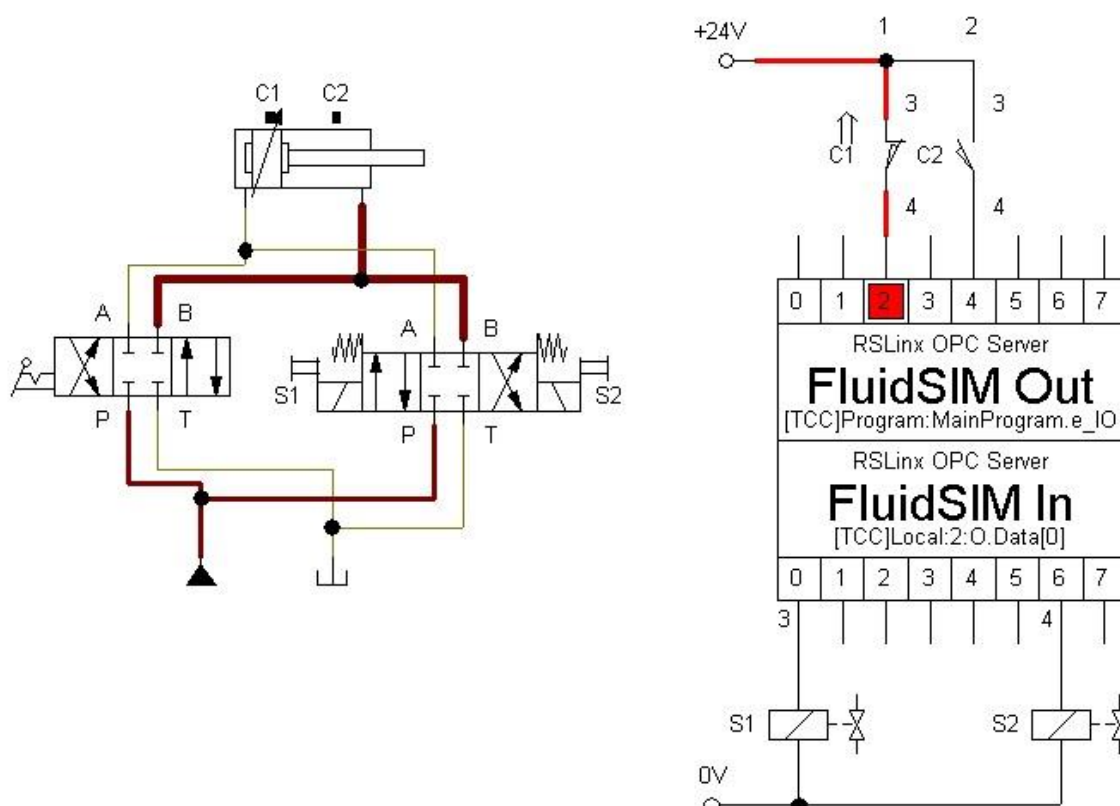


Figura 71: Configuração e módulo I/O para controle do nível do cadinho.

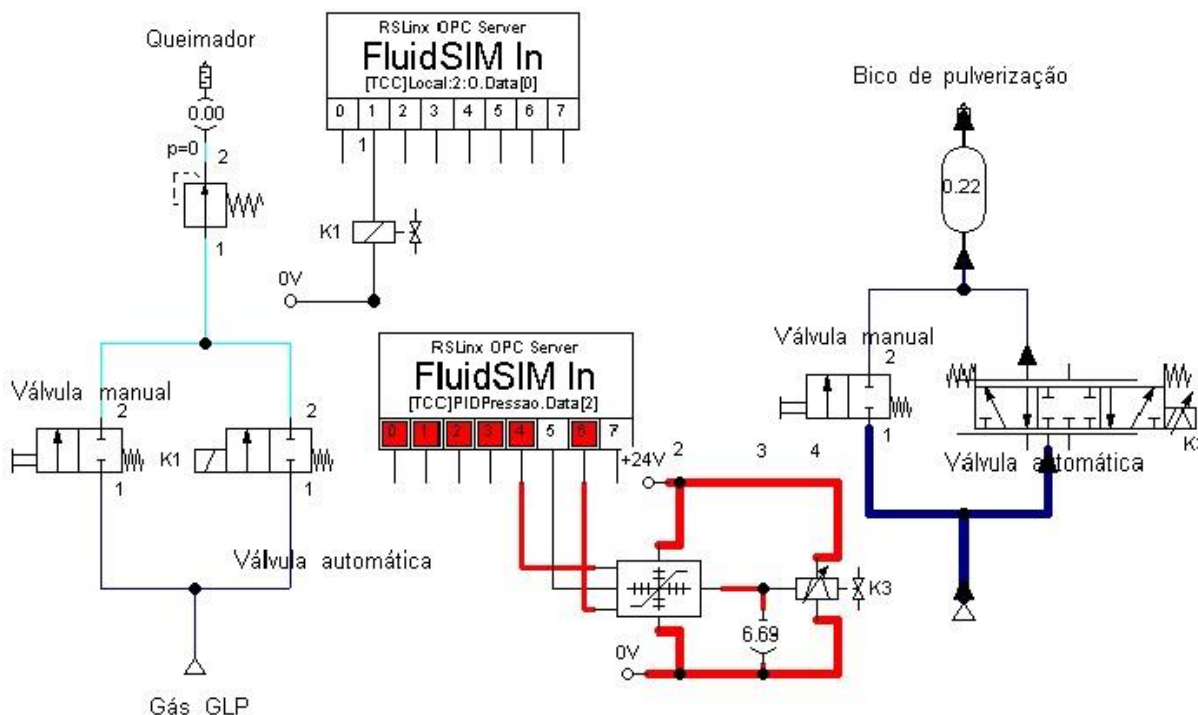


Figura 72: Módulo de entradas para comandos no queimador e no bico pulverizador.

Para a válvula solenoide proporcional, fez-se necessário criar um módulo I/O independente, pois ela trabalha com valores analógicos. No RSLogix Emulate, que simula o CLP, não foi possível simular o cartão analógico, então converteu-se o valor analógico vindo do PID no CLP em valor analógico no Fluidsim.

Para converter o valor digital em analógico, um cartão de *setpoint* foi inserido na saída do módulo I/O do Fluidsim, porém esse cartão de *setpoint* tem apenas três entradas, ou seja, três *bits*. Nessa medida, a combinação desses três *bits* oferece oito valores diferentes. Já o módulo I/O tem oito *bits*, os quais oferecem cento e vinte e oito valores positivos.

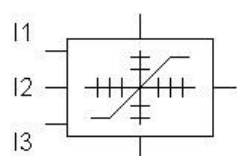
Para a conversão, dividiu-se cento e vinte e oito (número de valores do módulo I/O) por oito (número de valores do cartão de *setpoint*) e obteve-se o valor de dezesseis, sendo essa faixa a ser considerada para a conversão. O quadro 3 mostra os valores dentro das faixas e seus respectivos *bits* acionados (valor igual a um) quando atingido os valores respectivos.

Tabela 3: Bits acionados de acordo com os valores no PID.

Valor	bit 0	bit 1	bit 2	bit 3	bit 4	bit 5	bit 6	bit 7
16	0	0	0	0	1	0	0	0
32	0	0	0	0	0	1	0	0
48	0	0	0	0	1	1	0	0
64	0	0	0	0	0	0	1	0
80	0	0	0	0	1	0	1	0
96	0	0	0	0	0	1	1	0

De acordo com a tabela 3, apenas os *bits* 4, 5 e 6 alteraram o valor, e os valores acima de cem foram descartados (cento e doze e cento e vinte e oito), pois o processo varia de zero a cem. Além desses valores, foi adicionado o valor zero para indicar quando a válvula não foi acionada.

As figuras 72 e 73 ilustram o funcionamento do cartão de *setpoint*, comparando as entradas e as saídas.



