

1.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Arthur Rezende Santos

**CONTROLE DE UM SISTEMA SERVOPOSICIONADOR
PNEUMÁTICO UTILIZANDO CONTROLADORES LÓGICOS
PROGRAMÁVEIS E REDE INDUSTRIAL MODBUS**

**Uberlândia - MG
2019**

Arthur Rezende Santos

**CONTROLE DE UM SISTEMA SERVOPOSICIONADOR
PNEUMÁTICO UTILIZANDO CONTROLADORES LÓGICOS
PROGRAMÁVEIS E REDE INDUSTRIAL MODBUS**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Engenharia de Controle e Automação da
Universidade Federal de Uberlândia -
UFU - Campus Santa Mônica, como
requisito para a obtenção do título de
Graduação em Engenharia de Controle e
Automação

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Renato F. Fernandes Jr

Uberlândia – MG

2019

Santos, Arthur

CONTROLE DE UM SISTEMA SERVOPOSICIONADOR PNEUMÁTICO UTILIZANDO CONTROLADORES LÓGICO PROGRAMAVEIS E REDE INDUSTRIAL MODBUS/ **Arthur Rezende Santos**. - **UBERLÂNDIA, 2019**- 80p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Renato F. Fernandes Jr

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia - UFU Faculdade de Engenharia Elétrica. **2019**. Inclui bibliografia.

1. Servoposicionador 1. 2. Modbus 1. 3. IMC
2. I. Prof. Dr. Renato Fernandes. II. Universidade Federal de Uberlândia. III. Faculdade de Engenharia Elétrica. IV. Engenharia de Controle e Automação.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Vilmário Mendonça Santos e Solange Rezende da Silva e ao meu irmão, Felipe Rezende Santos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Vilmário Mendonça Santos e Solange Rezende da Silva, por toda dedicação, suporte e apoio em toda minha vida, os quais não mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao Professor Renato Fernandes por todo o apoio durante todo o processo de desenvolvimento desse projeto.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Elétrica, por fornecerem um ensino público de qualidade.

Aos meus amigos e familiares que sempre estiveram ao meu lado e trilharam esse momento juntamente comigo.

“No fundo, todos temos necessidade de dizer quem somos e o que é que estamos fazendo, e a necessidade de deixar algo feito, porque esta vida não é eterna e deixar coisas feitas pode ser uma forma de eternidade.”

(José Saramago)

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle de uma unidade servopneumática, utilizando equipamentos de automação industrial. Ele abrange as principais etapas dentro de um sistema de automação industrial, desde o nível do processo, de instrumentação, englobando também o nível de controle e de supervisão. No nível de sensoramento da planta foi utilizado equipamentos pneumáticos de uma planta didática da empresa Festo. O estudo de controle pneumático é importante dentro da automação pois é um sistema muito empregado em diferentes aplicações na indústria. No nível de controle foi realizada a comunicação entre dois controladores utilizando rede industrial Modbus RTU, em que a lógica de controle foi realizada por um controlador principal (S71200), enquanto que a atuação e sensoramento foram executados por uma unidade remota (LC700). Para o nível de supervisão, o sistema possui um sistema SCADA (Indusoft), que foi utilizado para realizar todas as operações do sistema: aquisição de dados para identificação do sistema, ajuste do controlador e bem como toda a supervisão e controle da planta. Desta forma, foi possível levantar um modelo matemático do sistema utilizando o software Matlab e a sintonia do controlador PID do S71200 através do método IMC de sintonia de PID. Com resultado final, este trabalho conseguiu executar com sucesso a comunicação entre os controladores (S7-1200 e LC700), supervisionar e historiar dados através do sistema de supervisão (Indusoft) e banco de dados (SQL), sendo possível atuar em toda a planta. Por conseguinte, foi possível aplicar e sintonizar o controlador PID, possibilitando controlar a planta de forma robusta com erro de regime nulo.

Palavras-chave: Redes industriais, Controladores, Sistemas de controle, Servopneumático, SCADA, Modbus, IMC.

ABSTRACT

This paper presents the development of a control system of a servo-pneumatic unit, using industrial automation equipment. It covers the main steps within an industrial automation system, from the process level to instrumentation, as well as the level of control and supervision. In the sensing level of the plant was used pneumatic equipment of a didactic plant of the company Festo. The study of pneumatic control is important within automation as it is a system widely used in different applications in industry. At the control level, communication between two controllers was performed using Modbus RTU industrial network, where the control logic was performed by a main controller (S71200), while actuation and sensing were performed by a remote unit (LC700). For the supervision level, the system has a SCADA system (Indusoft), which was used to perform all system operations: data acquisition for system identification, controller adjustment as well as all plant supervision and control. Thus, it was possible to survey a mathematical model of the system using the Matlab software and the tuning of the S71200 PID controller through the PID tuning BMI method. As a final result, this work was able to successfully execute communication between controllers (S7-1200 and LC700), supervise and log data through the supervision system (Indusoft) and database (SQL), being possible to act throughout the plant. Therefore, it was possible to apply and tune the PID controller, making it possible to control the plant robustly with zero regime error.

Keywords: Industrial Networks, Controllers, Control Systems, Servo Pneumatic, SCADA, Modbus, IMC

Lista de ilustrações

Figura 1 - Unidade de produção e distribuição de ar	21
Figura 2 - Representação esquemática de um sistema servoposicionador pneumático.....	23
Figura 3 - Pirâmide da automação	24
Figura 4 - Controlador Lógico Programável.....	26
Figura 5 - Componentes Controlador lógico programável	26
Figura 6 - Módulo de entrada ou saída.....	27
Figura 7 - Fonte de alimentação CLP	27
Figura 8 - Ciclo de scan da CPU.....	28
Figura 9 - Contatos NA e NF e bobinas na lógica ladder	28
Figura 10 - Bloco PID Tia Portal V13	29
Figura 11 - Estrutura SFC	29
Figura 12 - Elementos do diagrama SFC.....	30
Figura 13 - Exemplo de uma tela de sistema de supervisão	31
Figura 14 - Gráfico com os resultados da pesquisa sobre os principais protocolos Industriais (2016)	32
Figura 15 - Modelo de comunicação mestre-escravo	33
Figura 16 - Frame de transmissão modo RTU	34
Figura 17 - Tipos de funções Modbus	34
Figura 18 - Sistema de controle em malha fechada com realimentação negativa	35
Figura 19 - Controlador PID	35
Figura 20 - Arquitetura de sintonia típica de processos industriais	37
Figura 21 - Software de Identificação de Sistemas do Matlab.....	39
Figura 22 - Sistema em oscilação.....	40
Figura 23 - Modelo de processo método IMC	43
Figura 24 - Visão geral do sistema.....	46
Figura 25 – Visão real da planta de movimento em um só eixo	47
Figura 26 - Tensão e proporção de vazão	48
Figura 27 - Visão técnica da válvula.....	48
Figura 28 - Sensor de posição FESTO TLH225	49
Figura 29 - CPU700, M-501, M-401	49
Figura 30 - Controlador Siemens S7-1200 em um cenário de comunicação com Remota Modbus.....	50

Figura 31 - Lógica SFC Comunicação Modbus.....	51
Figura 32 - CPU LC700.....	52
Figura 33 - Configuração Modbus LC700.....	53
Figura 34 - Bloco de Inicialização.....	54
Figura 35 - Configuração Bloco MB_Master.....	55
Figura 36 – Módulos associados ao controlador LC700.....	55
Figura 37 - Registros Modbus no ambiente de configuração do LC700.....	56
Figura 38 - Configuração Modbus no Cenário com Remota LC700.....	57
Figura 39 - Lógica ladder de leitura input register modbus.....	57
Figura 40 - Lógica ladder escrita Modbus.....	58
Figura 41 - Configuração do Cyclic Interrupt.....	59
Figura 42 - Bloco PID_COMPACT Siemens TIA Portal V13.....	59
Figura 43 - Linearização da saída.....	60
Figura 44 - Driver de comunicação SIETH.....	61
Figura 45 - Tags do sistema supervisório.....	61
Figura 46 - Definição de rack/slot do Controlador Siemens.....	62
Figura 47 - Tela do sistema de supervisão.....	62
Figura 48 - Configuração Gráfico de tendências.....	63
Figura 49 – Funcionamento da comunicação entre Supervisório e Siemens s7-1200.....	66
Figura 50 - Erro de comunicação entre Supervisório e Siemens S7-1200.....	66
Figura 51 – Leitura da variável de entrada analógica (PV) no LC700.....	67
Figura 52 - Erro de comunicação entre Supervisório e Siemens S7-1200.....	67
Figura 53 - Funcionamento da comunicação Modbus entre os controladores S7-1200 e LC700.	68
Figura 54 – Ciclo de comunicação do S71200 para fazer o processamento da ladder e modbus.	69
Figura 55 - Dados coletados para a identificação do sistema com degrau de 4% e -4%.....	70
Figura 56 - Ambiente de configuração e identificação de sistema do Matlab.....	71
Figura 57 – Comparação com os dados reais e o modelo estimado.....	72
Figura 58 - Resposta ao degrau, dos controladores com $\lambda = 5$ e $\theta = 0$	73
Figura 59 - Resposta ao degrau, da sintonia de um PI pelo método IMC2 com $\lambda = 5, 50$ e 100	74
Figura 60 - Aplicação do controlador obtido pelo IMC1 com $\lambda = 5$	75
Figura 61 - Resposta ao degrau do controlador em malha fechada.....	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros do primeiro método de Ziegler-Nichols.....	40
Tabela 2 - Segundo método de sintonia em malha aberta Ziegler e Nichols	41
Tabela 3 - Método de integral do erro	41
Tabela 4 - Parâmetros das equações.....	42
Tabela 5 - Constantes para cálculo da sintonia do PID.....	43
Tabela 6 - Tabela de sintonia de controladores com tempo morto segundo Skogestad.....	45
Tabela 7 - Tabela de sintonia de controladores sem tempo morto segundo Rivera.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controladores Lógico Programáveis
CNC	Computer Numeric Control
CPU	Central Processing Unit
DCS	Distributed Control System
E/S	Entradas e Saídas
IAE	Integral do erro absoluto
ISE	Integral do erro quadrático
ITAE	Integral do erro absoluto ponderado pelo tempo
ITSE	Integral do erro quadrático ponderado pelo tempo
Kc	Ganho estático do controlador
Kp	Ganho proporcional do controlador
MV	Manipulated variable
NF	Normalmente fechado
NA	Normalmente Aberto
P	Proporcional
PD	Proporcional derivativo
PI	Proporcional integral
PV	Process Value
PID	Proporcional integral derivativo
SP	Set Point
SFC	Sequential Function Chart
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
Ti	Constante de tempo integral
Td	Constante de tempo derivativo
Z&N	Ziegler-Nichols
θ	Tempo morto do sistema
λ	Parâmetro de robustez

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.2. Justificativa	18
1.3 Objetivos Gerais do Trabalho	19
1.4 Objetivos Específicos do Trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Sistema Pneumático	21
2.1.1 Sistema de produção e distribuição de ar.....	21
2.1.2 Sistema de consumo de Ar.....	22
2.2 Sistema de Automação.....	23
2.2.1 Sistemas de chão de fábrica	25
2.2.2 Sistema de Controle	25
2.2.3 Sistema de Supervisão	30
2.3 Redes Industriais.....	31
2.3.1 Protocolo Modbus.....	32
2.4 Controle PID	35
2.4.1 Ação Proporcional	36
2.4.2 Ação Integral.....	36
2.4.3 Ação Derivativa	36
2.5 Identificação de Sistemas.....	37
2.6. Sintonia de controladores PID	39

2.6.1. Método de Ziegler e Nichols	40
2.6.2. Método de Integral do Erro.....	41
2.6.3. Método IMC (Internal Model Control).....	43
3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE PNEUMÁTICO	46
3.1 Arquitetura geral do sistema	46
3.2 Atuadores e sensores	46
3.3 Sistema de controle	49
3.4 Sistema de Supervisão	50
3.5 Sistema de Comunicação Modbus.....	50
3.5.1 Máquina de estados.....	51
3.5.2 Configuração Modbus RTU LC700	52
3.5.3 Configuração Modbus Siemens S7-1200	53
3.5.4 Configuração de registros Modbus	55
3.5.5 Lógica ladder de leitura	57
3.5.6 Lógica Ladder de escrita.....	58
3.6 Lógica de Controle.....	58
3.6.1 Lógica Ladder de controle	58
3.7 Construção do Sistema Supervisório	60
3.7.1 Driver de Comunicação SIETH.....	60
3.7.2 Tela do Sistema Supervisório	62
4 RESULTADOS.....	65
4.1 Controle Local.....	65

4.2	Sistemas de Comunicação.....	65
4.2.1	Validação da comunicação Ethernet do Supervisório	65
4.2.2	Validação da Comunicação Modbus	66
4.3	Identificação do Sistema e Sintonia do Controlador.....	69
4.4	Controle Remoto	74
4.3.1	Controle Remoto utilizando bloco de função ST.....	74
4.3.2	Controle remoto utilizando o bloco PID_COMPACT	74
5	CONCLUSÕES.....	77
6	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Entende-se por sistemas de posicionamento, aqueles que possibilitam posicionar uma carga mecânica em uma localização desejada.

A utilização desses sistemas na indústria dá-se normalmente em situações onde se deseja manipular um produto ponto a ponto, ou seja, entre pontos discretos de parada, usualmente os extremos do curso do atuador responsável por sua locomoção. Dentre as aplicações práticas, pode-se verificar seu emprego em máquinas agrícolas, robôs manipuladores de posição, máquinas industriais de encaixotamento.

No caso particular dos sistemas pneumáticos de posicionamento, estes são atuados por ar comprimido e constituídos basicamente de um atuador e de uma ou mais válvulas de controle. Além destes componentes, outros dispositivos costumam ser utilizados em conjunto com estes sistemas no intuito de permitir sua supervisão e controle, como sensores e unidades de controle.

A escolha por sistemas pneumáticos para fins de atuação dos sistemas de posicionamento deve-se a uma série de fatores que os tornam muito atrativos quando comparados a outros sistemas de atuação: estes costumam ser de baixo custo, limpos, leves e de fácil montagem, além de possuírem uma boa relação entre peso e potência. Em contrapartida, a aplicação desses sistemas apresenta algumas desvantagens dentre as quais se destacam suas não linearidades impostas principalmente pela compressibilidade do ar, pelos vazamentos do sistema, pelo atrito e pela zona morta.

Vários autores têm focado seus estudos nessa linha de pesquisa, dentre os quais pode-se destacar: Mendonza (2006), Ribeiro (2014), Eurich (2014).

Mesmo frente a todos estes estudos e aos avanços tecnológicos das últimas décadas, ainda existe uma série de questões a serem resolvidas no que se refere à manipulação e implementação de sistemas, para aplicação de controladores precisa destes sistemas.

Neste contexto, buscando dar continuidade a essa linha de pesquisa, este trabalho visa contribuir nos quesitos adequação e verificação experimental da validade de modelos empíricos. Para isso, será desenvolvido um sistema completo para proporcionar a atuação sobre um sistema servoposicionador pneumático.

1.2. Justificativa

O curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Uberlândia possui alguns laboratórios que buscam não apenas aplicar conhecimentos oriundos da teoria de

sala, mas que procuram preparar com ênfase as necessidades existentes dos profissionais atuantes na área de engenharia. É importante, então que, os laboratórios estejam aptos e totalmente habilitados, para que possa ser apresentada de forma abrangente a aplicação da teoria na prática, das matérias que fazem parte do curso.

Em particular, as áreas de sistemas de controle, supervisórios e de redes industriais requerem uma atenção especial. Essas áreas são extremamente presentes em diversos campos industriais e é essencial para o aluno entender as suas teorias e conceitos e também saber aplicá-las na prática.

A escolha por realizar a automação de sistemas pneumáticos para fins de atuação dos sistemas de posicionamento deve-se a uma série de fatores que os tornam muito atrativos quando comparados a outros sistemas de atuação: estes costumam ser de baixo custo, limpos, leves e de fácil montagem, além de possuírem uma boa relação entre peso e potência.

O laboratório de controle e automação industrial possui controladores modernos como o S71200 onde são ministradas as principais disciplinas de redes, controladores lógicos programáveis e sistemas supervisórios. Porém o S71200 não possui saídas analógicas que são necessárias para o controle da planta. Neste caso, o laboratório possui outros controladores mais antigos como o LC700 que possui cartões tanto de entrada quanto de saída analógica.

Por fim, a motivação em auxiliar na melhoria dos laboratórios para as disciplinas práticas e o grande interesse pelas áreas de redes industriais, controladores lógicos programáveis, sistemas de controle e sistemas supervisórios, foram os aspectos de relevância, para o desenvolvimento desse projeto.

1.3 Objetivos Gerais do Trabalho

Este trabalho tem como propósito colocar em funcionamento uma planta que está disponível no laboratório de redes industriais. Esta planta é um sistema servoposicionador pneumático de movimentação linear, que permite a aplicação de disciplinas como redes industriais, controladores lógicos programáveis, sistemas de controle e sistemas de supervisão.

O servoposicionador pneumático disposto no laboratório de redes industriais não possui controle em malha fechada e não está sendo utilizada para fins de aprendizado nas disciplinas de sistemas de controle e redes industriais, com isso tem-se a necessidade de habilitar essa planta.

Para atingir esse objetivo será realizado o controle em malha fechada do servoposicionador pneumático, levantando-se o modelo matemático da planta, para projetar um controlador PID, e aplicar essa lógica de controle. Para isso, deve ser realizado a comunicação

entre dois controladores (S71200 e o LC700), onde o controlador LC700 faz o papel de uma remota Modbus, muito utilizada em aplicações industriais distribuídas. E o controlador S71200 é o controlador principal responsável por todo o controle e comunicação com os níveis superiores. Além disso para facilitar a visibilidade desses dados, será criado um sistema supervisório para trazer mais interatividade ao sistema.

Com isso, este projeto busca habilitar essa planta, para que se possa aplicar os conteúdos lecionados nas disciplinas de sistemas controle, redes industriais e sistemas supervisórios.

1.4 Objetivos Específicos do Trabalho

- Controle local do sistema servoposicionador através do CLP Smar LC700;
- Controle remoto do sistema servoposicionador através do S71200 da Siemens usando Remota Modbus Smar LC700;
- Sistema Supervisório para interação com o sistema;
- Identificação do sistema
- Sintonização do controlador PID

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo desse capítulo é apresentar e fundamentar os conceitos dos níveis da pirâmide de automação, apresentando todo o conceito da estrutura física e lógica utilizadas para desenvolver o projeto, partindo do nível dos dispositivos periféricos de campo, chegando à camada de Sistema de Supervisão, atuação e de sintonia de controladores.

2.1 Sistema Pneumático

A Pneumática é responsável pelo uso do ar comprimido em tecnologias de acionamento, comando e controle de sistemas automáticos. Os sistemas que utilizam do ar comprimido buscam realizar trabalho a partir da energia do ar, de forma a atuar em seus dispositivos, como válvulas e atuadores pneumáticos.

Os sistemas de ar comprimido são distribuídos em dois subsistemas: o sistema de produção e distribuição de ar, que busca preparar o ar para ser utilizado e realizar trabalho, e o sistema de consumo de ar, sendo a parte responsável por manipular e realizar a forma de trabalho desejada, dependendo dos tipos de atuadores e acionamentos utilizados.

2.1.1 Sistema de produção e distribuição de ar

Para utilizar o ar comprimido como meio de prover trabalho, todo sistema pneumático deve contar com um subsistema que forneça condições controladas de uso do ar comprimido gerado. A figura 1 mostra os componentes necessários de uma estação de geração e distribuição de ar.

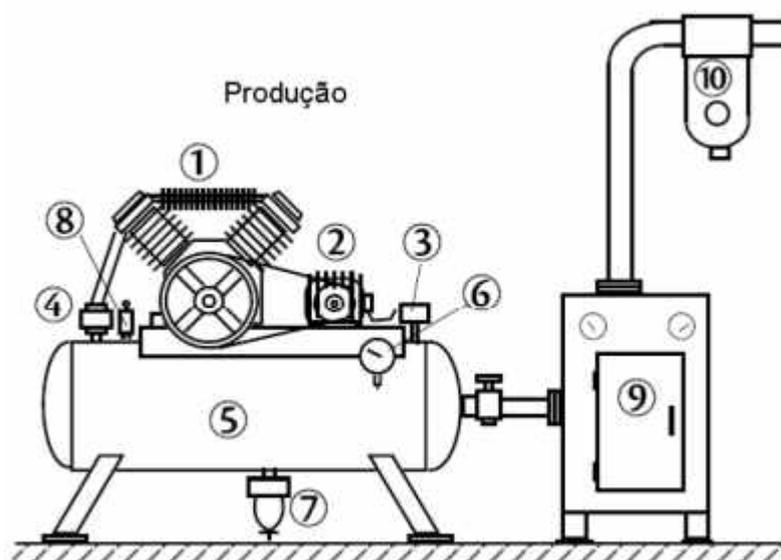


Figura 1 - Unidade de produção e distribuição de ar

Os componentes retratados pelas numerações são:

1. Compressor: unidade responsável por comprimir o ar e suprir o sistema pneumático
2. Motor elétrico: componente utilizado para movimentar uma polia que realizará o movimento dos pistões gerando a compressão do ar.
3. Pressostato: é um sensor medidor de pressão, utilizado para monitorar e proteger o sistema gerador de ar comprimido.
4. Válvula de retenção: é o elemento responsável por prover o fluxo de ar em somente uma direção, bloqueando a volta de ar.
5. Reservatório: é determinado como o local de armazenamento de ar comprimido, garantindo uma reserva de ar.
6. Manômetro: utilizado para medir a pressão de um determinado ponto da tubulação ou linha de distribuição
7. Purgador: componente responsável por esgotar os líquidos condensados.
8. Válvula de alívio: é o elemento que em caso de ultrapassagem da pressão do sistema, é feita a abertura da válvula para aliviar a pressão do sistema.
9. Secador de ar: é a unidade responsável por reduzir a umidade do ar.
10. Filtro de linha: responsável por filtrar e garantir a qualidade do ar, evitando a distribuição de resíduos dentro da linha de ar comprimido.

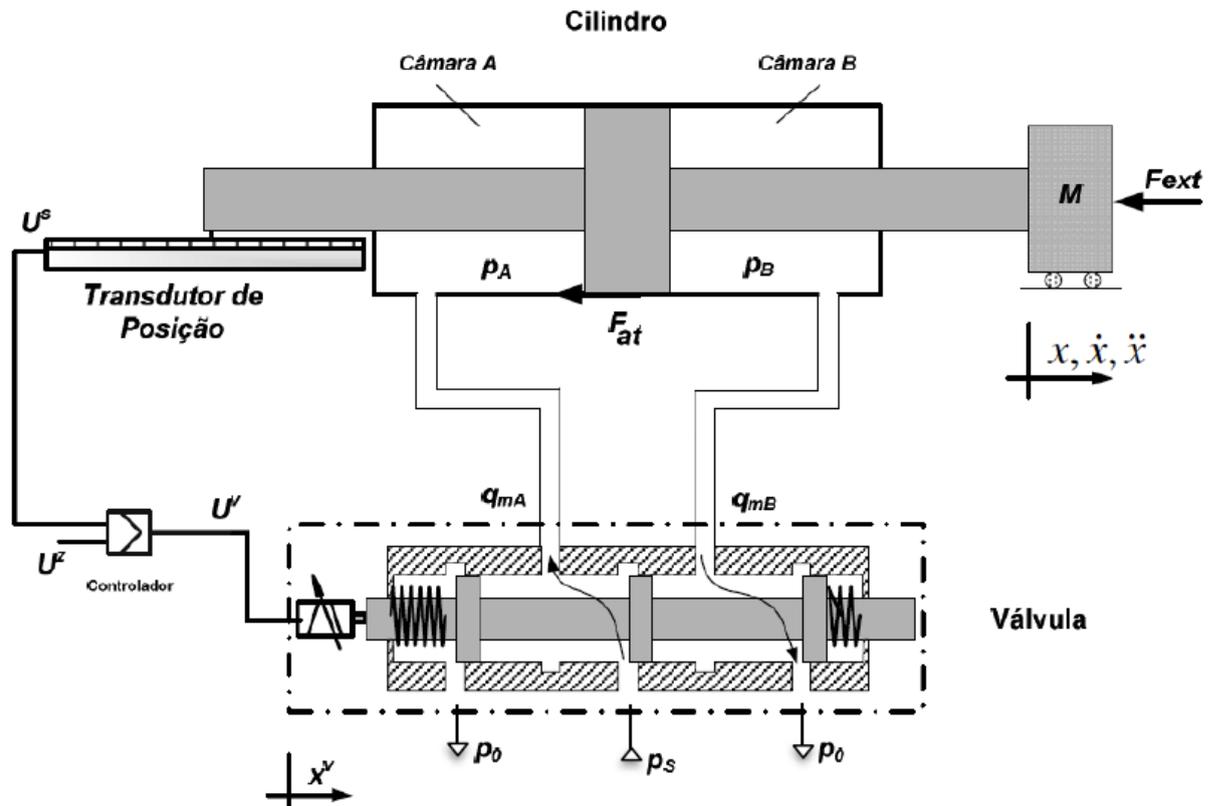
O subsistema de geração de ar é normalmente conectado ao subsistema de consumo, o subsistema de geração é responsável por suprir totalmente a demanda de ar do sistema de consumo proporcionando pleno funcionamento sem acarretar problemas de falta de ar comprimido.

2.1.2 Sistema de consumo de Ar

Os sistemas pneumáticos de consumo de ar são muito diversificados e variam de uma aplicação para outra, normalmente são compostos por válvulas, sensores pneumáticos e diversos tipos de cilindros e mesas pneumáticas.

Esses sistemas podem conter diversas formatações, que dependem dos componentes e equipamentos utilizados e da lógica final de ação que é desejada. A figura 2 mostra um sistema pneumático de posicionamento que pode ser utilizado em diversas máquinas indústrias, como exemplo, em paletizadores de caixas.

Figura 2 - Representação esquemática de um sistema servoposicionador pneumático.



Fonte: MENDONZA, 2006

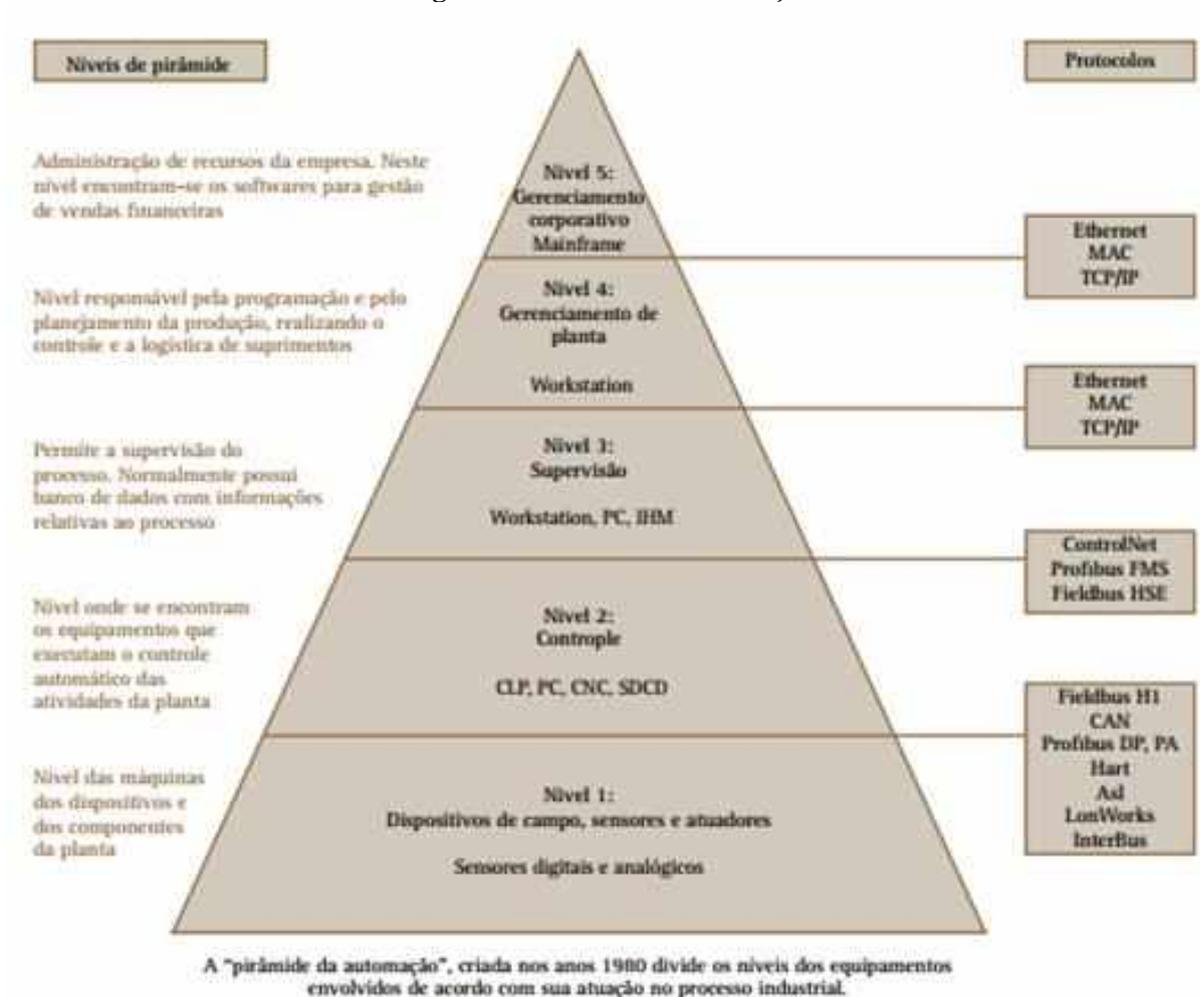
O funcionamento desse sistema se inicia com a aplicação de uma tensão à solenoide da servoválvula gerando, com isso, um deslocamento de seu carretel. Este deslocamento dá-se de forma proporcional ao valor da tensão aplicada, com isso, cria-se uma diferença nas aberturas da válvula, permitindo que o ar passe para umas das cavidades do cilindro (ALEXANDRE, 2014).

Durante a movimentação do êmbolo do cilindro, o transdutor de posição, acoplado a ele, registra este movimento e emite um sinal elétrico, proporcional ao deslocamento, este sinal é utilizado para definir a posição do pistão, podendo assim através de lógicas de programação em sistemas de controle, proporcionar a controlabilidade desse êmbolo.

2.2 Sistema de Automação

Com a modernização cada vez maior das instalações e também o fato de as empresas estarem as vezes divididas geograficamente, faz com que a comunicação entre estas diferentes partes da empresa seja otimizada. Desta forma, as redes se tornaram um elemento fundamental de comunicação dentro de uma corporação e principalmente dentro do ambiente industrial. A automação pode ser representada pela pirâmide da automação mostrada na figura abaixo. Essa pirâmide divide os níveis dos equipamentos envolvidos nessa tecnologia de acordo com sua atuação na indústria (GOEKING, 2010).

Figura 3 - Pirâmide da automação



Fonte: GOEKING, 2010

De acordo com a pirâmide da figura 3, dentro de um ambiente industrial, as informações são trocadas entre as diferentes camadas. O fluxo da informação pode ser dividido nestes diferentes níveis (MORAIS, 2017) descritos a seguir:

- O Nível 1 da pirâmide representa o chão de fábrica, ou seja, o setor de aquisição de dados e controle manual. Os dispositivos que fazem parte desse nível são: sensores e atuadores;
- O Nível 2 representa o setor de controle individual e é responsável por realizar o controle automático dos equipamentos que pertencem ao Nível 1.
- O Nível 3 é considerado como responsável pelo controle do processo produtivo ou de supervisão, condensando as informações referentes aos Níveis 1 e 2 e transferindo-as para os níveis de gerenciamento. O sistema de supervisão garante que qualquer valor da variável do processo de qualquer local da planta possa ser

exibido no console do operador, pode avisar o operador caso algum valor do processo ultrapasse os limites definidos, exceda os limites predefinidos, mude as configurações do dispositivo etc.

- O Nível 4 é responsável pelo gerenciamento da planta e o planejamento da produção. Fazem parte desse nível as workstations e o softwares dedicados.
- O Nível 5 é responsável pelo planejamento estratégico e gerenciamento corporativo, é nesse nível que se tem a visão total do sistema.

Estes diferentes níveis atualmente devem se comunicar constantemente para alcançar melhorias em qualidade e diminuição de tempo e custo. Para isso existem as redes industriais que se comunicam dentro destes diferentes níveis. As diversas redes são distribuídas dentro da empresa e se interagem constantemente. E estes diversos equipamentos de diferentes fabricantes somente conseguem se comunicar se trabalharem dentro de ambiente padronizado de comunicação, instalação, operação, garantindo assim a melhoria da qualidade de serviços e produtos (FERNANDES, 2009).

Nos próximos itens serão detalhados somente os três primeiros níveis pois são o foco deste trabalho.

2.2.1 Sistemas de chão de fábrica

Os sistemas de automação no nível de chão de fábrica são formados por dispositivos de campo que interagem diretamente no processo, seja através da leitura de grandezas físicas, como sensores lendo temperaturas e pressões, passando por elementos de controle como os controladores até elementos finais de atuação, como atuadores. No ambiente industrial a comunicação deve ser determinística e em tempo real para garantir o funcionamento correto do sistema de controle (KUMAR, 2014).

Os sensores e atuadores no chão de fábrica são interligados principalmente através de barramentos de campo, chamado *fieldbuses*. Os *fieldbuses* oferecem vantagens como distribuição do controle, facilidade de expansão, interoperabilidade e intercambiabilidade, segurança, determinismo e possibilidade de acesso remoto (KUMAR, 2014).

2.2.2 Sistema de Controle

Os sistemas de controle são responsáveis pela comunicação com o nível de chão de fábrica através da leitura e escrita de sensores e atuadores e processar toda a lógica de controle do sistema, seja na lógica do processo, seja na parte de segurança da rede. Atualmente, eles são

constituídos principalmente de controlador lógico programável (CLP), sistemas de controle distribuídos (DCS) e os Comandos numéricos computadorizados (CNC). Na grande maioria das aplicações industriais, o CLP é o elemento principal neste sistema de controle (KUMAR, 2014).

O CLP, é um equipamento eletrônico digital com hardware e software, utilizado em aplicações industriais, que pode ser programado para executar funções de controle, controlando em tempo real as variáveis de saída a partir das variáveis de entrada. O dispositivo utiliza uma memória programável para guardar internamente as instruções programadas e atuar nos sistemas de forma lógica, podendo ser programado com níveis de sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando por meio de módulos de entradas e saídas vários tipos de sistemas (FRANK, 2014).

Figura 4 - Controlador Lógico Programável

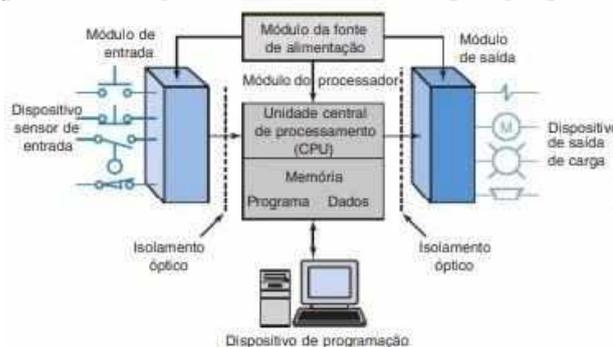


Fonte: PETRUZELLA, 2014

2.2.2.1 Partes de um CLP

O CLP pode ser particionado, para o melhor entendimento do seu funcionamento, como representado na figura 05. Sendo composto pela unidade central de processamento, módulos de entrada/saída, fonte de alimentação e o dispositivo de programação.

Figura 5 - Componentes Controlador lógico programável



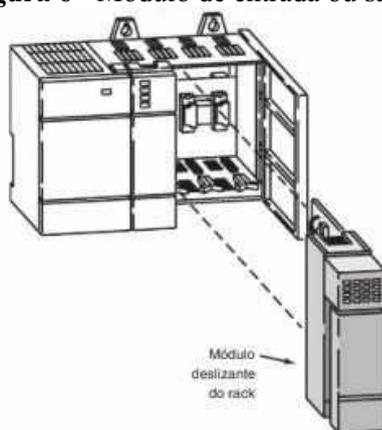
Fonte: PETRUZELLA, 2014

O sistema de E/S é a interface com qual os dispositivos industriais são conectados ao controlador, e tem a finalidade de condicionar os vários sinais recebidos ou enviados, para os dispositivos de campo. Através das entradas é possível adquirir sinais de botões, chaves e sensores diversos, sendo elas digitais ou analógicos. Através das saídas é possível atuar em

diversos tipos de componentes analógicos ou digitais, como atuadores eletropneumáticos, eletro hidráulicos e eletroeletrônicos, bobinas e contatores (PETRUZELLA, 2014).

O número de E/S nos CLP varia de modelo para modelo, podendo ser expansível através de módulos de E/S, que podem ser plugados nos controladores. Com isso flexibiliza-se a adaptação do controlador a vários tipos de sistemas, além de que no caso de problemas com algum módulo E/S só se realiza a troca do qual está danificado, não sendo necessária a troca do controlador.

Figura 6 - Módulo de entrada ou saída



Fonte: PETRUZELLA, 2014

A fonte de alimentação é o componente responsável por prover corrente contínua (CC), para os outros módulos conectados ao rack do CLP. Na maioria dos casos, essa fonte não é responsável por fornecer energia as componentes de campo, pois normalmente são alimentados por fonte de corrente alternada (CA).

Figura 7 - Fonte de alimentação CLP



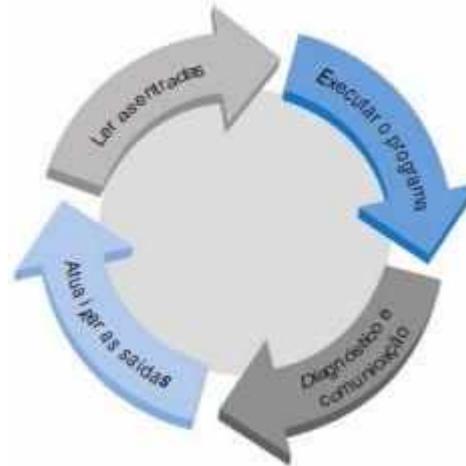
Fonte: PETRUZELLA, 2014

O processador (CPU) unidade central de processamento, é o responsável pela a realização da lógica e controle das transmissões entre módulos, e necessita de uma memória para guardar os resultados provenientes das operações lógicas feitas. Com isso, se utiliza as memórias EPROM ou EEPROM, juntamente com à memória RAM.

A CPU organiza todas as ações e é desenvolvida para que o usuário possa colocar o seu programa no formato de linguagem ladder, na grande maioria dos CLP's. O programa é

efetuado, em forma de ciclos de scan, em que a CPU faz leitura dos estados das entradas, após realiza diagnóstico interno e processos de comunicação, e por último atualiza o estado das saídas.