W1: I1= 0, I2= 0, I3= 0

W2: I1= 1, I2= 0, I3= 0

W3: I1= 0, I2= 1, I3= 0

W4: I1= 1, I2= 1, I3= 0

W5: I1= 0, I2= 0, I3= 1

W6: I1= 1, I2= 0, I3= 1

W7: I1= 0, I2= 1, I3= 1

W8: I1= 1, I2= 1, I3= 1

Figura 73: Entradas do cartão de *setpoint*.

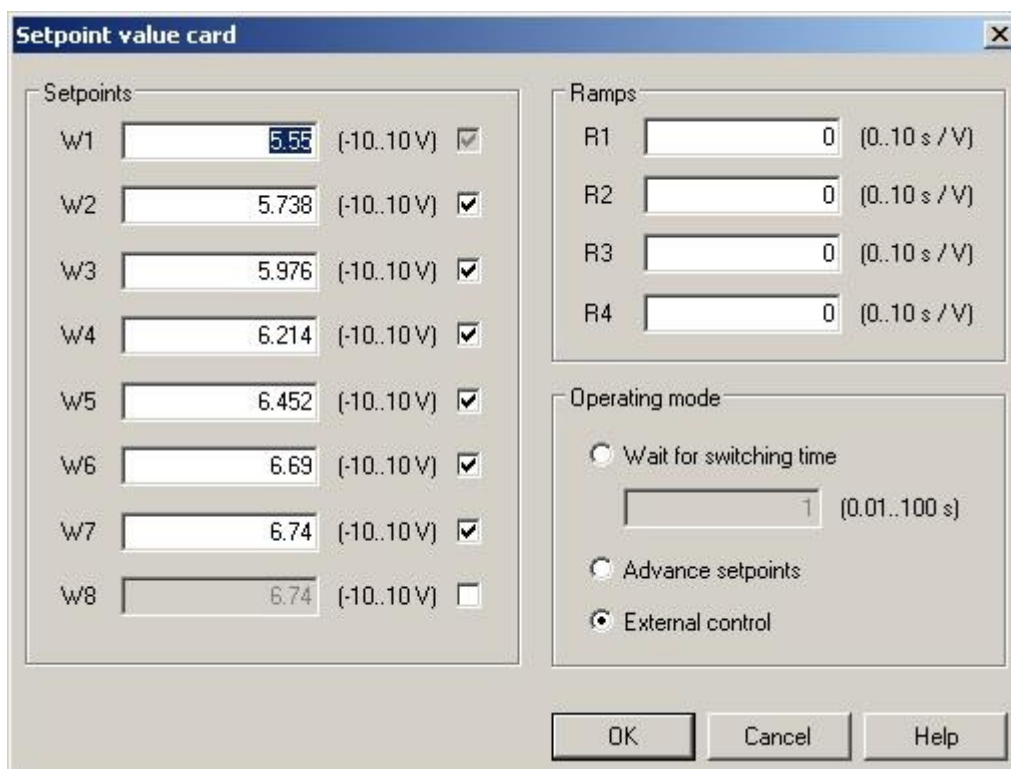


Figura 74: Configuração das saídas do cartão *setpoint*.

A figura 74 mostra que o último valor (W8) não foi usado. Além disso, o “W1” foi configurado com um valor que não aciona a válvula proporcional.

O valor de “5.55 V”, através de testes, é o maior valor para o qual a válvula não é acionada. Já o valor de “6.74 V” é o menor valor para o qual a válvula libera o máximo de gás. Portanto, a faixa de atuação da válvula proporcional é entre “5.55 V” e “6.74V”. A válvula atua nessa faixa, pois a alimentação da mesma é de “24 V”, já o valor que o cartão de *setpoint* consegue enviar é entre “-10 V” e “10 V”, sendo considerados para a simulação apenas os valores positivos.

4.5 Resultados Finais

Para o uso do CLP, os resultados foram os melhores, pois, além da facilidade de programação, da quantidade de recursos oferecidos, da flexibilidade de mudar a programação, com o uso da tela supervisor do Intouch, obtém-se facilidade nos comandos e nas trocas de *setpoints*, além de fácil identificação de desvios através do painel de alarmes.

Os resultados dos controles de nível de temperatura e de pressão podem ser interpretados, por meio das figuras 75 e 76, em forma de gráficos:

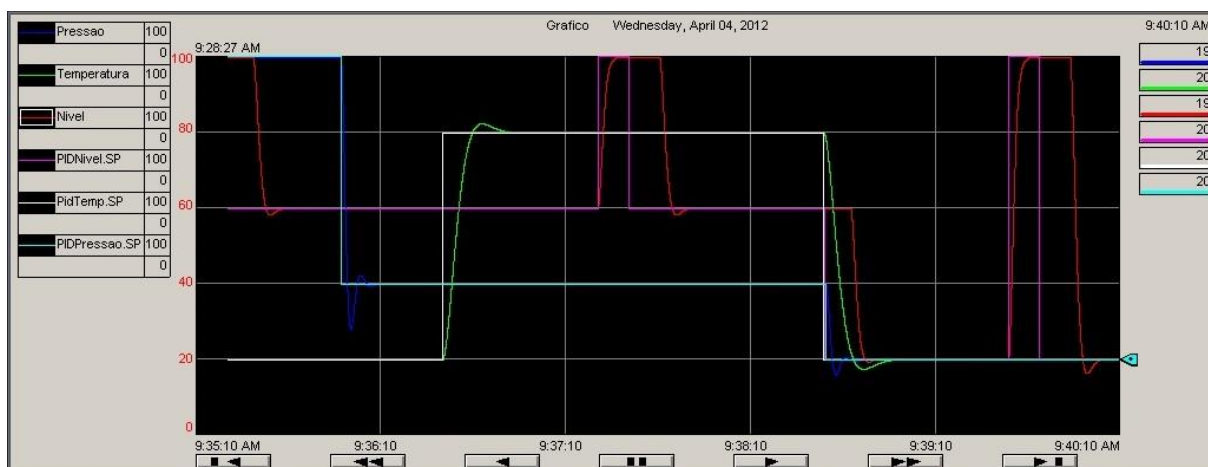


Figura 75: Gráfico de controle dos processos no RSLogix 5000.

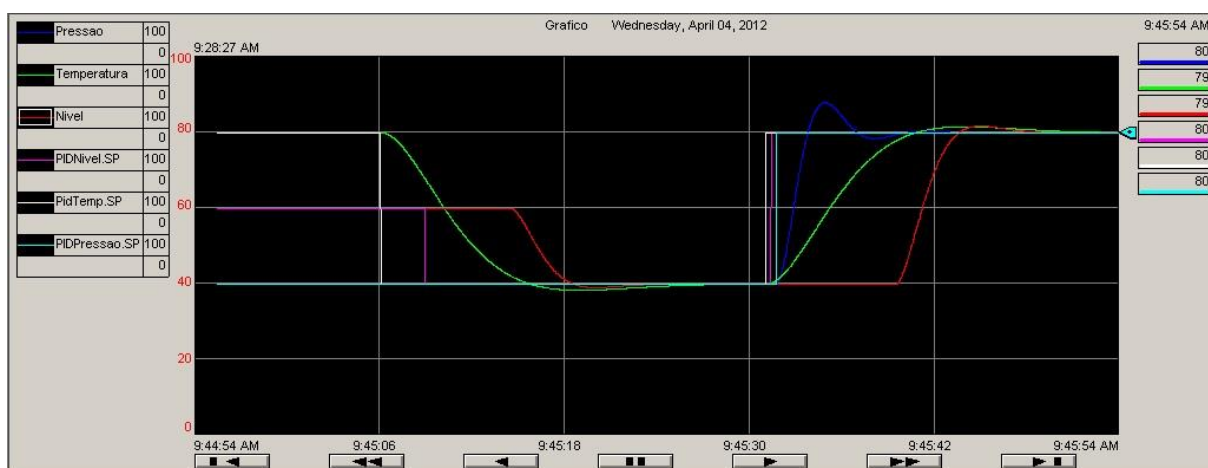


Figura 76: Gráfico de controle dos processos no RSLogix 5000.