Figura 8 - Ciclo de scan da CPU

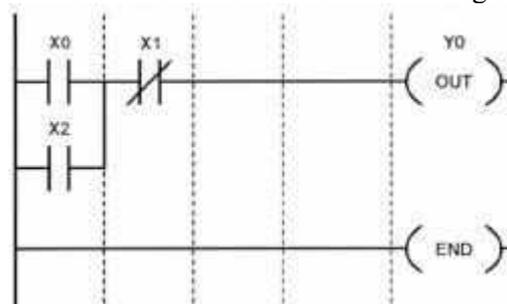


Fonte: PETRUZELLA, 2014

2.2.2.2 Linguagem Ladder

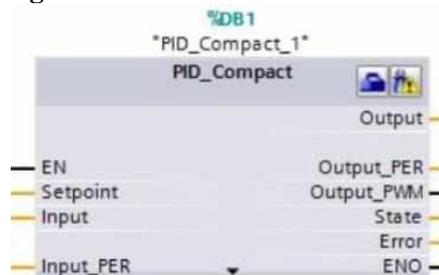
Os CLP's na grande maioria, utilizam a linguagem ladder para sua programação, ela foi desenvolvida com base nos diagramas de comandos elétricos que utilizam bobinas e contatos. Uma lógica ladder é um diagrama de escadas, que controla o acionamento de saídas, a partir de uma combinação lógica dos contatos de entrada, sendo eles normalmente abertos (NA), ou normalmente fechados (NF). Um exemplo simples de lógica ladder pode ser observado na figura 6.

Figura 9 - Contatos NA e NF e bobinas na lógica ladder



Fonte: SMAR, 2015

A linguagem ladder utiliza de vários tipos de blocos lógicos e de função para a realização de operações, esses blocos podem ser associados a fim de realizar uma lógica específica. Cada ambiente de desenvolvimento, por exemplo, Siemens (Tia Portal V13), ou Smar (CONF700), apresentam seus blocos próprios construídos pelos seus desenvolvedores. Na figura 10 apresenta um bloco de configuração PID do programa TIA Portal V13.

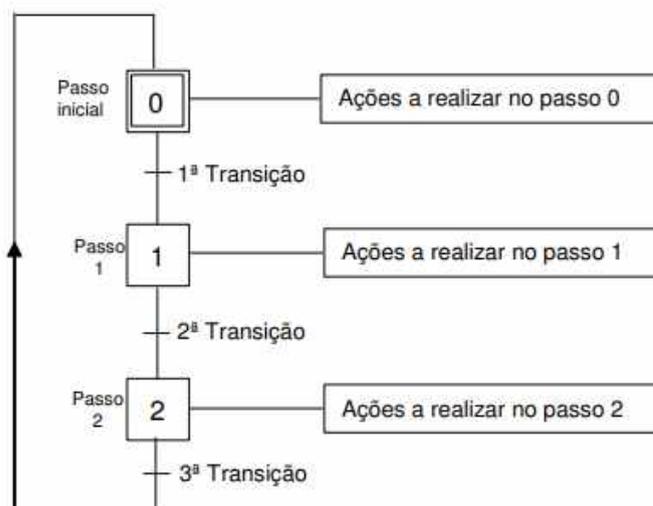
Figura 10 - Bloco PID Tia Portal V13

Fonte: SIEMENS, 2012

2.2.2.3 Linguagem SFC

A linguagem SFC (Sequential Function Chart), é utilizada para modelar lógicas de controle, de forma a seguir uma lógica temporal de eventos de processo. A linguagem é estruturada em forma de passos e transições, sendo que nos passos é realizada as ações, por exemplo, a ligação de um contator para acionamento de um determinado componente. Em cada instante de sequenciamento, só é ativo um passo por vez, ou seja, se tem uma sequência.

A mudança de passo só acontece com a ativação de uma transição, para ela ser ativa deve ser satisfeita uma ou mais condições determinadas pelo programador.

Figura 11 - Estrutura SFC

Fonte: USP - Edisciplinas da USP

O diagrama SFC é composto por diferentes elementos como:

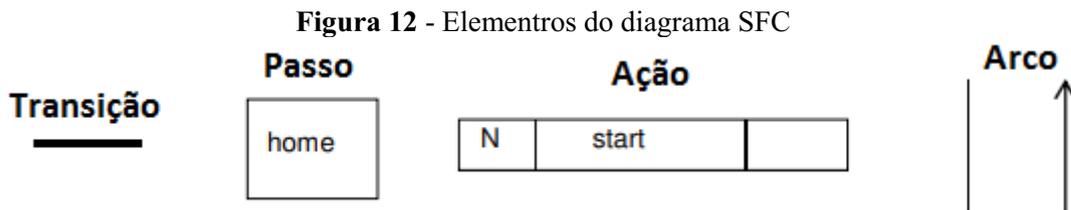
1. Passo é um elemento que é associado ao estado ativo ou inativo, o passo é ativo quando a transição precedente é liberada devido as condições se tornarem verdadeiras.
2. Transição é representada por uma barra horizontal, e é sempre associada a uma

condição para ser ativa ou não.

3. Ação é o campo da estrutura responsável por associar uma ou mais ações que descreve o que deverá ser feito quando o passo for ativo. Cada ação é representada por um retângulo ao lado do passo.

4. Arco é utilizado para definir o sequenciamento da estrutura, como ligação de passos a transições, gerando a orientação definida pelo usuário.

A representação dos objetos pode ser vista na figura 12.



Fonte: USP - Edisciplinas da USP

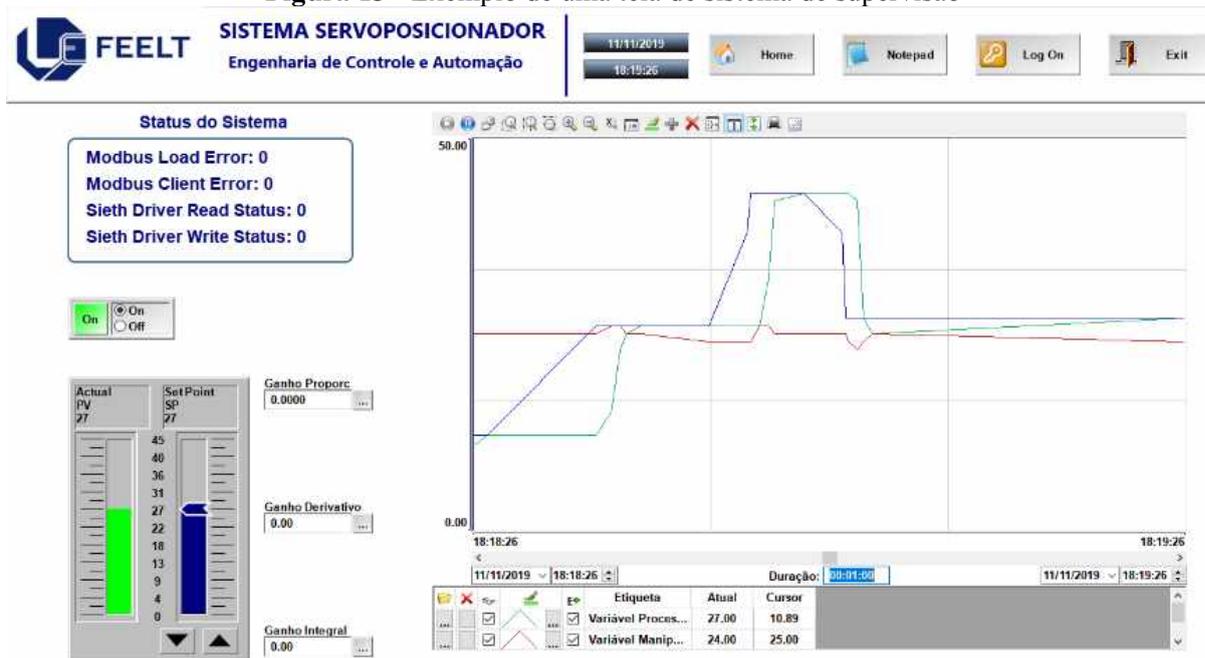
2.2.3 Sistema de Supervisão

Os Sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA) são sistemas utilizados para monitorar, supervisionar e realizar aquisição de dados provenientes de plantas industriais. Ferramentas de engenharia de rede, programas de programação de manutenção da planta e ativos gerenciamento estão entre as tarefas do nível de supervisão.

Esses sistemas através de interface gráfica são capazes de mostrar gráficos de tendências e realizar monitoramento em tempo real de variáveis e sinalizar alarmes, para caso de falhas e problemas no sistema. Além disso são capazes de fornecer operação remota no processo, a partir de uma sala de controle.

São utilizados para salvar dados em banco de dados, para geração de relatórios, com isso aumentam a disponibilidade da planta, permitindo prever falhas e consequentemente otimizar as tomadas de decisões para manter planta em operação.

Figura 13 - Exemplo de uma tela de sistema de supervisão



Fonte: *print screen* da aplicação do autor da interface, utilizando o programa Indusoft Wonderware 8.0

2.3 Redes Industriais

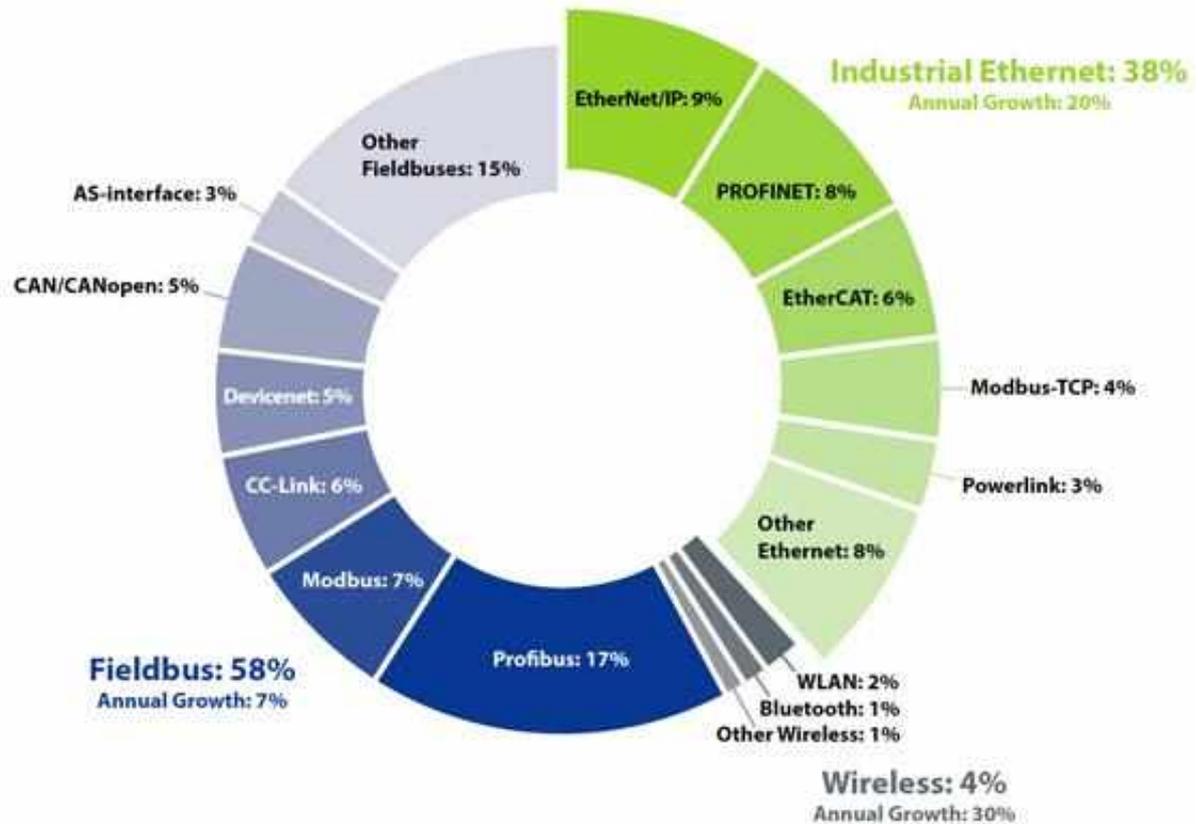
As redes dentro de um processo industrial são classificadas de acordo com seus níveis de automação, vindo desde o nível mais baixo, no chão de fábrica, até os níveis mais altos, como o corporativo. O nível de campo atualmente é formado por transmissores inteligentes que se comunicam com o controlador através de sub redes podendo estarem distantes a dezenas de quilômetros. Estas redes são chamadas de *fieldbuses* (KUMAR, 2014).

Os diferentes níveis têm de lidar com diferentes requisitos peculiares ao nível específico em causa. Por exemplo, o nível da empresa deve lidar com um grande volume de dados que não são nem tempo crítico nem com uso constante. Já nos níveis mais baixos como de sensores e controladores é necessário um determinismo da rede e constância dos processamentos e controles (KUMAR, 2014).

Especificamente as redes nos níveis de chão de fábrica, houve uma evolução muito grande nas últimas duas décadas, onde existem diferentes protocolos dependendo do cenário de aplicação. Os protocolos de redes industriais de campo são antigos, se iniciando por volta da década de 80, com protocolos HART e Modbus e hoje são dezenas de protocolos. Por exemplo para cenários de controle de manufatura, caracterizada por redes de equipamentos discretos como chaves de fim de curso, solenoides, sensores de posição, e também com característica de uma rede rápida, com ciclo de scan na ordem de poucos milissegundos, existem redes Asi, Devicenet, CAN, CANOpen. Quando o cenário é controle de processo que se caracteriza por uma rede predominantemente de variáveis analógicas e blocos funcionais, e com característica

de área classificada e tempos de ciclo de scan na ordem de dezenas de milissegundos, se destacam as redes Profibus DP, Profibus PA, Foundation Fieldbus. E atualmente as redes são integradas no nível de campo, de controle e supervisão através das redes Ethernets como Modbus TCP, Profinet, HSE, Ethernet IP, EtherCAT, (KUMAR, 2014). A Figura 14 mostra os resultados de uma pesquisa sobre o uso de protocolos na indústria.

Figura 14 - Gráfico com os resultados da pesquisa sobre os principais protocolos Industriais (2016)



Fonte: EECONLINE, 2019

Apesar da evolução das redes industriais, ainda existem muitas aplicações que utilizam as tecnologias antigas como HART e Modbus. Na seção a seguir, apresenta-se alguns detalhes do protocolo Modbus, que foi o protocolo implementado nesse trabalho.

2.3.1 Protocolo Modbus

O protocolo de Redes Industriais Modbus foi elaborado pela Modicon Industrial Automation Systems, atualmente conhecida por Schneider, com o intuito de prover comunicação entre um dispositivo mestre com outros dispositivos escravos.

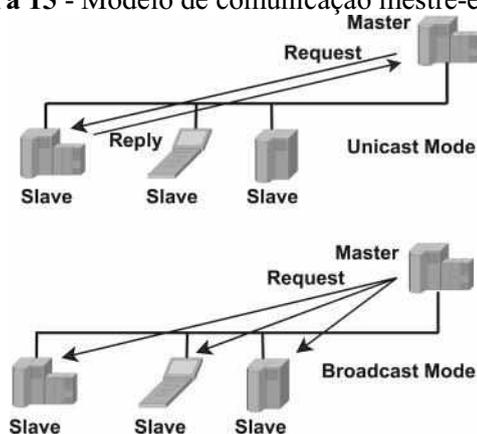
Este protocolo dispõe de uma estrutura de comunicação composta por *bytes*, que a maioria dos equipamentos são capazes de assimilar. Normalmente, o tipo de conexão utilizado é a serial padrão RS-232, mas pode ser utilizado na camada de aplicação de redes industriais na forma TCP/IP sobre *Ethernet*.

2.3.1.1 Modelo de comunicação

O protocolo Modbus é baseado no modelo de comunicação mestre-escravo, em que um único dispositivo é mestre, sendo o responsável por inicializar a comunicação (query) com os outros equipamentos escravos, que respondem aos comandos do mestre, enviando dados ou realizando alguma ação.

O equipamento mestre é capaz de endereçar os equipamentos escravos de forma individual ou coletiva através de mensagens em *broadcast*. Quando o mestre realiza uma requisição endereçada de contato, apenas o escravo endereçado responde, e no caso de uma mensagem do tipo *broadcast* os escravos não respondem. O estilo de comunicação pode ser visto na figura 15.

Figura 15 - Modelo de comunicação mestre-escravo



Fonte: MODICON, 1996

2.3.1.2 Modelo de Transmissão RTU

No modo de transmissão RTU, para cada palavra de dados da mensagem é enviado somente um caractere no formato HEXADECIMAL. Neste modo de transmissão, a palavra de dados será igual a 11.

O frame no modo RTU, não apresentam bytes que mostram o início e fim da mensagem, para identificar isso, é feita uma parada de transmissão por um período de tempo de 3.5 vezes o tamanho da palavra de dados, denominado de *silent*.

O frame é composto por:

1. Endereço: é o endereço do escravo Modbus
2. Função: é o campo responsável por definir o tipo de ação
3. Dados: é o local ou registro de atuação, onde vai ser executada a ação da função.
4. CRC: utilizado para detectar erros de transmissão.

Figura 16 - Frame de transmissão modo RTU

Início	Endereço	Função	Dados	CRC	Fim
<i>silent</i>	1 char	1 char	N chars	2 chars	<i>silent</i>

Fonte: Adaptado de FREITAS (2014)

2.3.1.3 Tipos de dados lógicos Modbus

Nesta parte do frame é definido o tipo de dados e o operando, em que cada tipo pode contar com 9999 operandos. Com isso é possível ter os seguintes tipos de endereço:

1. Saída discreta (coils) 00001 a 09999
2. Entrada discreta (Inputs) 10001 a 19999
3. Entradas Analógicas (Input Registers) 30001 a 39999
4. Saídas Analógicas (Holding Registers) 40001 a 49999

O número inicial que acompanha o operando é definido como o tipo de dado.

2.3.1.4 Tipos de funções

As funções disponíveis no protocolo Modbus são de leitura e escrita em um escravo, ou mensagem de broadcasting, que pode ser leitura e escrita simultânea em todos os dispositivos escravos da rede. Com isso, dependendo do tipo de dado é determinado o número do comando, a figura 17 demonstra os comandos possíveis.

Figura 17 - Tipos de funções Modbus

Código da função	Descrição
1	Leitura de bloco de bits do tipo coil(saída discreta).
2	Leitura de bloco de bits do tipo entradas discretas.
3	Leitura de bloco de registradores do tipo holding.
4	Leitura de bloco de registradores do tipo input.
5	Escrita em um único bit do tipo coil(saída discreta).
6	Escrita em um único registrador do tipo holding.
7	Ler o conteúdo de 8 estados de exceção.
8	Prover uma série de testes para verificação da comunicação e erros internos.
11	Obter o contador de eventos.
12	Obter um relatório de eventos.
15	Escrita em bloco de bits do tipo coil(saída discreta).
16	Escrita em bloco de registradores do tipo holding.
17	Ler algumas informações do dispositivo.
20	Ler informações de um arquivo.
21	Escrever informações em um arquivo.
22	Modificar o conteúdo de registradores de espera através de operações lógicas.
23	Combina ler e escrever em registradores numa única transação.
24	Ler o conteúdo da fila FIFO de registradores.
43	Identificação do modelo do dispositivo.