Nota-se que os valores de nível do cadinho, de pressão no bico pulverizador e de temperatura do forno de espera sempre tendem a ir para o valor do *setpoint*, fato que evidencia que o controle está sendo realizado. Salienta-se que, no gráfico, as variáveis “SP” são os *setpoints* tirados do bloco PID.

O processo em cascata é percebido em ambas as figuras, quando os três *setpoints* vão para o mesmo valor. Nesse caso, a pressão, que é mais rápida, como controle independente, é a primeira a se estabilizar, seguida da temperatura, que é lenta. Já o nível, apesar de ser razoavelmente rápido (mais rápido que a temperatura), é o último a se estabilizar. Percebe-se que o nível inicia o controle apenas quando a temperatura já está controlada.

Com as simulações realizadas de acordo com o proposto, verificou-se que foram alcançados parcialmente os objetivos, possibilitando a implementação do controle de nível do cadinho e do controle de temperatura do forno de espera, porém, não sendo implementado a quente na produção.

5. Conclusão

Conclui-se que o CLP pode ser utilizado para as futuras implementações na Fábrica Brasileira de Metais (FBM), visto que essa fábrica é uma metalúrgica que conta com um ambiente hostil, como altas temperaturas, pó em suspensão, vibração etc.

Por meio do estudo aqui descrito, notou-se que as malhas de controle propostas funcionaram de acordo com o que foi idealizado e simulado pelo Fluidsim. As malhas independentes foram aplicadas no RSLogix, com a perspectiva de futura implementação na FBM, e funcionaram de acordo com o projeto.

Com as simulações antes apresentadas e descritas, tendo em vista a utilização de dispositivos de medição e controle em eletrônica analógica e/ou digital, será possível, em implementação futura na FBM, melhorias na qualidade da produção de pó de alumínio industrializado, tais como: monitoramento de produtos e processos; supervisão industrial em tempo real; economia de tempo, recursos e custos; configuração de alarmes quando detectados distúrbios nos controles; gerenciamento refinado da produção de pó aluminizado; entre outras.

Por fim, conclui-se que se obteve êxito na execução deste estudo, o qual tem por proposta possibilitar a aplicação de conhecimentos adquiridos durante o curso. Salienta-se, ainda, que, por meio das simulações desenvolvidas, será possível implementar esse estudo na FBM, evidentemente, empreendendo algumas alterações.

Referências

BALBINOT, A; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

Conselho Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/quem-somos>>. Acesso em: 28 out. 2015.

DORF, R.C; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

FOX, R. W; MCDONALD, A. T; PRITCHARD, P. J. **Introdução À Mecânica dos Fluidos**. 8ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. **Controladores Lógicos Programáveis – Sistemas Discretos**. 2ªed. São Paulo: Érica, 2012.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. 2ªed. São Paulo: Edusp, 2009.

MICROCHIP. Disponível em: <<http://www.microchip.com/>>. Acesso em: 2 fev. 2016.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ªed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

RIBEIRO, M. A. **Automação Industrial**. 3ªed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 1999.

ROCKWELL AUTOMATION. Disponível em: <http://www.rockwellautomation.com/pt_BR/overview.page>. Acesso em: 2 fev. 2016

ROQUE, L. A. O. L. **Automação de processos com linguagem Ladder e sistemas supervisórios**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SOUZA, A. C.Z; PINHEIRO, C. A. M. **Introdução à modelagem, análise e simulação de sistemas dinâmicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

SOUZA, D. J. **Desbravando o PIC – Ampliado e Atualizado para PIC16F628A**. 8ªed. São Paulo: Érica, 2005.

APÊNDICE A - ROTINAS DE PROGRAMAÇÃO DO CLP

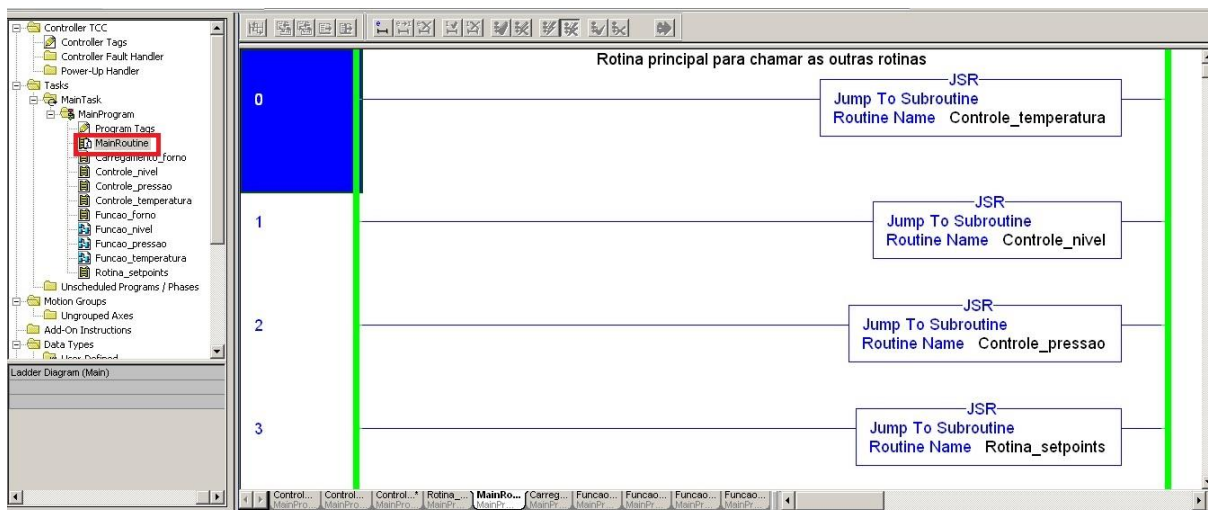


Figura 77: Rotina principal parte 1.

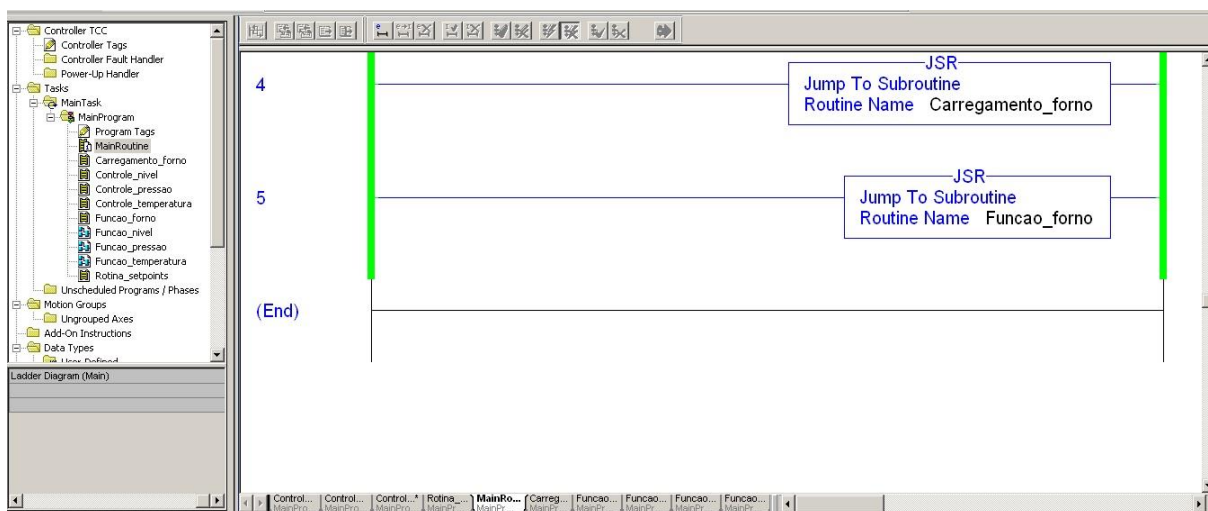


Figura 78: Rotina Principal parte 2.