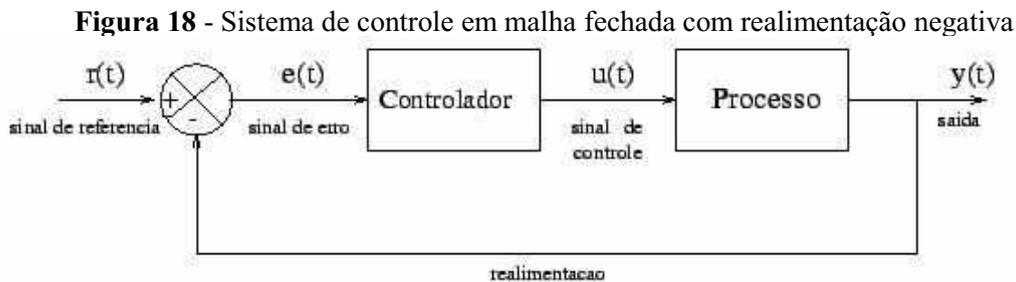
Fonte: FREITAS, 2014

2.4 Controle PID

Apesar aos inúmeros avanços em tecnologias para os processos industriais, o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) oferece solução simples e eficiente para a grande maioria dos sistemas de controle industrial. E pelo fato de PID existir a décadas e inúmeros estudos terem sido realizados, são oferecidas extensas listas de soluções (CAMPOS & TEIXEIRA, 2010).

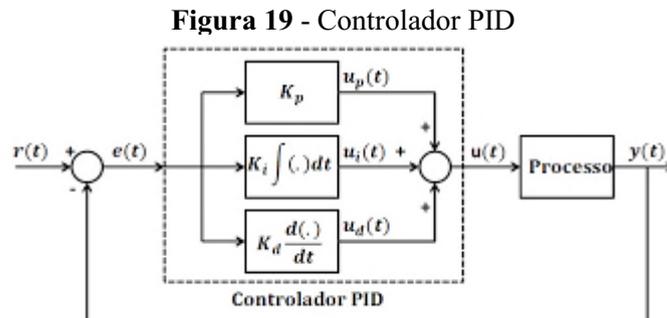
No contexto de sistemas de controle, uma malha de controle é o conjunto formado pelo processo controlado, pelo elemento de medição, pelo controlador e pelo elemento atuador. Uma malha de controle pode ser aberta ou fechada. O controle em malha aberta é quando o sinal do elemento de medição ou a variável do processo não é utilizado para corrigir a saída da malha ou variável controlada (CAMPOS & TEIXEIRA, 2010).

O controle em malha fechada busca atuar de forma a considerar o comportamento da saída do sistema, com isso é feita a realimentação da saída na entrada. Além disso, para melhorar o desempenho, o sinal de saída é equiparado a um sinal de referência (set-point), e a diferença entre esses dois sinais (erro) é usado para determinar o sinal que o controlador aplicará no processo.



Fonte: CAMPOS & TEIXEIRA, 2010

O controlador é um dispositivo que realiza o cálculo, utilizando o sinal do erro, para determinar o sinal que será aplicado no sistema. No caso, o controlador PID, possui três parâmetros de configuração chamados de: ação proporcional, integral e derivativa.



Fonte: CAMPOS & TEIXEIRA, 2010

Três diferentes estruturas do algoritmo de controlador PID são mais comumente encontradas na literatura: a forma padrão ou ISA, a forma paralela e a forma série. Abaixo são

mostradas as fórmulas de cada equação no domínio de Laplace (FERNANDES, 2009)

$$G_c = \frac{Y(s)}{U(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \text{ (PID - ISA)} \quad (1)$$

$$G_c = \frac{Y(s)}{U(s)} = K_c + \frac{1}{T_i s} + T_d s \text{ (PID -Paralelo)} \quad (2)$$

$$G_c = \frac{Y(s)}{U(s)} = K_c \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) + (T_d s + 1) \text{ (PID- Série)} \quad (3)$$

Sendo K_c o ganho proporcional, T_i a constante de tempo integral, T_d a constante de tempo derivativa. Abaixo será mostrado em detalhes cada um destes termos.

2.4.1 Ação Proporcional

A ação proporcional do PID, depende somente do erro calculado, que é a diferença entre o set-point e a variável de processo. O ganho do controlador proporcional (K_p) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro em função do tempo ($e(t)$). Com isso, o aumento do ganho proporcional pode aumentar a velocidade de resposta do sistema, assim como, a redução do ganho proporcional pode deixar o sistema com uma dinâmica lenta.

$$y(t) = K_p * e(t) \quad (4)$$

2.4.2 Ação Integral

A ação integral gera um sinal de saída que é proporcional ao nível e à duração do erro, ou seja, ao erro acumulado ($\int e(t)$). Isso fornece uma forma de corrigir o erro de off-set gerado pela ação proporcional buscando conduzir o erro de estado estacionário para zero. Sendo o tempo de integral dado por (τ_i).

$$y(t) = \frac{1}{\tau_i} * \int e(t) \quad (5)$$

2.4.3 Ação Derivativa

A ação derivativa fornece uma correção antecipada do erro, diminuindo o tempo de resposta e melhorando a estabilidade do sistema. O parâmetro do tempo derivativo (T_d), é responsável por determinar a velocidade de ação do sistema em relação as mudanças de erro no tempo, aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema, baseada na taxa de variação do erro em função do tempo ($\frac{de(t)}{dt}$).

$$y(t) = T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Devido às diferenças entre os parâmetros dos algoritmos ISA, série e paralelo, e também das diferenças que poderão haver entre os vários algoritmos, é necessário saber explicitamente em qual algoritmo é baseado o controlador.

Atualmente existem diversos métodos de sintonia na literatura. Os principais métodos são mostrados nas próximas seções.

2.5 Identificação de Sistemas

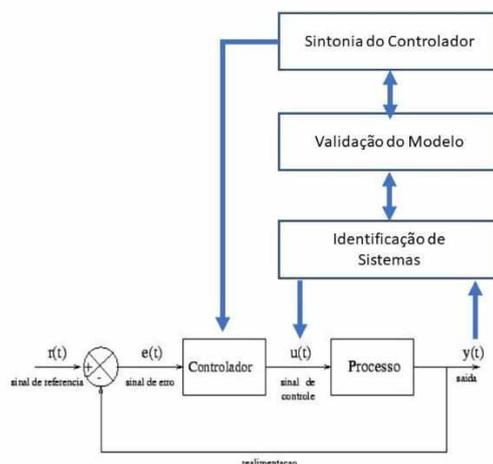
Para a sintonia de sistemas de controle é necessário primeiramente entender as características do processo a ser controlado. E a obtenção de um modelo que represente um determinado processo ou sistema real pode ser realizada através de uma modelagem matemática. A modelagem será uma aproximação do processo real (CAMPOS & TEIXEIRA, 2010).

Esta modelagem matemática pode ser caixa branca ou caixa preta. Na modelagem caixa branca, ou modelagem teórica, é baseada em modelo teórico do sistema, onde é necessário conhecer toda a característica dinâmica, físicas e químicas do processo. Na modelagem caixa preta, ou modelagem experimental, é obtido um modelo a partir da observação direta de dados coletados do processo a partir de uma excitação.

Para obtenção de uma sintonia de um controlador é necessário a identificação do sistema, validação do modelo, a proposta de uma sintonia baseada no modelo e então a efetivação da sintonia no controlador (FERNANDES, 2009). A figura 20 representa uma arquitetura do processo de sintonia típica de um processo industrial.

A identificação de sistemas é a forma de obtenção do modelo experimental, que consiste na coleta dos sinais de entrada u e sinais de saída real y do sistema a ser identificado como mostrado na figura 20. Então, é estimado uma função de transferência contínua ou discreta baseado nos dados coletados, que representará o comportamento do sistema (FERNANDES, 2009).

Figura 20 - Arquitetura de sintonia típica de processos industriais



Fonte: Adaptado de FERNANDES, 2006.

No contexto do modelo dinâmico do sistema, é possível analisar o sistema através das

relações entre as entradas e saídas durante uma resposta transiente. Isto se aplica a sistemas lineares invariantes no tempo. A análise da resposta transiente caracterizada em termos da resposta a um sinal de entrada. De acordo com a resposta transiente os processos podem ser classificados em processos auto regulatórios, processos integradores e processos instáveis. Cada um destes sistemas terá características distintas de sintonia (PASSOS, 2014).

O processo auto regulatório se caracteriza por sua saída y se estabilizar em um outro patamar após uma mudança na entrada u. Exemplos deste tipo são sistemas de temperatura, de vazão, pH e pressão. Ele é geralmente representado por um modelo de primeira ordem mais tempo morto:

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (7)$$

Onde, ganho estático (k_p) – determina a sensibilidade do processo a uma mudança na entrada. Constante de tempo (τ) – Mede a velocidade em que a PV atingirá seu valor final. Tempo morto (θ) – tempo necessário para a PV começar a mudar, devido a uma mudança na MV.

O processo integrador aumenta ou diminui o valor da sua saída y indefinidamente, após uma variação transiente. Exemplos desse tipo de sistema podem ser: controle de posição e controle de nível. No controle de nível, por exemplo, aumentando a vazão de entrada, o nível subirá constantemente até transbordar desde que a vazão de saída seja constante. A equação abaixo mostra uma equação típica de um sistema integrador.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{s(\tau s + 1)} e^{-\theta s} \quad (8)$$

O processo instável se caracteriza pela saída y crescer exponencialmente após uma excitação na entrada.

A identificação de sistemas pode ser dividida nas seguintes etapas (FERNANDES, 2009):

- Testes dinâmicos e coletas de dados - para obtenção dos valores de entrada e saída do processo, devem ser realizados testes de forma que perturbe a entrada do processo e então é revelado o comportamento dinâmico da saída. Esta excitação pode ser feita de diferentes formas, como um degrau, uma rampa, um pulso ou sinais binários pseudorrandômicos. Neste caso, deve ser armazenado tanto a entrada, quanto a saída e também o tempo de amostragem do sistema.
- Escolha do modelo matemático que representará o sistema – é necessário determinar como será obtido a função de transferência do sistema. Neste caso pode

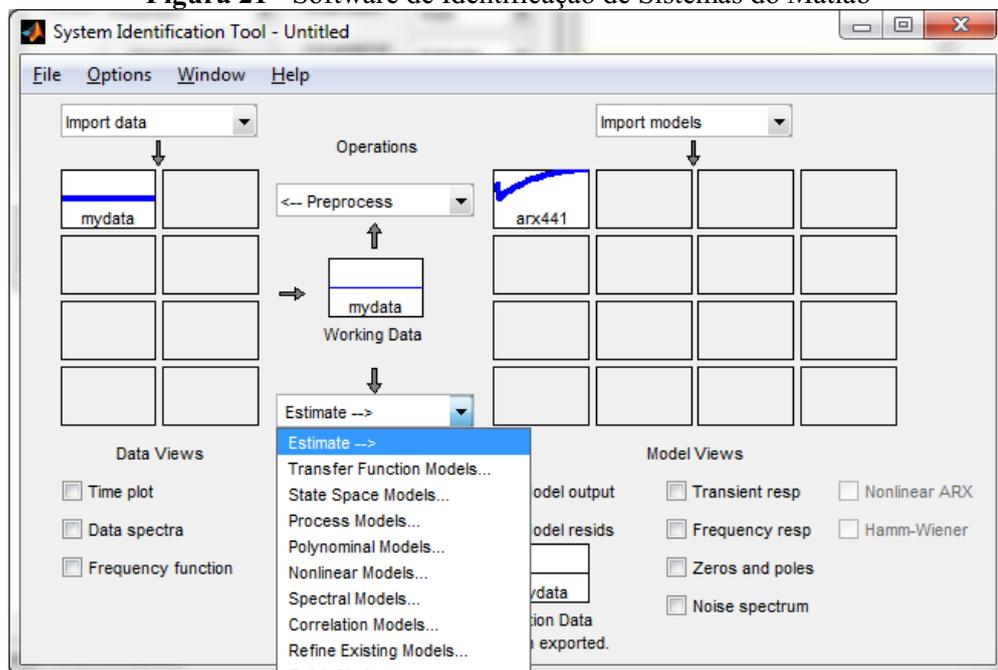
ser um sistema contínuo ou discreto, de primeira, segunda, terceira ordem com polos e zeros, com tempo morto, entre outros. A grande maioria dos sistemas industriais pode ser aproximado por um sistema de primeira ou segunda ordem com tempo morto.

- Estimação do modelo – Nesta fase são estimados os parâmetros da estrutura matemática escolhida que representará o comportamento do sistema dinâmico a ser identificado.
- Validação da estimativa - Nesta fase é verificado se realmente o sistema estimado possui as características de interesse do sistema original. Esta validação depende dos critérios de validação para obtenção do modelo.

Caso não se obtenha um resultado esperado é feita nova estimativa até que o modelo seja validado.

O software Matlab possui uma ferramenta de identificação de sistemas onde basta obter os dados de entrada u e saída y para o sistema e é possível fazer inúmeras análises e identificações de modelos de sistemas.

Figura 21 - Software de Identificação de Sistemas do Matlab



Fonte: *print screen* da tela de identificação de sistemas do programa Matlab

2.6. Sintonia de controladores PID

O controlador PID é o algoritmo de controle mais usado na indústria e devido a sua importância e décadas de existência, vários métodos de sintonia foram propostos. Nesta seção serão mostrados três métodos: Ziegler e Nichols (Z&N), IMC e os métodos baseados em critério de desempenho de erro integral. O Z&N é o método mais antigo de sintonia PID, enquanto que

os dois outros métodos se destacam pelo baixo *overshoot* e bom tempo de acomodação.

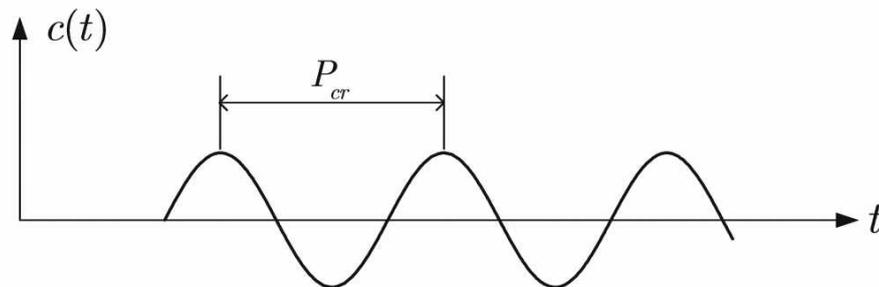
2.6.1. Método de Ziegler e Nichols

Ziegler e Nichols (1942) propuseram dois métodos de sintonia de PID um primeiro método baseado no sistema em malha fechada e um segundo método do sistema em malha aberta (CAMPOS & TEIXEIRA, 2010).

O primeiro método considera que o sistema está em malha fechada. Os passos para sintonia do PID são os seguintes:

1. Ajuste T_d e $1/T_i$ do controlador P+I+D em zero;
2. Aumente lentamente o ganho K_c até que a saída do sistema oscile periodicamente;
3. Seja K_u o ganho final e P_u o período de oscilação (figura 22);

Figura 22 - Sistema em oscilação



Fonte: CAMPOS & TEIXEIRA, 2010

4. Ajuste os parâmetros do controlador de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do primeiro método de Ziegler-Nichols

<i>Tipo de Controlador</i>	<i>K_c</i>	<i>T_d</i>	<i>1/T_i</i>
P	0,5K _u	0	0
PD	0,6K _u	P _u /8	0
PI	0,45K _u	0	1,2/P _u
PID	0,6K _u	P _u /8	2/P _u

O segundo Método de sintonia é baseado no sistema em malha aberta. Neste caso, após colocar o sistema em malha aberta, deve ser excitado a entrada do processo (u) e salvo a saída do sistema e obtém-se um modelo de primeira ordem com o tempo morto:

Tabela 2 - Segundo método de sintonia em malha aberta Ziegler e Nichols

<i>Controlador</i>	<i>Kp</i>	<i>Ti</i>	<i>To</i>
P	$\tau/(Kx\theta)$	---	---
PI	$0.9 \left(\frac{\tau}{Kx\theta}\right)$	$3.33x\theta$	---
PID	$1.2 \left(\frac{\tau}{Kx\theta}\right)$	$2x\theta$	$0.5x\theta$

Um problema destes dois métodos é que não é possível fazer uma sintonia de um sistema integrador. Além disso, o controlador proporciona uma saída com um overshoot alto o que as vezes não é desejável no sistema.

2.6.2. Método de Integral do Erro

Proposto inicialmente por Lopez e Rovira (1969) ele tem a vantagem de considerar toda a curva de resposta ao invés de apenas dois pontos como no método de Ziegler e Nichols (Z&N) (FERNANDES, 2009)

Considerando-se a entrada e saída de um sistema de controle dada por SP e y(t), o método é baseado na integral do erro e de critérios de desempenho. O algoritmo estudado foi o PID Padrão usando um sistema primeira ordem com o tempo morto. Existe quatro critérios considerados ISE, ITSE, IAE e ITAE. Os diferentes critérios são detalhados na tabela abaixo.

Tabela 3 - Método de integral do erro

Critério	Fórmula	Descrição
ISE – integral do erro quadrático	$\int_0^{\infty} e(t)^2 dt$	<p>Este critério proporciona grande peso para erros grandes e pequeno peso para erros pequenos.</p> <p>Não é muito seletivo - para variações dos parâmetros do sistema escolhido a variação apresentada pela integral é pequena.</p> <p>Um sistema projetado que utilize este critério:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pode apresentar uma rápida diminuição em um erro inicial grande. • A resposta pode ser rápida e oscilatória. • O sistema tem baixa estabilidade relativa.

ITSE - integral do erro quadrático ponderado pelo tempo	$\int_0^{\infty} t e(t)^2 dt$	Neste critério, um erro grande inicial é ponderado com peso baixo, enquanto os erros que ocorrem quando o sistema já está em regime são bastante penalizados. Este critério apresenta melhor seletividade que o critério ISE.
IAE – integral do erro absoluto	$\int_0^{\infty} e(t) dt$	Sistemas altamente subamortecidos ou sobreamortecidos apresentam um amortecimento razoável e uma característica de resposta transitória satisfatória.
ITAE - integral do erro absoluto ponderado pelo tempo	$\int_0^{\infty} t e(t) dt$	Um erro inicial grande em uma resposta a degrau unitário é ponderado com peso pequeno, e erros que ocorrem no tempo posterior são bastante penalizados. Este critério tem pequenas oscilações no sobre-sinal.

Para a variação de carga o objetivo é rejeitar as perturbações (problema regulatório), onde foi estudado para a razão de incontrolabilidade (θ/τ) entre 0 e 1, sendo o ganho proporcional do controlador (K_p), o tempo de integração (T_i) e o tempo derivativo (T_d) obtendo-se as seguintes equações:

$$K_p = \frac{1}{K} * \left(A * \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^B \right) \quad (9)$$

$$T_i = \tau / \left(C * \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^D \right) \quad (10)$$

$$T_d = \tau * \left(E * \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^F \right) \quad (11)$$

Os valores obtidos para as constantes A, B, C, D, E, F.

Tabela 4 - Parâmetros das equações

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0.984	-0.986	0.608	-0.707	---	---
PI	ITAE	0.859	-0.977	0.674	-0.68	---	---
PID	IAE	1.435	-0.921	0.878	-0.749	0.482	1.137
PID	ITAE	1.357	-0.947	0.842	-0.738	0.381	0.995

- Para variação de SP foi obtido as seguintes equações:

$$K_p = \frac{1}{K} * \left(A^* * \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{B^*} \right) \quad (12)$$

$$Ti = \tau / (C^* * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{D^*}) \quad (13)$$

$$Td = \tau * (E^* * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{F^*}) \quad (14)$$

- Onde as constantes A*, B*, C*, D*, E*, F* são:

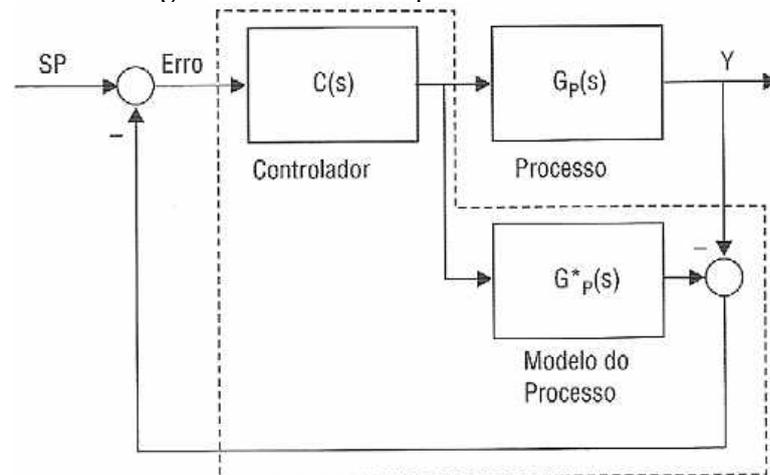
Tabela 5 - Constantes para cálculo da sintonia do PID

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0.758	-0.861	1.02	-0.323	---	---
PI	ITAE	0.586	-0.916	1.03	-0.165	---	---
PID	IAE	1.086	-0.869	0.740	-0.130	0.348	0.914
PID	ITAE	0.965	-0.850	0.796	-0.147	0.308	0.929

2.6.3. Método IMC (Internal Model Control)

O método do controle de modelo Interno IMC tem como objetivo a partir do modelo do processo e de uma especificação de desempenho obter o controlador adequado aberta (CAMPOS & TEIXEIRA, 2010).

Figura 23 - Modelo de processo método IMC



Fonte: CAMPOS & TEIXEIRA, 2010

Após obter o modelo do processo, sendo $C(s)$ o controlador, $G_p(s)$ o processo físico, e $G^*_p(s)$ o modelo de processo, onde a FT MF do sistema é:

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{G_p(s) * C(s)}{1 + G_p(s) * C(s)} \quad (15)$$

Onde o controlador é:

$$C(s) = Kp * \left(1 + \frac{1}{Ti * s} + Td * s\right) \quad (16)$$

Objetivo é que a resposta do sistema a um degrau no SP tenha uma dinâmica conhecida e fornecida como critério de ajuste.

- Exemplo, deseja-se que a FT do sistema MF seja uma FT de 1ª ordem com CT (λ). Onde (λ) é o critério de desempenho do sistema:

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{1}{\lambda*s+1} \quad (17)$$

- Lambda deve ser escolhido respeitando as restrições dinâmicas do processo. Por exemplo, não se deve escolher um (λ) menor do que o tempo morto (θ) pois pode levar a uma sintonia extremamente agressiva.
- Igualando as equações anteriores:

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{1}{\lambda*s+1} = \frac{Gp(s)C(s)}{1+Gp(s)C(s)} \quad (18)$$

- Obtendo o seguinte controlador capaz de satisfazer o critério:

$$C(s) = \frac{1}{Gp(s)*\lambda*s} \quad (19)$$

- Vantagem do IMC é que o desempenho do controlador está associado com a razão da constante de tempo em malha fechada (λ) com a de malha aberta (τ) que permite definir o desempenho desejado de forma clara.

Na sintonia com IMC, o único parâmetro a ser ajustado é o (λ)

- λ pode ser escolhido igual a constante de tempo dominante do processo (método robusto)
- Quanto maiores forem as não linearidades do sistema (histereses, banda mortas, saturações) ou quanto maior for o erro de modelagem, mais conservativa deve ser a sintonia.
- Tempo morto também tende a tornar o controle mais difícil, o que deve ser refletido em um maior parâmetro λ
- Para um processo de 1ª ordem com tempo morto, o método sugere a sintonia:

Tabela 6 - Tabela de sintonia de controladores com tempo morto segundo Skogestad

Modelo do processo	Kp	Ti	Td
$\frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s}$	$\frac{\tau}{K * (\lambda + \theta)}$	$\min[\tau, 4 * (\lambda + \theta)]$	---
$\frac{K}{(\tau_1 * s + 1)(\tau_2 * s + 1)} e^{-\theta s}$	$\frac{\tau}{K * (\lambda + \theta)}$	$\min[\tau, 4 * (\lambda + \theta)]$	τ_2
$K * e^{-\theta s}$	$\frac{1}{K}$	$\lambda + \theta$	---
$\frac{K}{s} * e^{-\theta s}$	$\frac{\tau}{K * (\lambda + \theta)}$	$4 * (\lambda + \theta)$	---
$\frac{K}{s(\tau_2 + 1)} * e^{-\theta s}$	$\frac{\tau}{K * (\lambda + \theta)}$	$4 * (\lambda + \theta)$	τ_2

- Outros sistemas analisados e suas respectivas sintonias

Tabela 7 - Tabela de sintonia de controladores sem tempo morto segundo Rivera

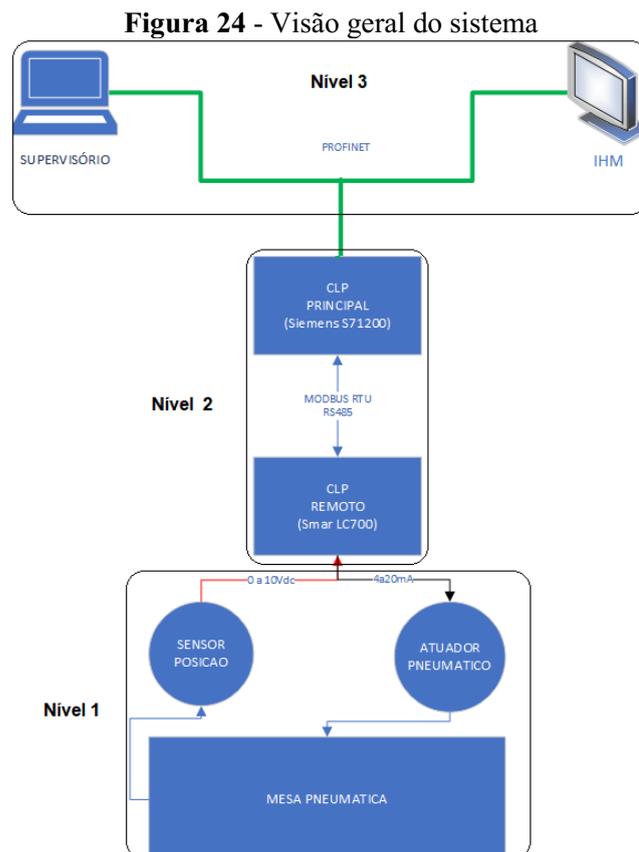
Modelo do Processo	Kp	Ti	Td
$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K * \lambda}$	τ	---
$\frac{K}{(\tau_1 * s + 1)(\tau_2 * s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K * \lambda}$	$(\tau_1 + \tau_2)$	$\frac{\tau_1 * \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
$\frac{K}{s}$	$\frac{1}{K * \lambda}$	---	---
$\frac{K}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{1}{K * \lambda}$	---	τ

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE PNEUMÁTICO

Neste trabalho foi projetado um sistema de controle de uma planta pneumática com somente um grau de liberdade, ou seja, que trabalha somente em um eixo. Este sistema pneumático apesar de simples e relativamente pequeno pode ter aplicações diversas na indústria e também acadêmicas como um controle de pêndulo invertido, ou posicionador de uma ferramenta.

3.1 Arquitetura geral do sistema

O sistema de controle da planta pneumática, é composto por três níveis da pirâmide de automação. A parte dos dispositivos de campo que é a região de nível 1, composta por sensores e atuadores, o sistema de controle no nível 2, na qual foi feita toda a lógica de controle, e o sistema de supervisão no nível 3, onde é possível visualizar os dados e interagir com o sistema. A figura 24 apresenta a visão geral do sistema, contemplando todos os níveis citados acima.



Fonte: Elaborada pelo Autor

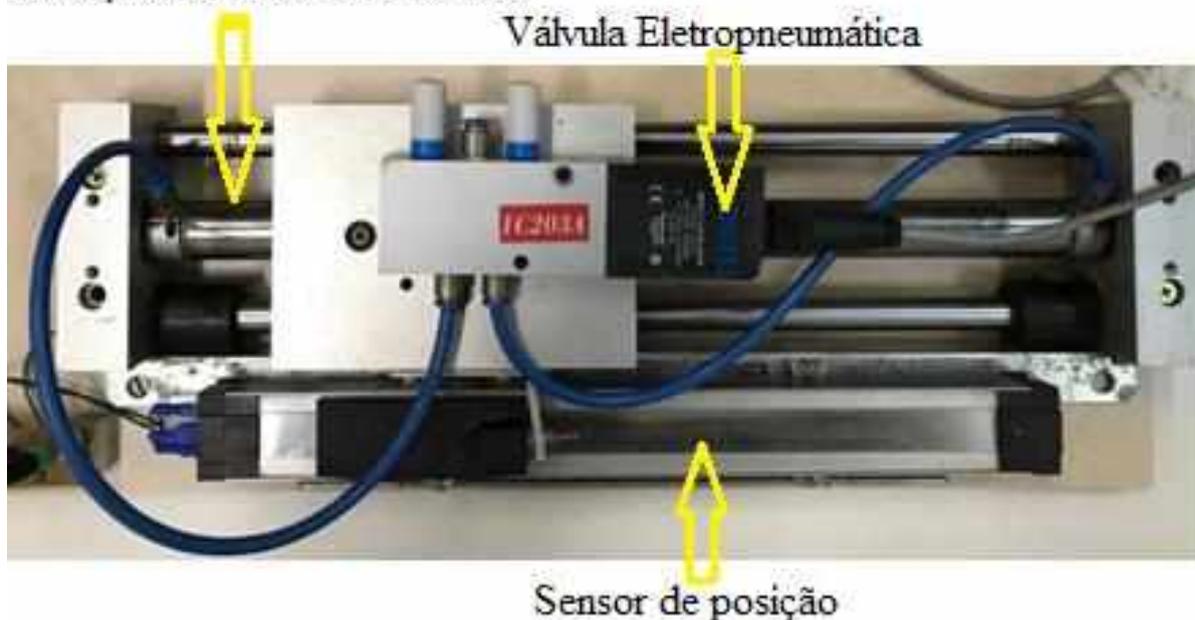
3.2 Atuadores e sensores

O nível 1 apresenta toda a estrutura que receberá os comandos de controle, na qual está presente o servoposicionador pneumático FESTO, uma válvula eletropneumática de controle

proporcional FESTO MPYE-5-1/8-LF-010 B e um sensor de posição FESTO TLH 225.

O servoposicionador pneumático FESTO é basicamente um cilindro de dupla ação, com apenas um eixo de movimentação, com aproximadamente 40 centímetros de comprimento, contendo duas vias de alimentação de ar comprimido, em que com a diferente proporção de alimentação em cada via, ocorre um deslocamento para direita ou esquerda da mesa, e em caso de uma mesma proporção de alimentação de ar nas duas vias, a mesa se mantém imóvel. A figura 25, mostra visão do sistema pneumático.

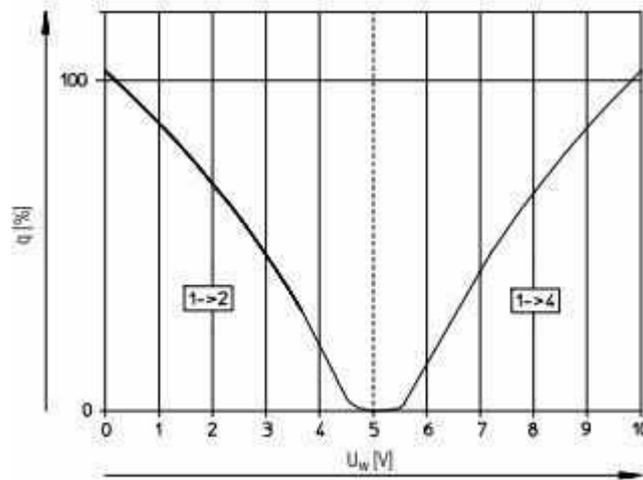
Figura 25 – Visão real da planta de movimento em um só eixo
Servoposicionador Pneumático



Fonte: Elaborada pelo Autor

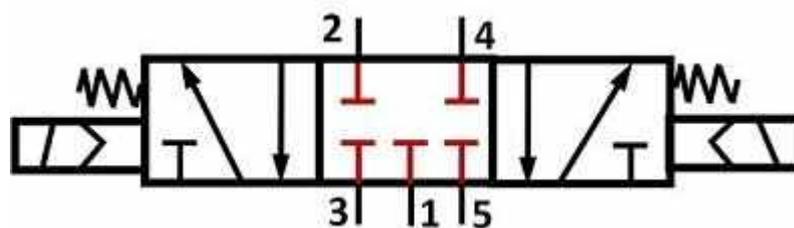
De acordo com a figura 25, as duas vias de entrada de ar comprimido, do servoposicionador pneumático, foram ligadas às duas saídas de ar da válvula eletropneumática, que fornecerá diferentes proporções de vazão entre as duas vias, dependendo do sinal aplicado na válvula.

A válvula eletropneumática proporcional é alimentada por uma fonte de tensão contínua de 24 volts. O sinal de controle a ser enviado para a válvula é de 0 a 10 volts, dependendo do sinal aplicado apresenta diferentes aberturas entre as duas vias de saída de ar comprimido da válvula. O gráfico presente na figura 26, demonstra o comportamento da válvula para diferentes tipos de tensão aplicada.

Figura 26 - Tensão e proporção de vazão

Fonte: FESTO, 2019

De acordo com a figura 26, é possível observar que a alimentação de ar em cada via vai depender do sinal aplicado, ou seja, na faixa de $0 < U_w < 5$ volts, a válvula terá o fluxo de ar passando no sentido 1->2. Então, na figura 25 a mesa pneumática central se moverá para a direita, e na faixa de $5 < U_w < 10$ volts, o sentido será de 1->4, que representa o movimento para a esquerda. A válvula estará no ponto estável quando $U_w = 5$, ou seja, não vai enviar ar para nenhum canal. É possível observar os caminhos de fluxo de ar pela figura 27, que representa a visão técnica da válvula.

Figura 27 - Visão técnica da válvula

Fonte: FESTO, 2019

Nesse sistema foi utilizado um sensor de posição FESTO TLH225, que indica a posição atual da mesa. Este dispositivo é alimentado por uma tensão de 10 volts, fornecendo um sinal de saída de 0 a 10 volts e possui um tamanho aproximado de 45 centímetros. A figura 28 mostra o sensor que foi utilizado.

Figura 28 - Sensor de posição FESTO TLH225



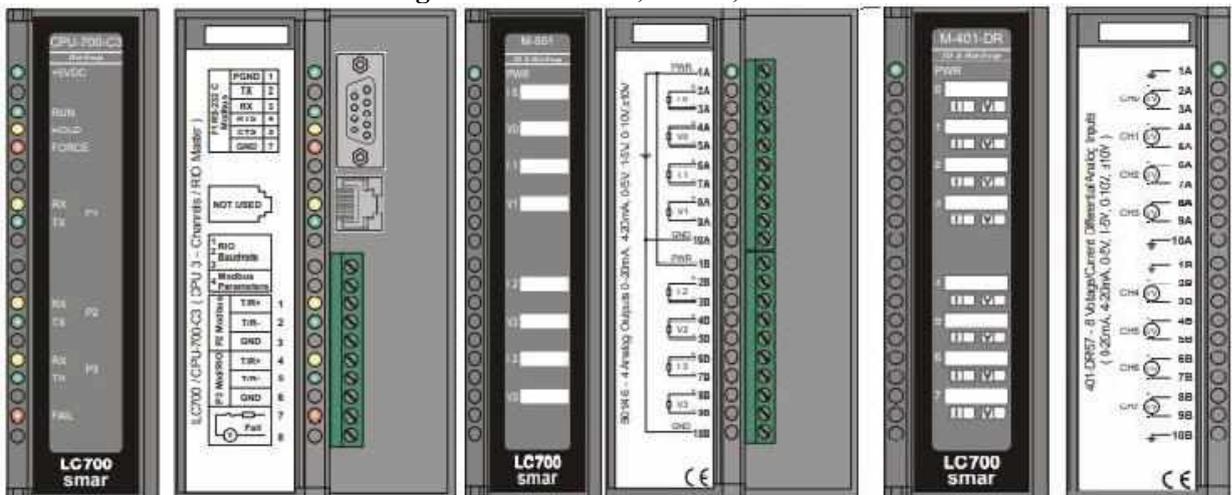
Fonte: FESTO, 2015

3.3 Sistema de controle

No sistema de controle foi utilizado dois controladores lógicos programáveis: o LC700 da Smar e o Siemens S7-1200. O principal motivo de utilizar dois controladores é porque o laboratório de Controle e Automação possui apenas cartões de entrada e saída analógica no dispositivo Smar LC700. Sendo assim, foi possível testar o controle em dois cenários de utilização: um controle Local no próprio LC700 e também um controle remoto usando o LC700 como uma estação remota que se comunica com o CLP Siemens S7-1200.

O controlador LC700 mostrado na figura 29, recebe comandos de leitura e escrita via comunicação Modbus enviando o sinal de controle para a válvula eletropneumática proporcional, através do módulo de saída analógica M-501, e recebe o sinal proveniente do sensor de posição, pelo cartão de entrada analógica M-401.

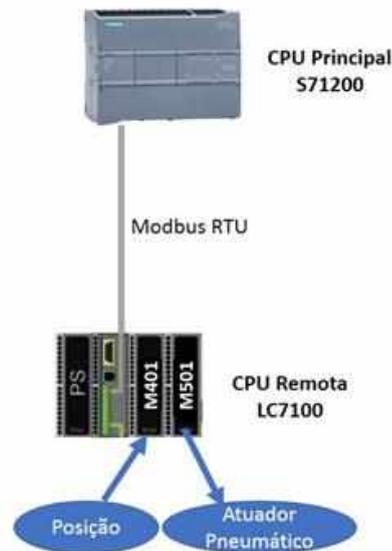
Figura 29 - CPU700, M-501, M-401



Fonte: Adaptado de SMAR (2007)

No cenário do LC700 como remota, ele comunicou com o PLC Central S71200 através do protocolo Modbus RTU RS485 conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Controlador Siemens S7-1200 em um cenário de comunicação com Remota Modbus



Fonte: Elaborada pelo autor

Os dois controladores apresentam portas RS485, para comunicação através da rede industrial Modbus RTU. Com isso, o dispositivo S7-1200 é o mestre da comunicação Modbus e envia sinais de controle via rede industrial Modbus RTU RS485 para o LC700 escravo, que atua sobre o elemento final de controle e recebe sinal do sensor de posição.

Para conseguir controlar o sistema pneumático foi implementando uma lógica de controle PID em malha fechada, com programação Ladder, no programa TIA Portal do controlador Siemens S7-1200.

3.4 Sistema de Supervisão

O sistema de supervisão foi feito utilizando o programa Indusoft, em que foi desenvolvida uma interface que possibilita observar gráfico de variáveis do sistema, tais como:

1. Variável controlada ou de processo (PV);
2. Variável manipulada (MV);
3. Set point do sistema (SP);

Além disso, foi possível interagir com sistema supervisório, alterando o Set Point, e também alterar os parâmetros do controlador PID.

A comunicação entre o supervisório e o controlador lógico programável foi através do protocolo de rede Ethernet, utilizando o driver SIETH.

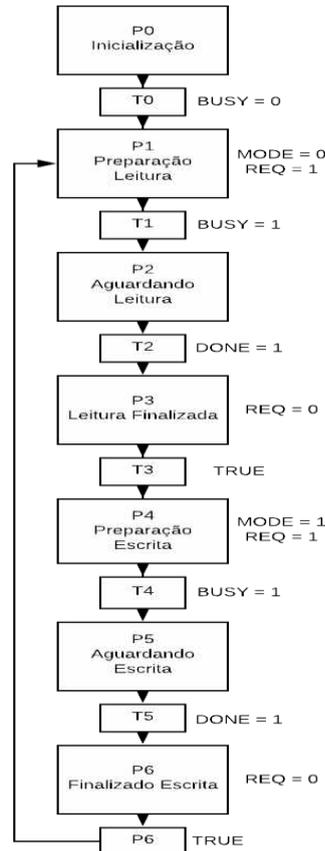
3.5 Sistema de Comunicação Modbus

Durante o desenvolvimento, foi implementada a comunicação Modbus entre os dois controladores (S71200 e LC700) para posteriormente implementar a lógica de controle.