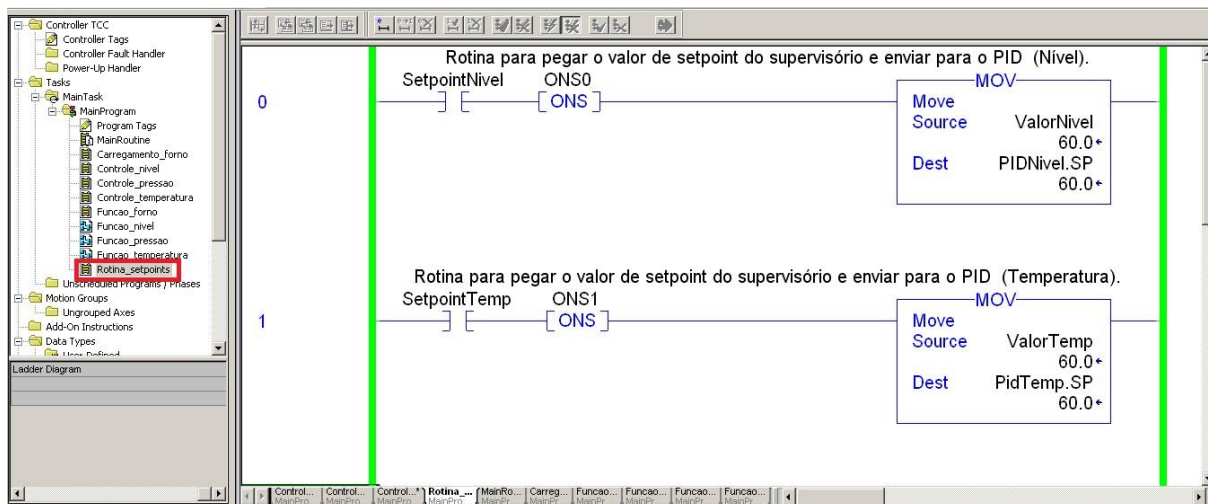


Figura 79: Rotina para alterações de *setpoints* parte 1.

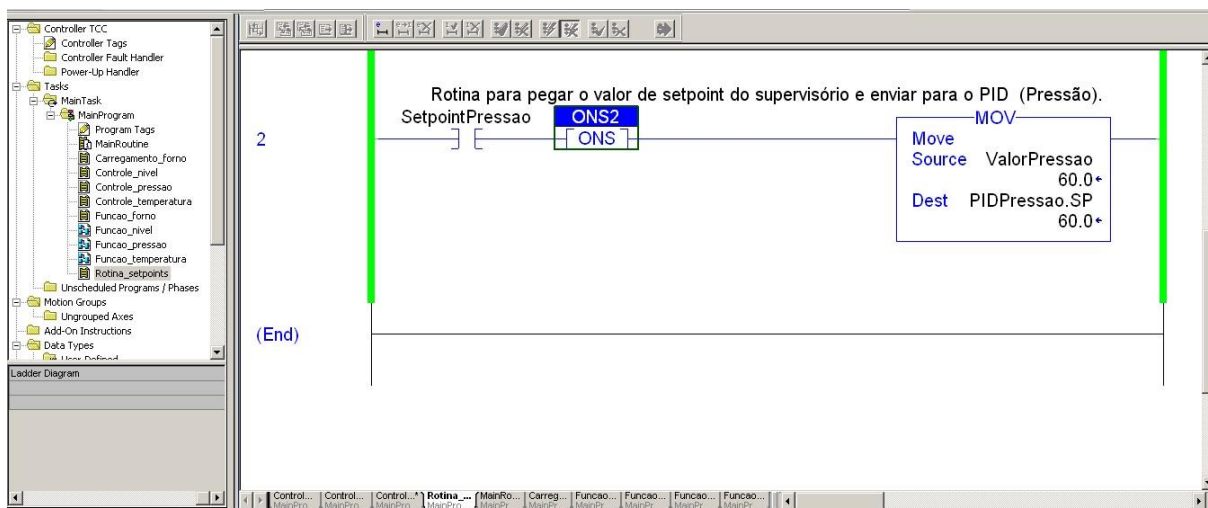


Figura 80: Rotina para alterações de *setpoints* parte 2.

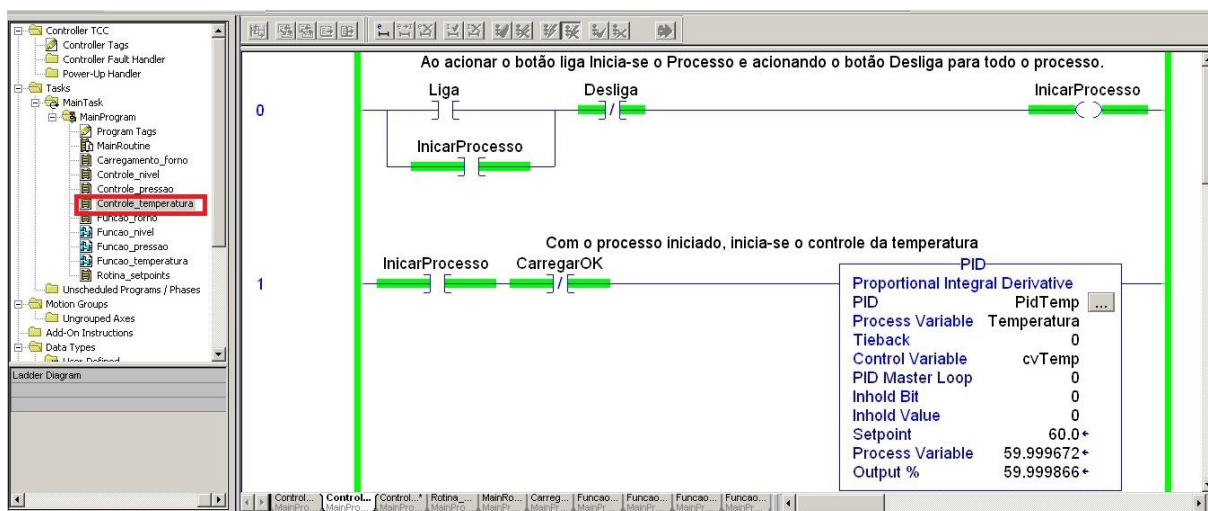


Figura 81: Rotina para controle da temperatura do forno de espera parte 1.