3.5.1 Máquina de estados

Utilizando os conceitos, do tópico 2.3.1, foi implementada uma lógica de máquina de estados para realizar a aplicação da rede industrial Modbus, através da linguagem de programação SFC, conforme a figura 31.

Figura 31 - Lógica SFC Comunicação Modbus



Fonte: Elaborada pelo Autor

Os passos da máquina de estados funcionam da seguinte forma:

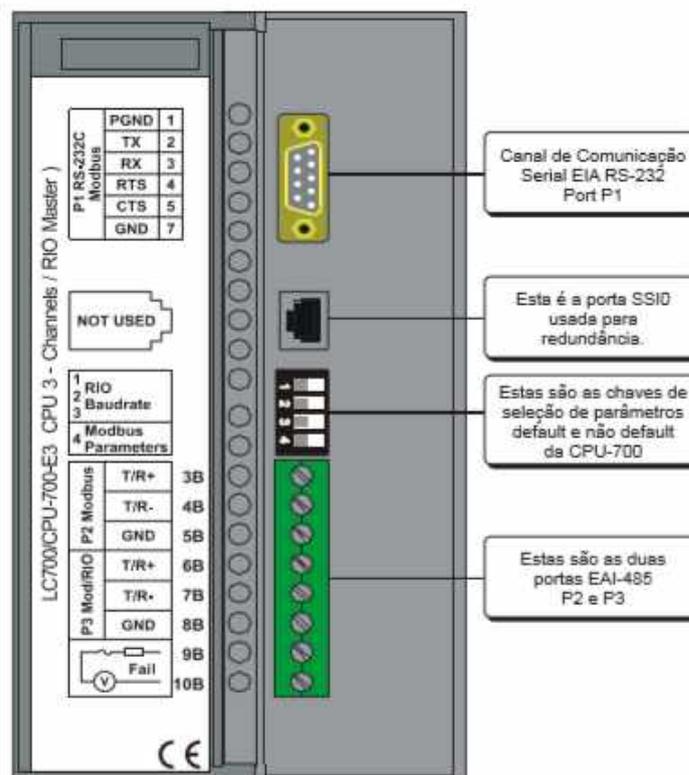
1. O bloco “Modbus_Comm_Load”, de configuração Modbus presente no TIA Portal V13, é chamado no passo 0, para realizar a inicialização do sistema e é configurado os parâmetros da comunicação.
2. No passo 1, é realizada a preparação para a leitura de dados, então é feita a alteração do parâmetro ($MODE = 0$) do bloco “Modbus_Master” e realizada a requisição ($REQ = 1$)
3. A transição para o passo 2 é ativada devido a execução de feedback do bloco ”Modbus_Master” entrando no estado de $BUSY = 1$
4. A transição para o passo 3 é realizada quando o dado é transferido com sucesso, então o bloco “Modbus_Master” retorna $DONE = 1$

5. No passo 3, a leitura é finalizada e o dado armazenado e alterado o estado de requisição (REQ = 0)
6. No passo 4, é realizada a preparação para a escrita de dados, então é feita a alteração do parâmetro (MODE = 1) do bloco “Modbus_Master” e realizada a requisição (REQ = 1)
7. A transição para o passo 5 é ativada devido a execução de feedback do bloco ”Modbus_Master” entrando no estado de BUSY = 1
8. A transição para o passo 6 é realizada quando o dado é transferido e escrito com sucesso, então o bloco “Modbus_Master” retorna DONE = 1
9. No passo 6 é sinalizada a finalização da escrita e alterado o estado de requisição para (REQ = 0)
10. Com a transição 6 ativa, é feita a realimentação do sistema, retornando para o passo 1.

3.5.2 Configuração Modbus RTU LC700

Para realizar a configuração do controlador LC700 como escravo Modbus e alterar os parâmetros da porta P2, que foi utilizada, deve ser selecionada a chave 4 para operar no modo não default, no módulo da CPU-700, conforme a figura 32.

Figura 32 - CPU LC700



Com isso, através do ambiente de configuração CONF700 da Smar, e da porta P1, foi utilizado o cabo serial RS-232 para entrar e configurar a porta P2 conforme mostrado na figura 33. Os parâmetros da comunicação utilizados por todo o projeto foram: Endereço modbus do escravo igual a 5, baudrate 115200bps, stop bit 1 e paridade Even.

Figura 33 - Configuração Modbus LC700

LC700 Ajustes Atuais	
ID	1
Baud Rate	9600
Paridade	EVEN
Porta	1

LC700 Novos Ajustes		
Novo ID:	5	
Porta:	Baud Rate:	Paridade:
P1	9600	EVEN
P2/P3	115200	NONE
P1 (RTS/CTS Timeout)	0 ms	
(0=Desativa RTS/CTS)		
Time Delay	0 ms	
Off Duty	4 ms	

3.5.3 Configuração Modbus Siemens S7-1200

Para implementar a lógica de máquina de estados apresentada no tópico 3.5.1, foi realizada a conversão do sistema em linguagem SFC para Ladder, que foi a linguagem padrão utilizada durante o desenvolvimento do projeto, que é aplicável no programa de configuração da Siemens. A lógica Ladder completa se encontra no anexo 1.

Além da conversão, alguns blocos de função próprios do ambiente de configuração da Siemens (TIA Portal V13), foram utilizados, como o “MB_COMM_LOAD” e “MB_MASTER”, para realizar a configuração de comunicação Modbus RTU485.

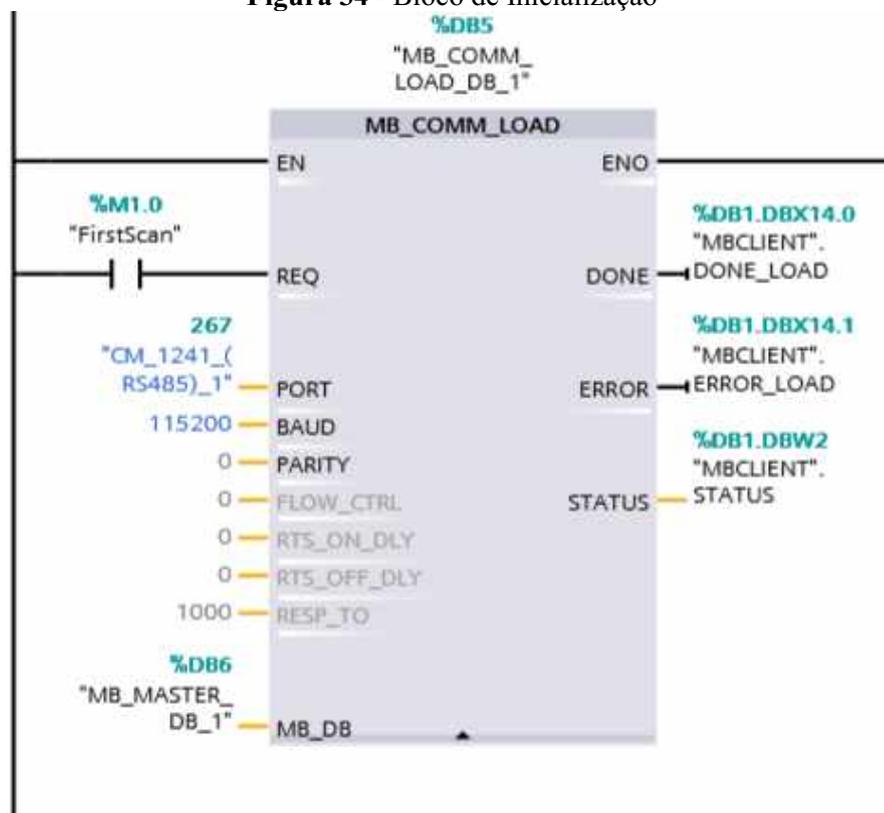
O bloco “MB_COMM_LOAD”, é o responsável por inicializar a comunicação, determinar os parâmetros de comunicação e o dispositivo físico, a ser utilizado para realizar a conexão. A configuração do bloco apresentado na figura 33, deve ser a mesma apresentada no tópico 3.5.2, ou seja, tanto no mestre como no escravo, os padrões de velocidade de transmissão e paridade foram configurados iguais.

O dispositivo físico que foi utilizado é o “CM_1241”, que é um módulo de expansão, responsável por estabelecer o meio físico da comunicação Modbus RTU RS485, ele foi referenciado na entrada PORT do bloco.

Para garantir que a comunicação seja sempre inicializada, foi adicionada uma bobina na entrada do campo REQ do bloco, essa função determinada “FirstScan”, sempre é ativa quando o sistema é inicializado, inicializando a comunicação MODBUS.

O campo MB_DB, é utilizado para referenciar o bloco MB_MASTER que é responsável por determinar o modo operação (leitura/escrita), e realizar as operações da comunicação.

Figura 34 - Bloco de Inicialização

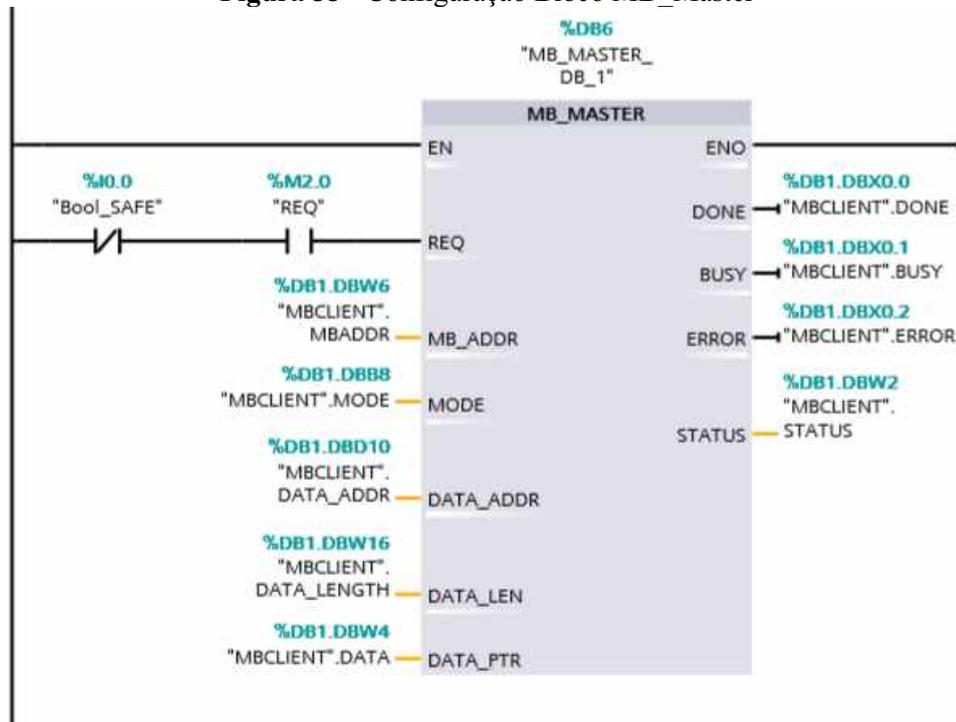


O bloco “MB_MASTER” foi utilizado para prover o modo de operação do sistema, sendo leitura e escrita. O bloco funciona alterando o modo (escrita/leitura) através da entrada “MODE”. Com isso é determinado através do “DATA_ADDR”, o registro inicial a ser lido ou escrito, através do “DATA_LEN” é determinado quantos registros serão lidos após o registro inicial e por fim o DATA_PTR é o campo responsável por captar ou escrever o dado no registro Modbus.

O bloco MB_MASTER é chamado toda as vezes que é gerado um sinal de requisição através da bobina “REQ”, outra bobina presente é a “Bool_SAFE”, que é um modo de parar o sistema (comunicação) em caso de panes ou problemas. O principal motivo de utilizar essa

bobina de segurança, foi para a sintonização do controlador, pois em caso de problemas com a determinação dos parâmetros seria possível parar a operação da planta.

Figura 35 - Configuração Bloco MB_Master



3.5.4 Configuração de registros Modbus

Após a implementação dos blocos de comunicação Modbus no controlador S71200, foi definido os registros a serem utilizados a partir do controlador LC700, pois o qual é utilizado como escravo Modbus, e está associado aos cartões de entradas e saídas analógicas.

O controlador LC700 associa automaticamente, registros Modbus, a todos os tipos de entradas, saídas e variáveis de memória. Com isso, com a configuração dos módulos de entrada e saída analógica M-401 e M-501 no ambiente de configuração CONF700, já são definidos os seus respectivos registros após a associação. O sistema utiliza da teoria referenciada no tópico 2.2.3, para definir o tipo de registro a ser utilizado com cada tipo de variável de entrada, saída e de memória.

Figura 36 – Módulos associados ao controlador LC700

Hardware Configuration for Main					
Rack	Slot	Module	Description	Comment	
0	0	PS-AC-0	Power Supply Module 90-264VAC to 5VDC @3A / 24VDC @300mA (Also: PS-AC-R)		
0	1	CPU-700-D3	CPU Module V11.51 - 28K bytes E2PROM - 15MHz Controller		
0	2	M-401-DR	1 Group of 8 Differential Analog Inputs with Shunt Resistors		
0	3	M-501	4 Analog Outputs with Individual Terminals for Current and Voltage		

O programa conta com uma página de Monitoração de endereços Modbus, a figura 37 representa fielmente os registros que podem utilizados e manipulados.

Figura 37 - Registros Modbus no ambiente de configuração do LC700

Modbus Address						
Tag	Value	User Tag	Modbus Add.	Type	InOut	Class
VM1BG1T111.0			02001	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
VM1BG1T111.1			02002	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
VM1BG1T111.2			02003	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
VM1BG1T111.3			02004	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
VM1BG1T111.4			02005	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
VM1BG1T111.5			02006	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
VM1BG1T111.6			02007	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
VM1BG1T111.7			02008	BOOL	OUTPUT	VIRTUAL
M-401G1NR4I002.0		AI1	30001	INT	INPUT	IO
M-401G1NR4I002.1		AI2	30002	INT	INPUT	IO
M-401G1NR4I002.2			30003	INT	INPUT	IO
M-401G1NR4I002.3			30004	INT	INPUT	IO
M-401G2NR4I002.4			30005	INT	INPUT	IO
M-401G2NR4I002.5			30006	INT	INPUT	IO
M-401G2NR4I002.6			30007	INT	INPUT	IO
M-401G2NR4I002.7			30008	INT	INPUT	IO
M-501G1NR2O003.0		AO1	40001	INT	OUTPUT	IO
M-501G1NR2O003.1		AO2	40002	INT	OUTPUT	IO
M-501G2NR2O003.2			40003	INT	OUTPUT	IO
M-501G2NR2O003.3			40004	INT	OUTPUT	IO

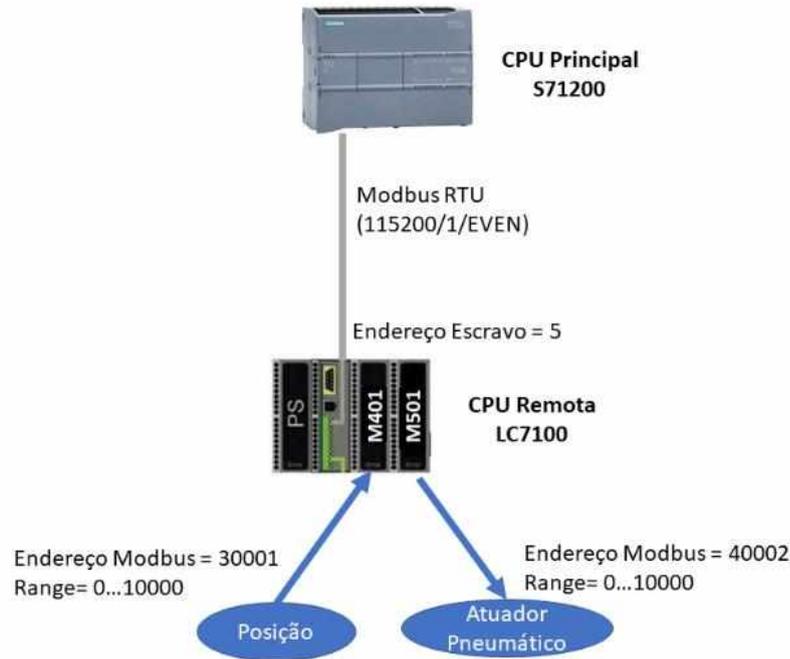
Foram utilizados dois registros Modbus presentes na figura 37 para realizar a manipulação e atuação do sistema de controle.

Os registros utilizados foram:

1. Registro 30001 (Input Register), é de uma entrada analógica (inteira de 2 bytes) presente no módulo M-401, com sinal de entrada de 0 a 10 volts sendo representados no valor de 0 a 10000. A entrada é responsável por receber o sinal proveniente do sensor de posição (FESTO TLH225) do sistema servoposicionador pneumático referenciado no tópico 3.2.
2. Registro 40002 (Holding Register), é de uma saída analógica (inteira de 2 bytes) presente no módulo M-501, com sinal de saída de 0 a 10 volts correspondente ao valor digital de 0 a 10000. A saída é responsável por enviar o sinal de controle para a válvula eletropneumática de controle proporcional FESTO MPYE-5-1/8-LF-010 B.

A figura 38 mostra um resumo da estrutura da comunicação Modbus no cenário de uso de CPU mestre e remota Modbus.

Figura 38 - Configuração Modbus no Cenário com Remota LC700



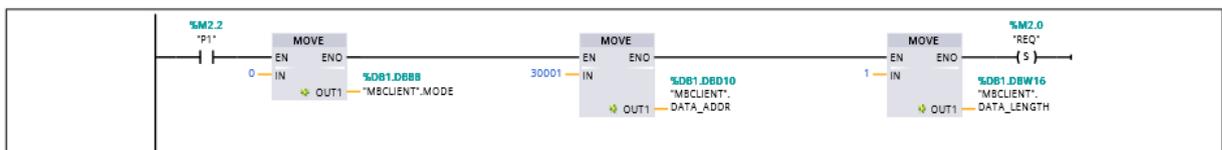
Fonte: Elaborada pelo Autor

3.5.5 Lógica ladder de leitura

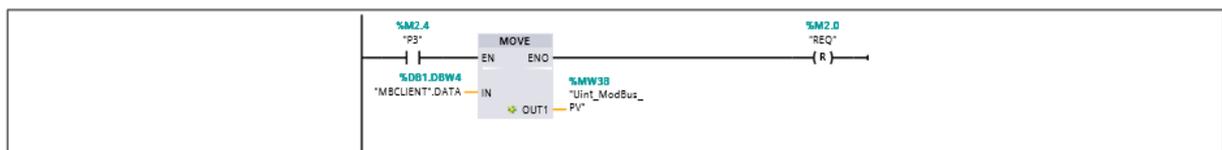
A lógica ladder de leitura foi definida conforme o diagrama apresentado no tópico 3.2.1, ou seja, no passo P1 tem-se a preparação para leitura do registro Modbus 30001 e no passo P3 a finalização da leitura. A figura 39 apresenta a programação.

Figura 39 - Lógica ladder de leitura input register modbus

Network 4: P1 PREPARAÇÃO DA LEITURA



Network 5: P3 TERMINO DA LEITURA



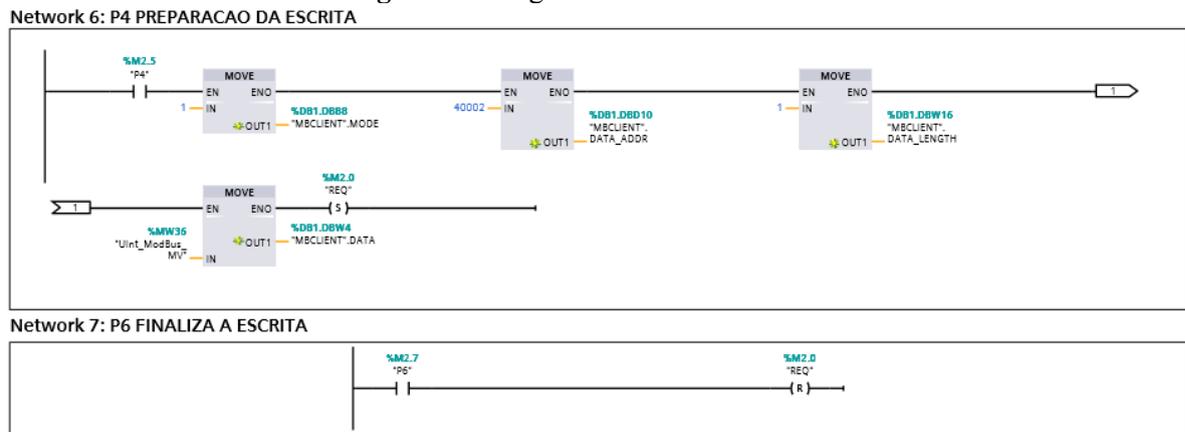
No passo “P1”, tem-se que a variável “MBCLIENT.MODE” recebe o valor de 0 que refere ao estado de leitura, “MBCLIENT.DATA_ADDR” recebe 30001, que é o registro inicial de leitura e o “MBCLIENT.DATA_LENGTH”, que recebe 1, sendo que será lido somente o registro de início. Todos esses dados são referenciados e enviados ao bloco “MB_MASTER” para a execução da comunicação.

No passo “P3”, tem-se que o dado lido do registro Modbus, que é o sinal proveniente do sensor de posição do sistema servoposicionador pneumático, está sendo movido para a variável “Uint_ModBus_PV”, com isso é finalizada a leitura.

3.5.6 Lógica Ladder de escrita

A lógica ladder de escrita foi definida conforme o diagrama apresentado no tópico 3.5.1, ou seja, no passo P4 tem-se a preparação para escrita do registro Modbus 40002 e no passo P6 a finalização da escrita. A figura 40 apresenta a programação.

Figura 40 - Lógica ladder escrita Modbus



No passo “P4”, tem-se que a variável “MCLIENT.MODE” recebe o valor de 1 que refere ao estado de escrita, “MCLIENT.DATA_ADDR” recebe 40002, que é o registro inicial de escrita e o “MCLIENT”.DATA_LENGTH, que recebe 1, sendo que será escrito somente no registro de início. Após a definição da escrita, o dado a ser escrito é movido da variável “Uint_ModBus_MV”, para o campo de “MCLIENT.DATA”, com isso no passo “P6” é finalizada a escrita e atualizado o registro Modbus.

3.6 Lógica de Controle

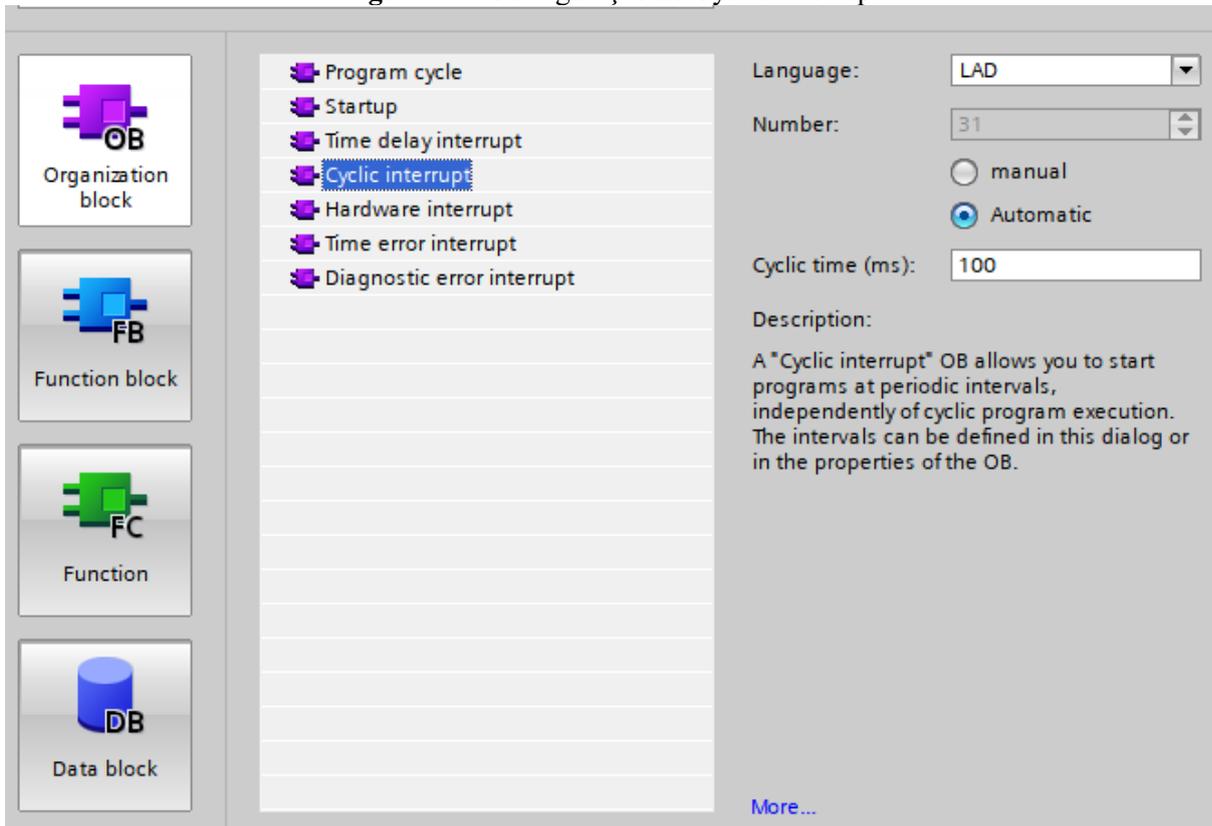
A lógica de controle foi feita através do sistema de configuração da Siemens TIA Portal V13, utilizando o bloco “PID_COMPACT”.

3.6.1 Lógica Ladder de controle

Para a aplicação do sistema de controle PID, foi utilizado o bloco “PID_COMPACT” presente no ambiente de programação da Siemens TIA Portal V13. Esse bloco não pode ser utilizado diretamente na “Ladder Main”, pois o seu tempo de atualização de dados não acompanha a velocidade de varredura do controlador. Sendo assim foi criado um “Organization Block” do tipo “Cycle Interrupt”, que executa a atualização de dados de acordo com o tempo definido pelo usuário, independentemente do tempo cíclico de varredura do controlador. O

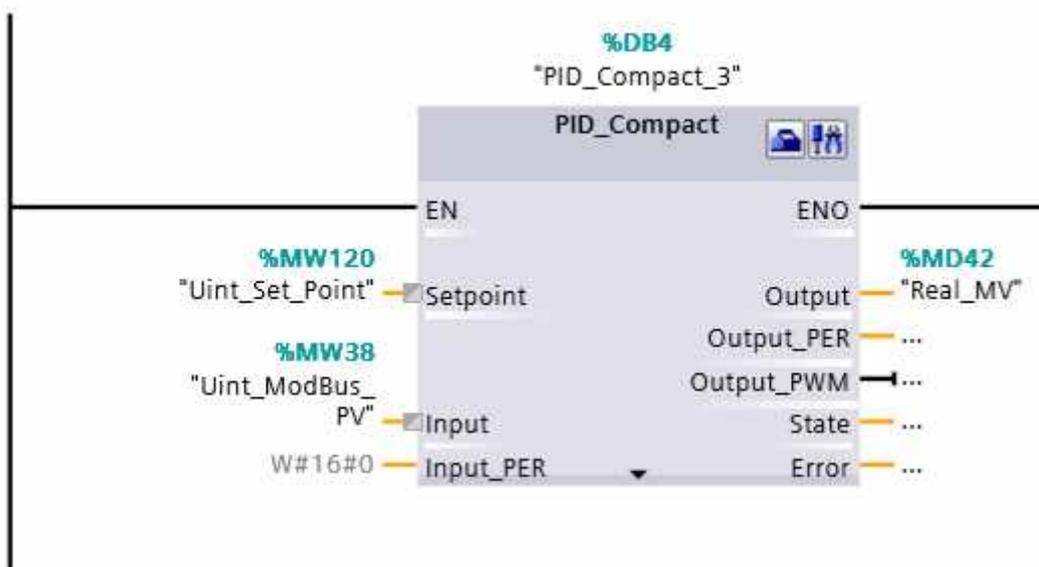
tempo utilizado para atualização de dados foi de 100ms, conforme a figura 41.

Figura 41 - Configuração do Cyclic Interrupt



Após a criação do campo de programação ladder independente (Bloco Organizacional do tipo “Cyclic Interrupt”), foi adicionado o bloco “PID_Compact” e feita a configuração. A associação de variáveis ao bloco pode ser vista na figura 42.

Figura 42 - Bloco PID_COMPACT Siemens TIA Portal V13



Foi associada a variável “Uint_Set_Point” a entrada “Setpoint”, a variável “Uint_Modbus_PV” a entrada “Input” e a saída “Output” à variável “Real_MV”. As variáveis

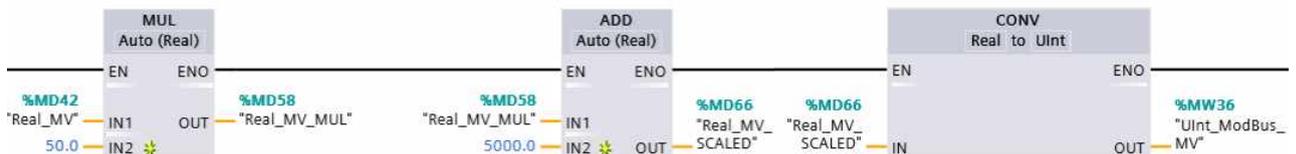
“Uint_Set_Point” e “Uint_Modbus_PV”, possuem conversão implícitas do bloco “PID_Compact”, para o tipo Real, pois elas são definidas como inteiras sem sinal para poderem ser movidas aos registros Modbus.

Para adequar o sinal de saída com a finalidade de satisfazer o ponto de estabilidade da válvula, foi realizado algumas configurações no bloco PID, pois a válvula apresenta região de estabilidade em 5v, sendo o ponto em que não é direcionado ar para nenhuma das vias da válvula, conforme a figura 26.

O sinal de saída do bloco foi ajustado para excursionar de -100 a 100 por cento, e a após saída do bloco PID foi feita a linearização para atender as necessidades da região de estabilidade da válvula e de amplitude do sinal da válvula. A linearização fez o sinal passar de -100 a 100, para 0 a 10000, que é o valor aceito pelo registro Modbus, ou seja, para 0 a saída do cartão analógico será de 0v e para 10000 a saída analógica será de 10v. Essa manipulação do sinal de controle fez também com que quando o bloco PID entrar em estado de estabilidade (output = 0), o sinal de controle enviado para a válvula será de 5v, ou seja, 5000 no registro Modbus, permitindo com que a válvula não envie ar para nenhuma das vias.

Para atender tanto a região de estabilidade da válvula, e o valor que pode ser aplicado ao registro Modbus, foi feita a lógica ladder presente na figura 43.

Figura 43 - Linearização da saída



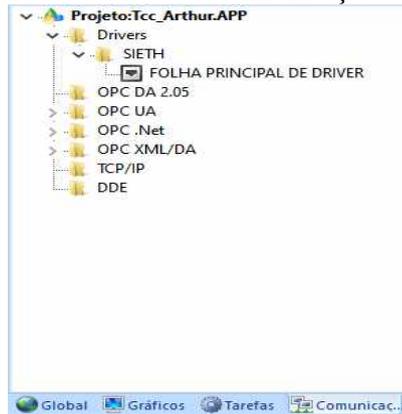
3.7 Construção do Sistema Supervisório

O sistema supervisório implementado foi através do programa Wonderware Indusoft Versão Educacional 8.0, com licença fornecida pela a Universidade Federal de Uberlândia.

3.7.1 Driver de Comunicação SIETH

A comunicação entre o supervisório e o controlador Siemens S7-1200, para a aquisição de dados e atuação no sistema, foi feita através de um driver desenvolvido pela própria Indusoft chamado SIETH, que utiliza do protocolo Profinet usando TCP/IP como camada de transporte.

Com isso, foi adicionado no campo “Drivers” na aba de comunicação, o driver Sieth, conforme é mostrado na figura 44.

Figura 44 - Driver de comunicação SIETH

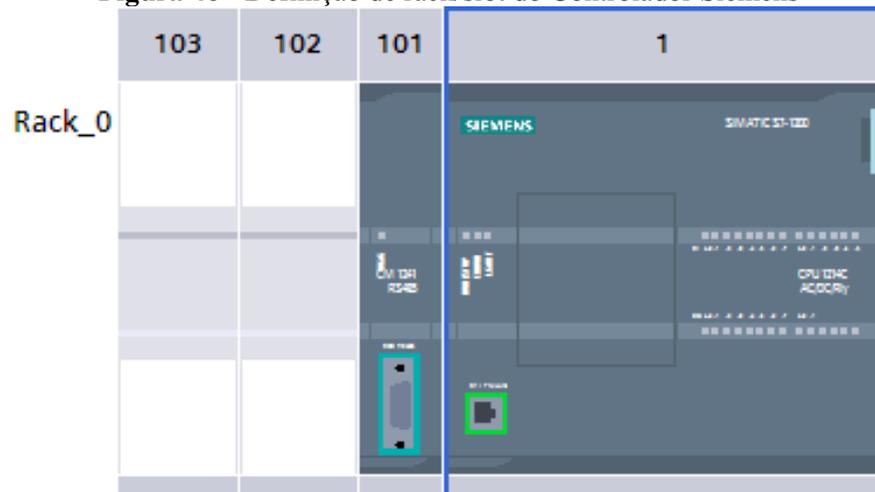
Após a adição do driver, foi feita a configuração de variáveis para realizar a aquisição de dados e interação com o sistema. Com isso, os dados que serão coletados do processo e as variáveis que poderão ser manipuladas são representadas pelas “Tags”, definidas para satisfazer a necessidade do sistema, representadas na figura 45.

Figura 45 - Tags do sistema supervisorio

	Nome da Tag	Estação	Endereço I/O	Ação
	Filtro de Texto	Filtro de Texto	Filtro de Texto	(Todos) ▼
1	PV	192.168.0.1:0:1	MW86	Ler ▼
2	SP	192.168.0.1:0:1	MW84	Ler+Escrev... ▼
3	MV	192.168.0.1:0:1	MW88	Ler+Escrev... ▼
4	Proportional	192.168.0.1:0:1	MD72	Ler+Escrev... ▼
5	Integral	192.168.0.1:0:1	MD76	Ler+Escrev... ▼
6	Derivative	192.168.0.1:0:1	MD80	Ler+Escrev... ▼
7	Modbus_Client_Error	192.168.0.1:0:1	DB1.DBX0.2	Ler ▼
8	Modbus_Load_Error	192.168.0.1:0:1	DB1.DBX14.1	Ler ▼
9	Safe	192.168.0.1:0:1	M4.1	Ler+Escrev... ▼

Através da figura 45, pode-se observar que no campo estação (que se organiza da seguinte maneira IP_equipamento:rack:slot), não se altera nenhum campo, pois ele se refere ao dispositivo que estabelece as variáveis, que no caso é o controlador S7-1200, e como todas as variáveis são do tipo de memória o slot se mantém. Com isso o dispositivo está configurado no IP(192.168.0.1) no rack (0) e no slot (1) conforme a figura 46.

Figura 46 - Definição de rack/slot do Controlador Siemens

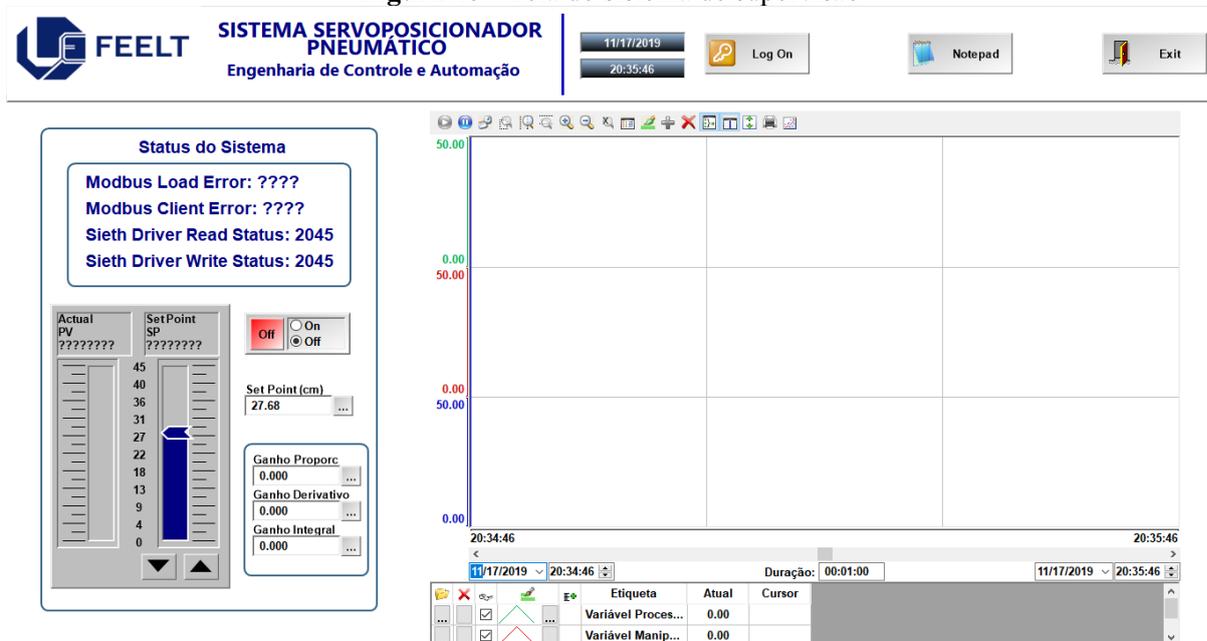


Para que o programa Indusoft possa acessar as variáveis e realizar a leitura ou escrita, foi necessário habilitar no TIA Portal V13 o acesso as variáveis e desabilitar a proteção contra leitura escrita do sistema.

3.7.2 Tela do Sistema Supervisório

Após a configuração do driver de comunicação foi desenvolvida a tela do sistema supervisório para visualização dos dados de controle e atuação no sistema. A figura 47 representa fielmente o sistema desenvolvido.

Figura 47 - Tela do sistema de supervisão



A tela conta com um botão de “Log On”, com isso só se pode manipular as variáveis do sistema caso tenha sido realizado o login do usuário, pois os campos do sistema são bloqueados por níveis de acesso, há também o botão “Notepad” para fácil abertura do bloco de notas para

4 RESULTADOS

Nesse capítulo são mostrados os resultados obtidos nesse trabalho. O capítulo inicia com testes realizados para analisar o funcionamento do sistema de controle utilizando apenas o controlador local (LC700), em seguida o sistema de controle remoto demonstrando o funcionamento da comunicação Modbus entre os controladores S7-1200 e LC700, e a interação Ethernet entre o S7-1200 e o sistema supervisório além da validação do método de controle e o seu funcionamento. Na sequência, são apresentados os resultados práticos do sistema como um todo.