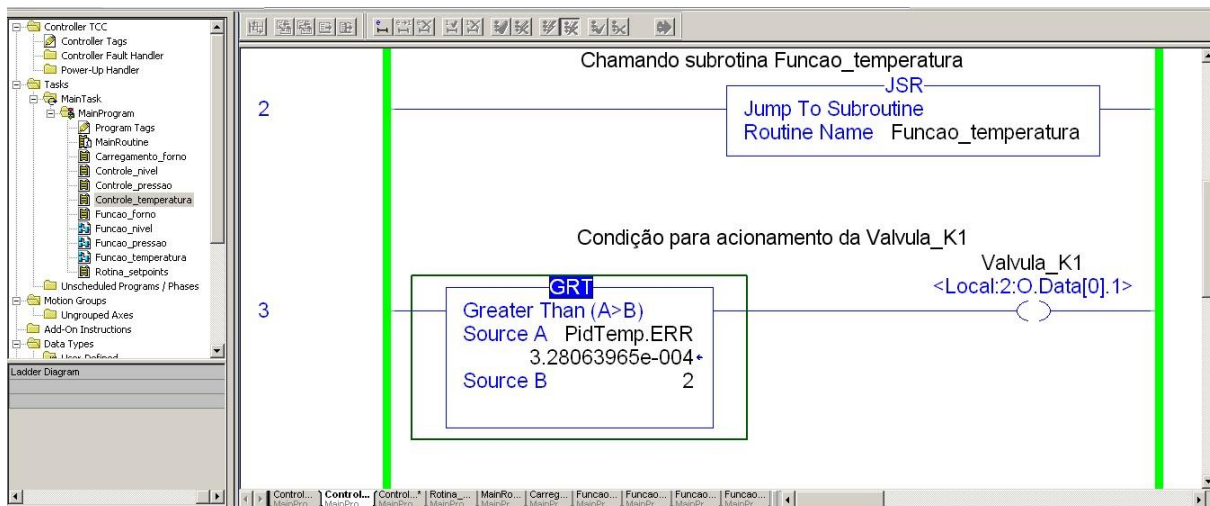


Figura 82: Rotina para controle da temperatura do forno de espera parte 2.

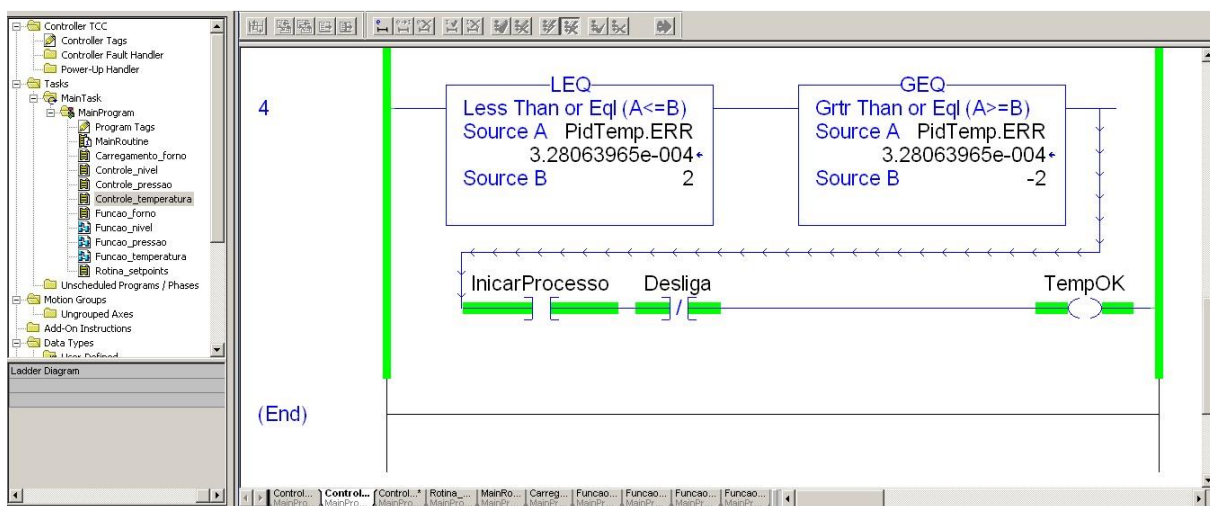


Figura 83: Rotina para controle da temperatura do forno de espera parte 3.

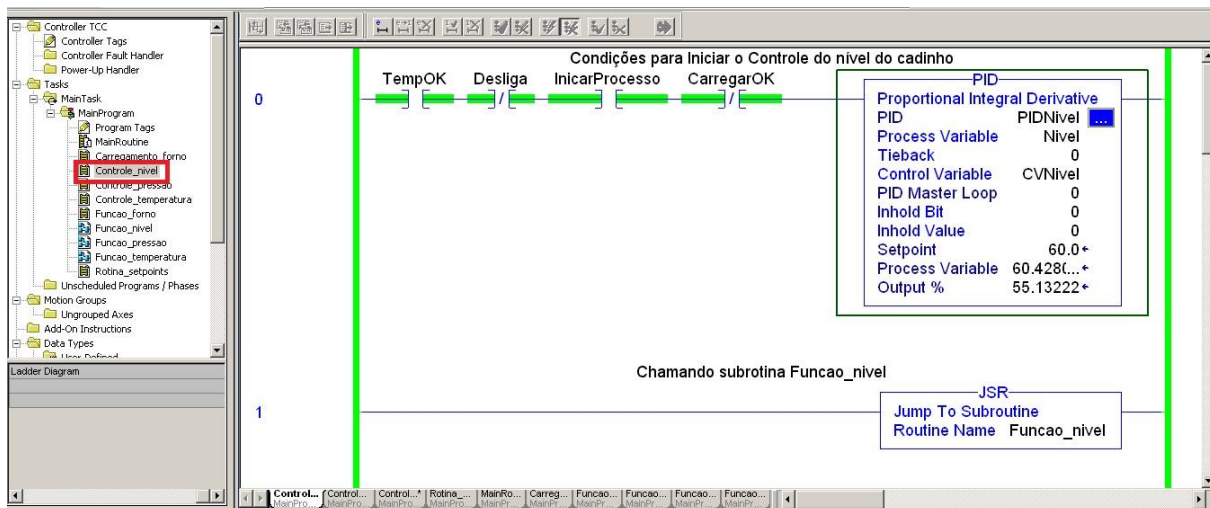


Figura 84: Rotina para controle do nível do cadinho parte 1.

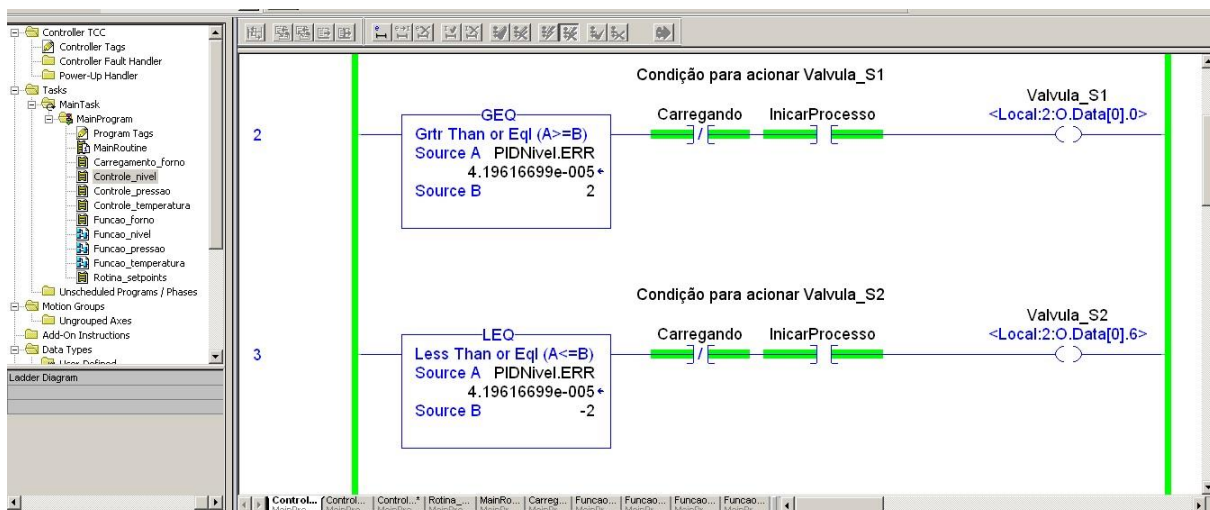


Figura 85: Rotina para controle do nível do cadinho parte 2.

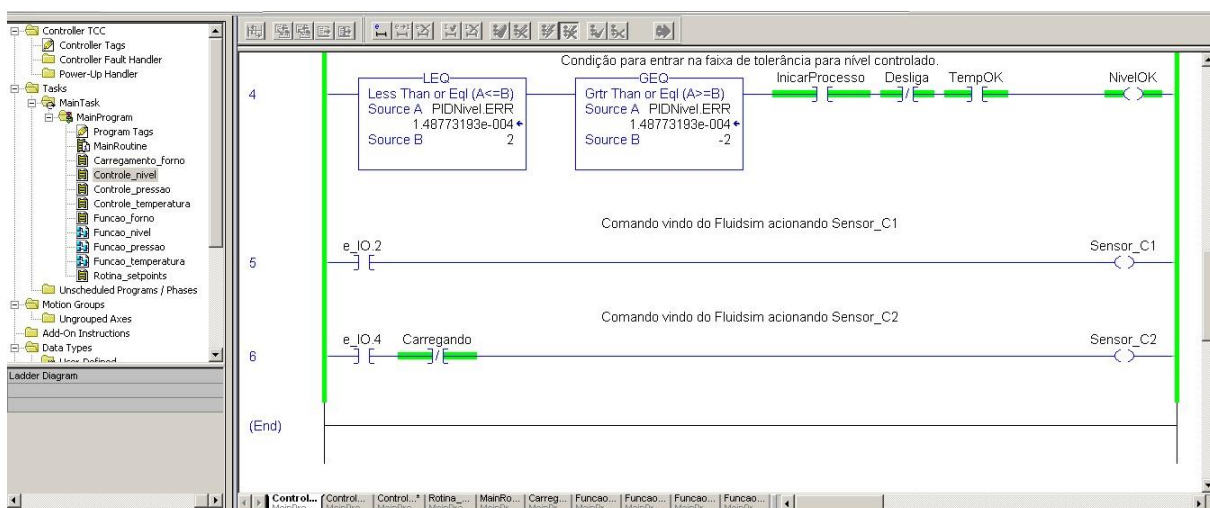


Figura 86: Rotina para controle do nível do cadinho parte 3.

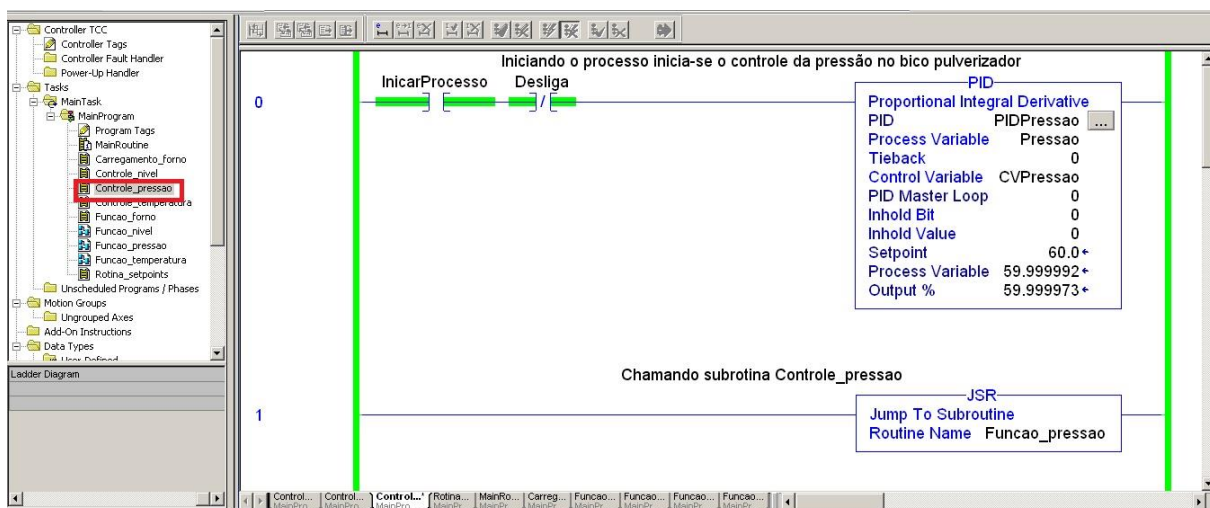


Figura 87: Rotina para controle da pressão no bico pulverizador parte 1.

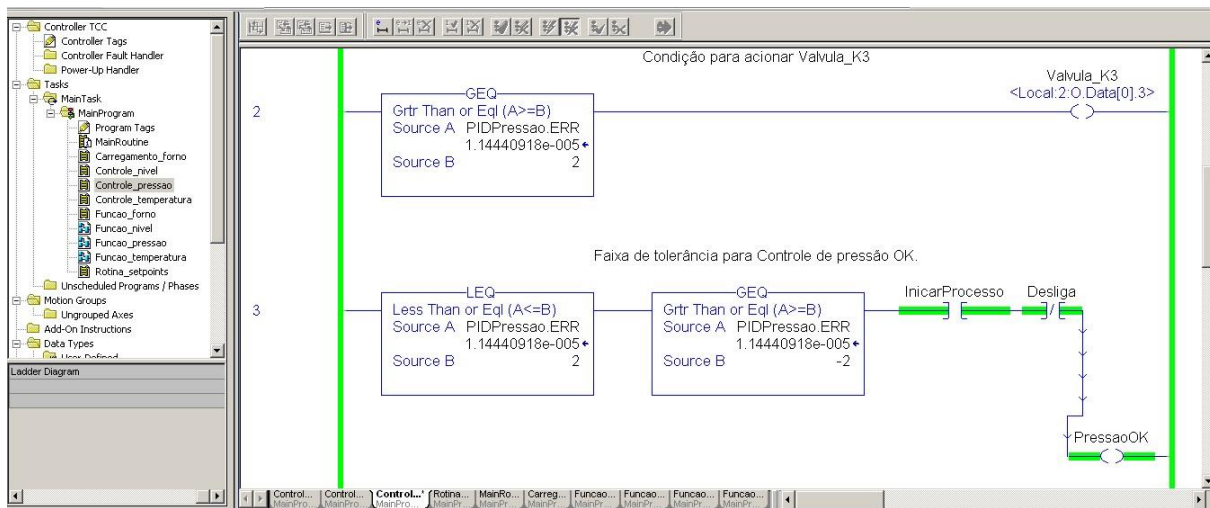


Figura 88: Rotina para controle da pressão no bico pulverizador parte 2.

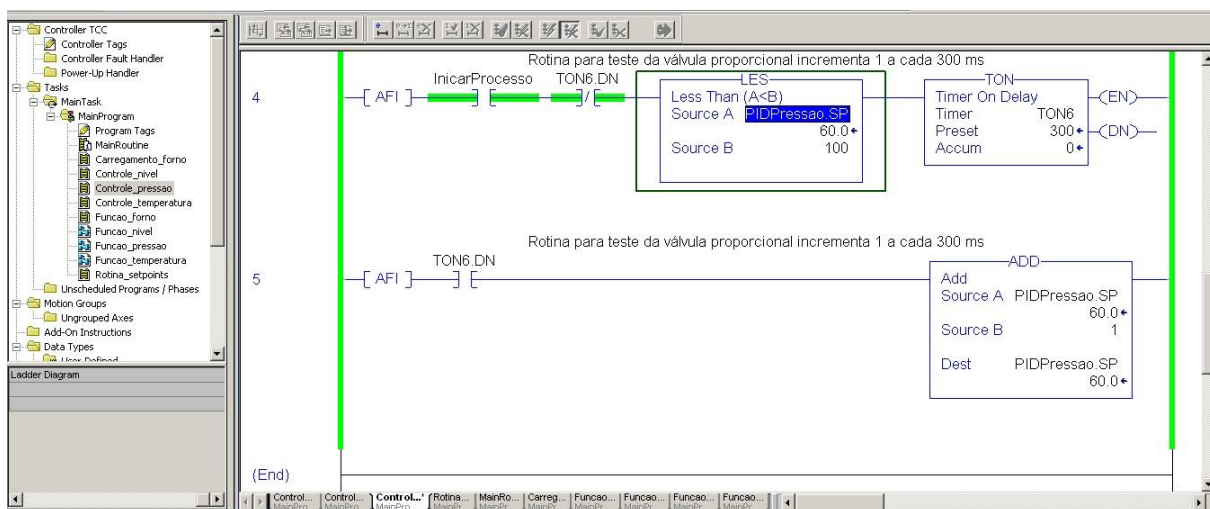


Figura 89: Rotina para controle da pressão no bico pulverizador parte 3.

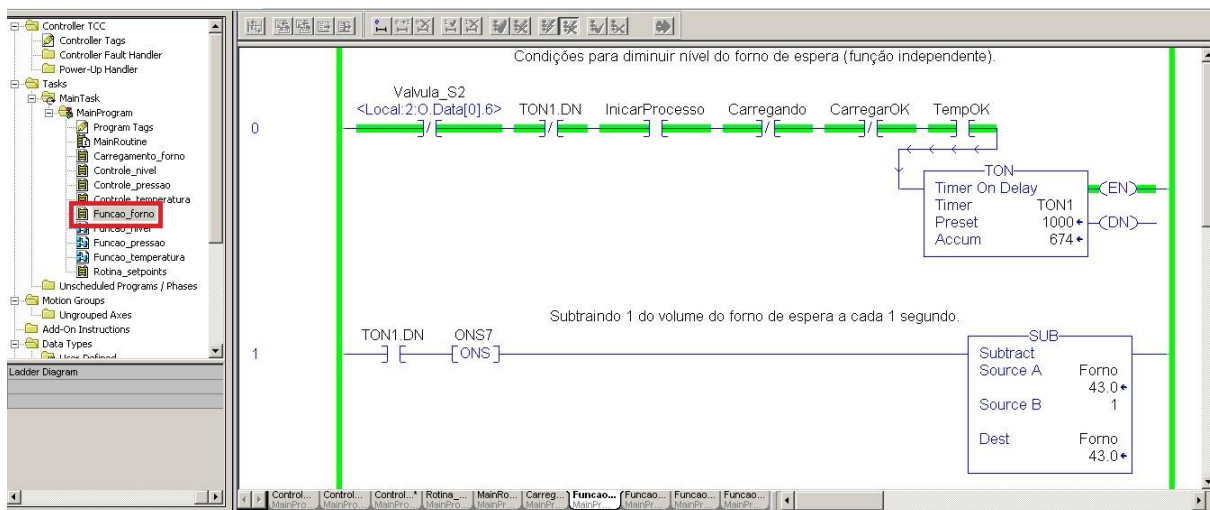


Figura 90: Rotina para simulação do nível do forno de espera parte 1.

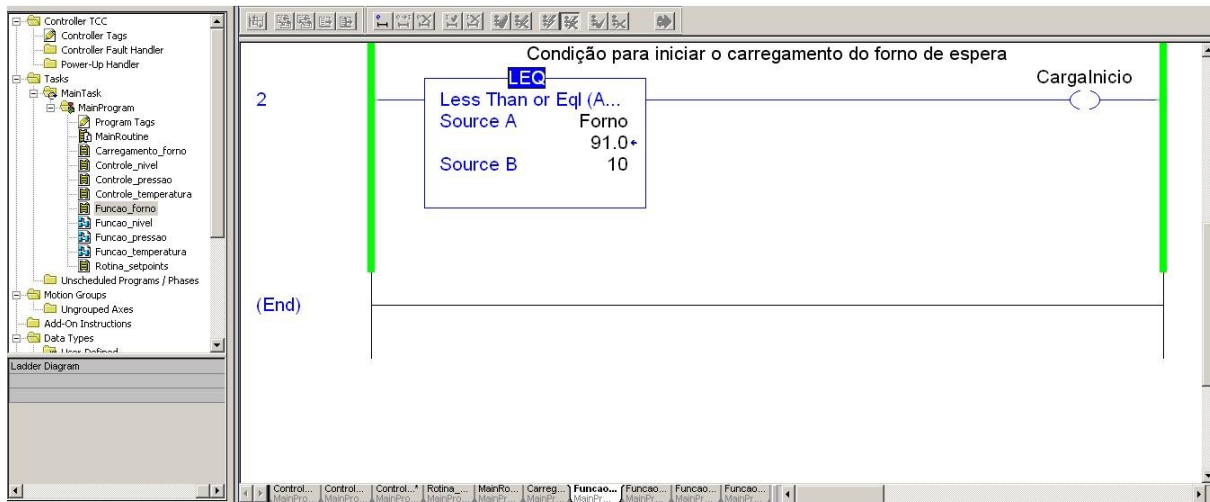


Figura 91: Rotina para simulação do nível do forno de espera parte 2.

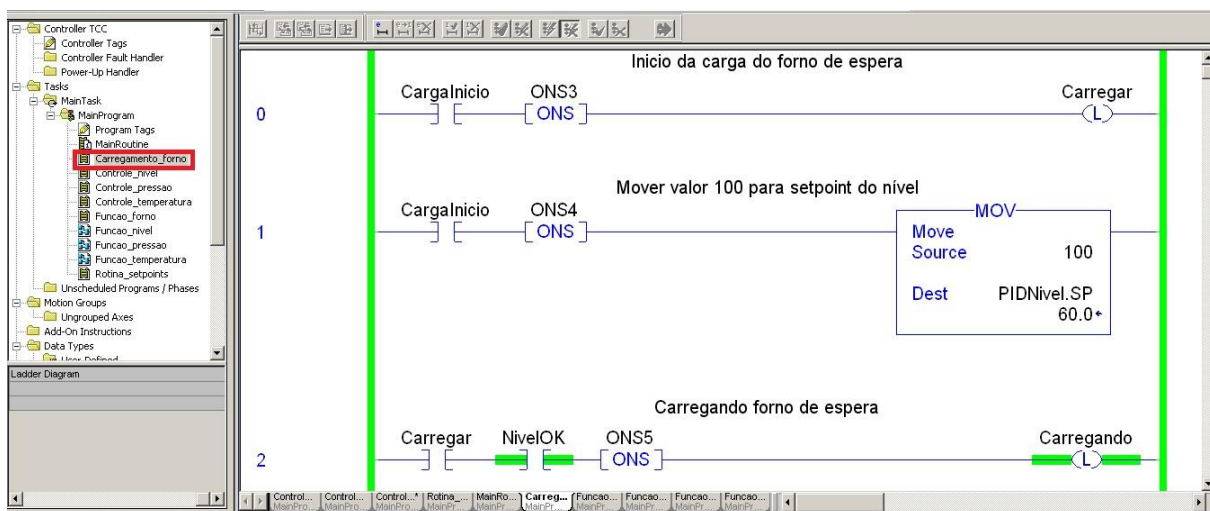


Figura 92: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 1.

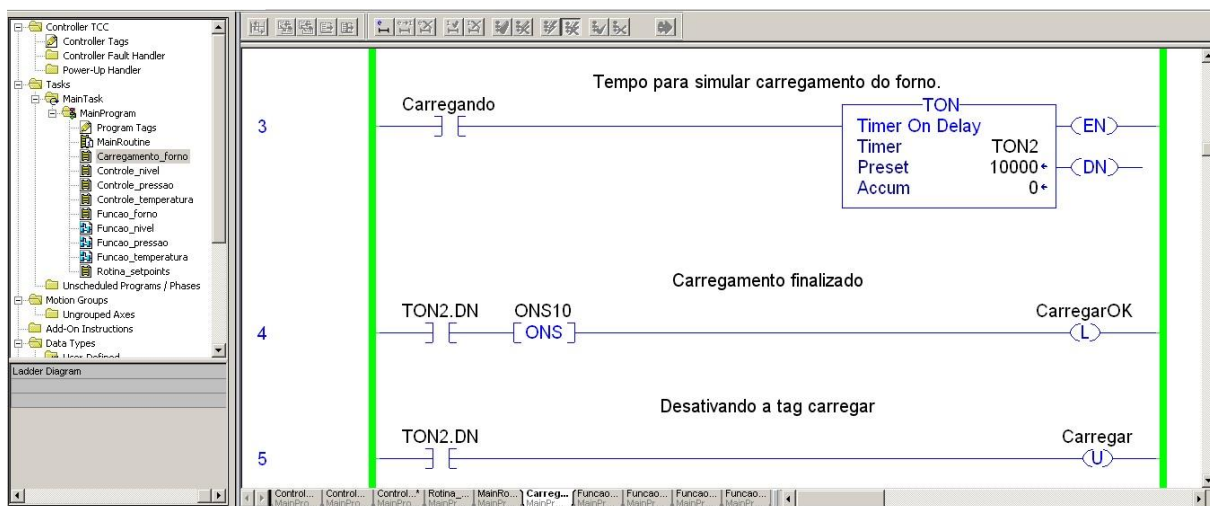


Figura 93: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 2.

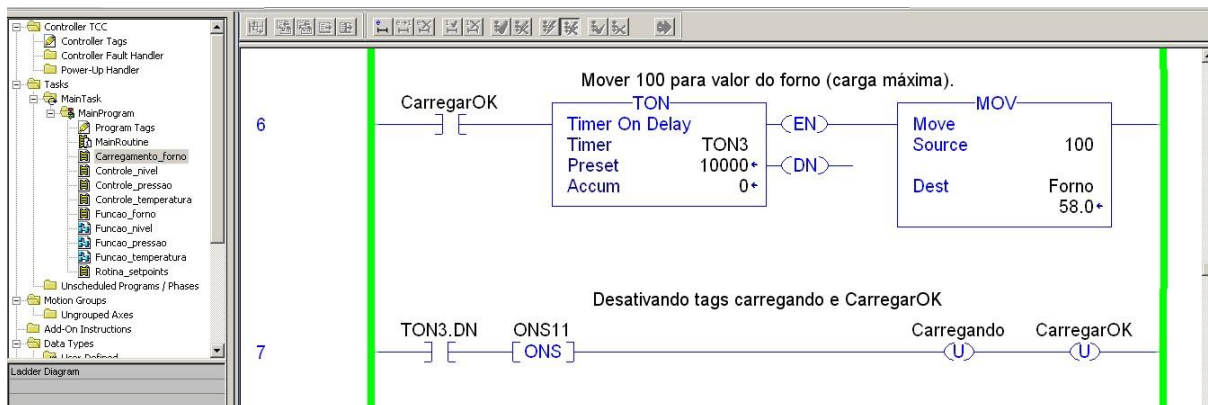


Figura 94: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 3.

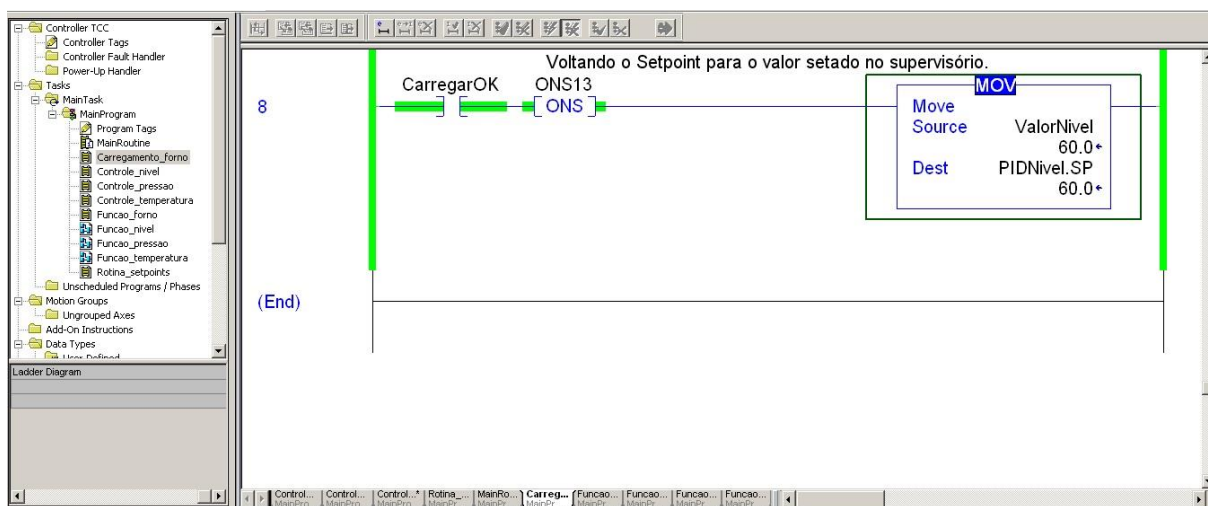


Figura 95: Rotina de simulação do carregamento do forno de espera parte 4.

PID Setup - PidTemp

Tuning | Configuration | Alarms | Scaling | Tag

Setpoint (SP): 60.0 ←

Set Output: 59.999866 ← %

Output Bias: 0.0 ← %

Manual Modes:
 Manual ←
 Software Manual ←

Tuning Constants:

Proportional Gain (Kp): 0.1 ←

Integral Gain (Ki): 0.1 ← 1/s
 PidTemp.KI

Derivative Time (Kd): 0.0 ← s

Reset Tuning Constants to the values they had upon entry into the PID Setup dialog
 ←

Setpoint (SP): 60.0	PV Alarm: High
Process Variable: 59.999672	Deviation Alarm: High
Error: 3.28063965e-01	Output Limiting: None
Output: 59.999866 %	Error Within Deadband: No
Tieback: 0.0 %	Setpoint Out of Range: No
Mode: Auto	PID Initialized: Yes

Figura 96: Sintonia do PID de Temperatura.

PID Setup - PIDNivel

Tuning | Configuration | Alarms | Scaling | Tag

Setpoint (SP): 60.0 ←

Set Output: 59.999794 ← %

Output Bias: 0.0 ← %

Manual Modes:
 Manual ←
 Software Manual ←

Tuning Constants:

Proportional Gain (Kp): 1.0 ←

Integral Gain (Ki): 1.0 ← 1/s

Derivative Time (Kd): 0.0 ← s

Reset Tuning Constants to the values they had upon entry into the PID Setup dialog
 ←

Setpoint (SP): 60.0	PV Alarm: High
Process Variable: 59.999855	Deviation Alarm: High
Error: 1.44958496e-01	Output Limiting: None
Output: 59.999794 %	Error Within Deadband: No
Tieback: 0.0 %	Setpoint Out of Range: No
Mode: Auto	PID Initialized: Yes

Figura 97: Sintonia do PID de Nível.

PID Setup - PIDPressao

Tuning | Configuration | Alarms | Scaling | Tag

Setpoint (SP): 60.0 ←

Set Output: 59.999973 ← %

Output Bias: 0.0 ← %

Manual Modes

Manual ←

Software Manual ←

Tuning Constants

Proportional Gain (Kp): 1.0 ←

Integral Gain (Ki): 1.0 ← 1/s

Derivative Time (Kd): 1.0 ← s

Reset Tuning Constants to the values they had upon entry into the PID Setup dialog

Reset ←

Setpoint (SP):	60.0	PV Alarm:	High
Process Variable:	59.999992	Deviation Alarm:	High
Error:	7.62939453e-001	Output Limiting:	None
Output:	59.999973 %	Error Within Deadband:	No
Tieback:	0.0 %	Setpoint Out of Range:	No
Mode:	Auto	PID Initialized:	Yes

OK Cancel Apply Help

Figura 98: Sintonia do PID de pressão.