4.1 Controle Local

Durante a experimentação de desenvolvimento do controle local do sistema, foram apresentados vários problemas e dificuldades para desenvolvimento da lógica ladder de controle e realizar comunicação com o controlador.

O ambiente de desenvolvimento CONF700 que existe no Laboratório, utilizado para configurar o controlador LC700, apresenta muita instabilidade nos sistemas operacionais atuais, apresentando fechamentos repentinos, além de perder a comunicação com o controlador em alguns momentos, impossibilitando a mudança de parâmetros ou supervisão dos dados. Além disso, a capacidade de manipulação e criação de blocos é muito restrita devido o software ser antigo. Como não foi possível atualizar para versões mais novas do sistema, optou-se por utilizar o mínimo este software e então não foram realizados muitos testes para comparação do sistema local e remoto.

4.2 Sistemas de Comunicação

Durante o desenvolvimento do projeto foram utilizados dois meios de comunicação, sendo a ethernet para comunicar o controlador mestre (S7-1200) ao sistema supervisório e a Modbus para prover a comunicação entre os controladores (S7-1200 e LC700).

4.2.1 Validação da comunicação Ethernet do Supervisório

A comunicação do sistema supervisório (Indusoft) e o controlador (Siemens S7-1200) desenvolvida e retratada no tópico 3.7, apresentou funcionamento adequado e além disso foi possível mostrar o diagnóstico de funcionamento.

A tela do supervisório desenvolvida, conta com um campo que demonstra o erro apresentado na comunicação Ethernet e Modbus, como mostrado no tópico 3.7.2. A figura 49 mostra o funcionamento do sistema, e o retorno do driver Sieth de que a comunicação foi realizada. Além disso a figura, mostra parte da tela do supervisório que retrata o código de

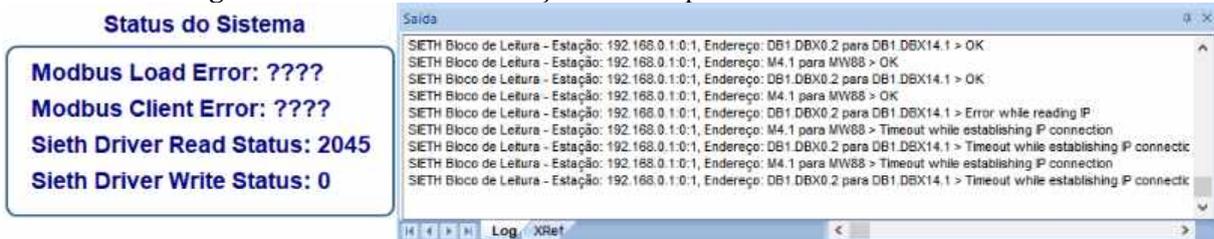
estado apresentado pela leitura e escrita do driver, que está em 0, significando pleno funcionamento.

Figura 49 – Funcionamento da comunicação entre Supervisório e Siemens s7-1200



Na figura 50 pode-se observar que foi apresentado um código de erro, mostrando que a comunicação foi interrompida, neste caso em específico foi feito o teste de retirar o cabo de comunicação Ethernet. O código de erro apresentado, pode ser consultado no manual do Driver Sieth.

Figura 50 - Erro de comunicação entre Supervisório e Siemens S7-1200



4.2.2 Validação da Comunicação Modbus

Para validação da comunicação Modbus entre o PLC S71200 e o LC700 foram feitos testes de leitura e escrita de variáveis de monitoramento remoto da PV e MV, além do monitoramento dos status do bloco modbus do S71200. Um dos testes realizados foi a leitura de uma variável analógica de entrada e a correspondente leitura no PLC da Siemens. As figuras 51 e 52 mostram esta validação.

Figura 51 – Leitura da variável de entrada analógica (PV) no LC700



De acordo com a figura 51, foi alterado através de uma fonte de tensão e um potenciômetro a entrada analógica correspondente a PV do processo no controlador LC700 remoto. Esta entrada é de tensão e varia de 0 a 10V. No exemplo da figura o valor atual é de 2.933V.

A figura 52 mostra a leitura Modbus correspondente da figura 51 no PLC S71200 onde o valor lido do parâmetro Modbus_PV foi de 2983 correspondente ao valor de tensão de 0 a 10000.

Figura 52 - Erro de comunicação entre Supervisório e Siemens S7-1200

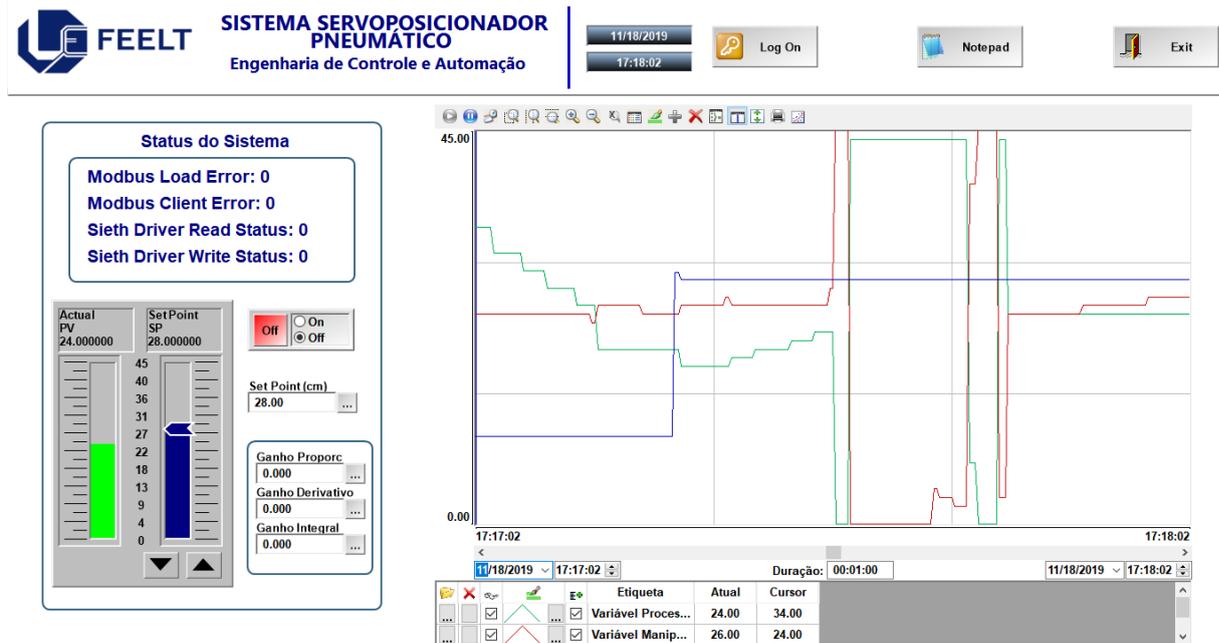
Name	Address	Display format	Monitor value	Modify value
P0	%M2.1	Bool	FALSE	
P1	%M2.2	Bool	FALSE	
P2	%M2.3	Bool	FALSE	
P3	%M2.4	Bool	FALSE	
P4	%M2.5	Bool	FALSE	
P5	%M2.6	Bool	TRUE	
P6	%M2.7	Bool	FALSE	
REQ	%M2.0	Bool	TRUE	
MCLIENT.BUSY	%DB1.DBX0.1	Bool	TRUE	
MCLIENT.DONE	%DB1.DBX0.0	Bool	FALSE	
MCLIENT.MODE	%DB1.DBB8	DEC	1	
MCLIENT.DATA_ADDR	%DB1.DBD10	DEC	40002	
MCLIENT.DATA_LENGTH	%DB1.DBW16	DEC	1	
MCLIENT.DATA	%DB1.DBW4	DEC	0	
Rea_LMV	%MD42	Floating-point nu...	0.0	
Modbus_MV	%MW36	DEC	0	
Modbus_SP	%MW20	DEC	0	500
Modbus_PV	%MW38	DEC	2983	

Uma outra avaliação pode ser obtida pelo sistema supervisório. O campo “Status do Sistema”, que retrata o estado dos blocos de funções Modbus, utilizados na programação Ladder, mostra o pleno funcionamento da comunicação. Além disso pode-se comprovar o funcionamento, a partir dos dados obtidos e mostrados nos gráficos que são provenientes das

portas analógicas de entrada e saída do controlador escravo (LC700).

Na figura 53 pode-se observar que no campo “Status do sistema” as variáveis “Modbus Load Error” e “Modbus Client Error” estão com o valor 0, que representa o pleno funcionamento da comunicação Modbus. Essas variáveis podem assumir outros valores de status, que são apresentados no manual de configuração do bloco Modbus no ambiente de desenvolvimento da Siemens Tia Portal V13.

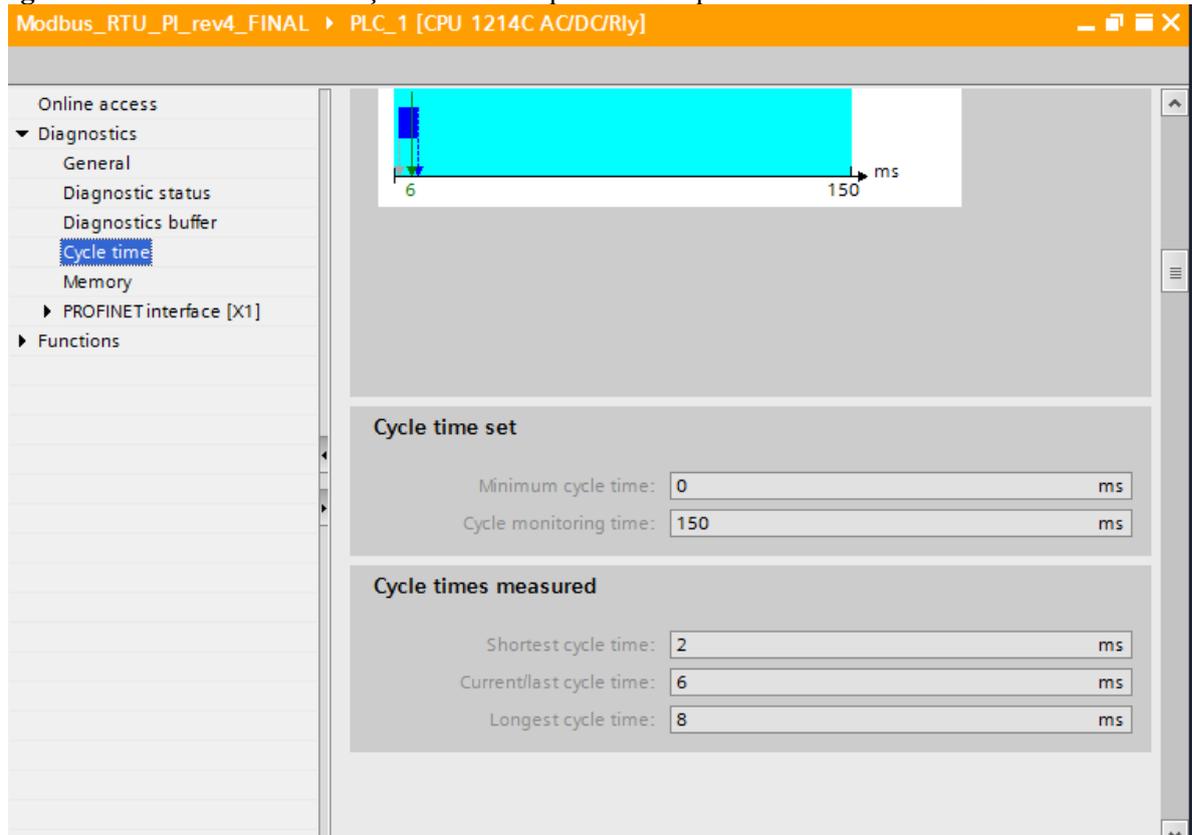
Figura 53 - Funcionamento da comunicação Modbus entre os controladores S7-1200 e LC700.



Durante os testes de comunicação, foi feita a interrupção da conexão entre os controladores, removendo o cabo de ligação RS485 dos dispositivos, observou-se que a comunicação não é realizada, porém não é mostrado nenhum tipo de erro nos blocos de comunicação Modbus. No desenrolar do desenvolvimento do projeto foi observado que alguns erros podem ser apresentados, como falha de identificação do hardware físico de comunicação, problema com diferença de baud rate e paridade, esses erros podem ser demonstrados no campo “Status do sistema”.

Em relação ao ciclo de scan da rede, o algoritmo implementado não fez uso de nenhum atraso na comunicação e está rodando na tarefa principal da ladder. Desta forma, o ciclo de scan do modbus pode ser estimado baseado no scan modbus da ladder conforme mostrado na figura 54.

Figura 54 – Ciclo de comunicação do S71200 para fazer o processamento da ladder e modbus.



De acordo com a figura 54, o ciclo de scan da rede é em torno de 2 a 8 milissegundos e como a comunicação não tem atraso isto pode ser esperado para leitura das variáveis modbus. Esta constatação pode ser vista também nos leds de comunicação dos dois CLPs que são muito rápidos. Em termos de controle o PID está rodando em uma tarefa cíclica de 100ms o que mostra que o scan modbus é muito mais rápido que a execução do PID.

4.3 Identificação do Sistema e Sintonia do Controlador

Para realizar a identificação do sistema foi utilizado da teoria dos tópicos 2.5 e 2.6 baseado no sistema de comunicação proposta na figura 24. Pela teoria do método do IMC tem-se que realizar corridas de coleta de dados a partir da aplicação de degrau no sistema em malha aberta. Com isso, foi ajustado o bloco “PID_COMPACT” de forma a poder definir o valor de saída do controlador.

A saída do bloco de controle é definida de -100 a 100 por cento, como apresentado no tópico 3.6.1, como o sistema apresenta uma resposta muito rápida para valores de saída pequenos, foi feita a corrida e coleta de dados utilizando de 4 padrões de variação.

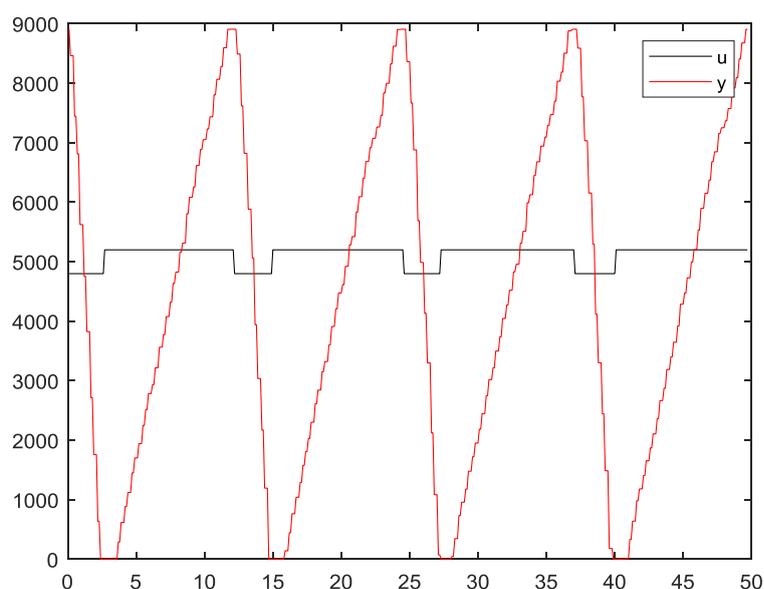
- Degrau positivo de 4% e negativo de -4% correspondendo respectivamente a 5200 e 4800 do valor AD do registro Modbus.
- Degrau positivo de 5% e negativo de 5% correspondendo respectivamente a

5250 e 4750 do valor AD do registro Modbus.

- Degrau positivo de 6% e negativo de 6% correspondendo respectivamente a 5300 e 4700 do valor AD do registro Modbus.
- Degrau positivo de 8% e negativo de 8% correspondendo respectivamente a 5400 e 4600 do valor AD do registro Modbus.

A coleta desses dados foi feita através do sistema supervisor. O sistema foi configurado com arquivamento desse conjunto de informações no banco de dados SQL, podendo ser facilmente consultado e convertido através do Microsoft Excel. Então, este dado foi convertido para formato CSV e foi criado um script no Matlab para leitura dos dados e posterior identificação. A figura 52 mostra um exemplo do comportamento do sistema em malha aberta após uma excitação a degrau na entrada da planta, onde u é a entrada da planta variando de 4800 a 5200 (-4% a 4% da saída do bloco PID_COMPACT) e y é a saída da planta variando de 0 a 9000, que é o sinal enviado pelo transdutor de posição.

Figura 55 - Dados coletados para a identificação do sistema com degrau de 4% e -4%.



Para a identificação do sistema foi utilizado o toolbox de identificação do Matlab. No ambiente de identificação de sistemas, foi feita a importação dos dados e estimado o modelo de processo.

A partir dos dados coletados foi realizada uma identificação utilizando os valores coletados do degrau de -4% a 4%, o motivo se deu pelo fato de que durante a aproximação do modelo, os dados que mais obtiveram maior aproximação de acordo com o sistema de identificação do Matlab, foi nesse degrau utilizado. A figura 53 demonstra o ambiente de identificação do Matlab.

Figura 56 - Ambiente de configuração e identificação de sistema do Matlab

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	4.5366	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]

Foram realizadas várias tentativas de identificação com diferentes modelos matemáticos, porém os que mostraram melhores resultados foi um sistema do tipo integrador sem polos e zeros adicionais com e sem tempo morto.

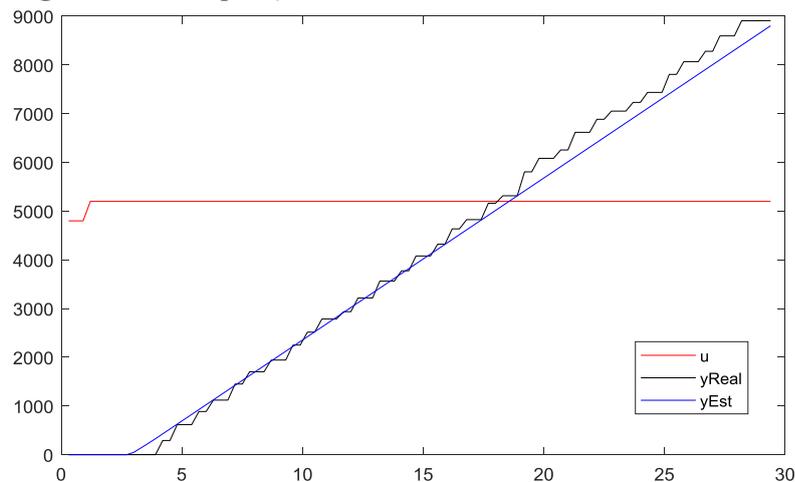
A equação (19) é o sistema sem tempo morto que obteve uma aproximação de 96.45%, de acordo com o sistema de identificação do Matlab.

$$G(s) = \frac{4.5366}{s} \quad (19)$$

A equação (20) é o sistema com tempo morto que obteve uma aproximação de 96.45%, de acordo com o sistema de identificação do Matlab.

$$G(s) = \frac{0.06391 * (e^{-2.54*s})}{s} \quad (20)$$

A figura 54 mostra a comparação do sistema estimado pela equação (20) e o sistema real a uma resposta a degrau.

Figura 57 – Comparação com os dados reais e o modelo estimado

A partir do modelo estimado, após a aproximação do modelo, foi proposto a sintonia do controlador utilizando um controlador proporcional e proporcional integral, a partir do Método do Modelo Interno, utilizando as equações das tabelas 6 e 7, do tópico 2.6.3.

A escolha pelo método IMC, foi pelo fato de ser o método, que consegue propor uma sintonia para um sistema integrador, como foi mostrado na identificação, e por ser considerado uma sintonia mais robusta que outros métodos.

Para realizar os cálculos dos parâmetros do controlador e analisar a resposta ao degrau foi construída um script no Matlab.

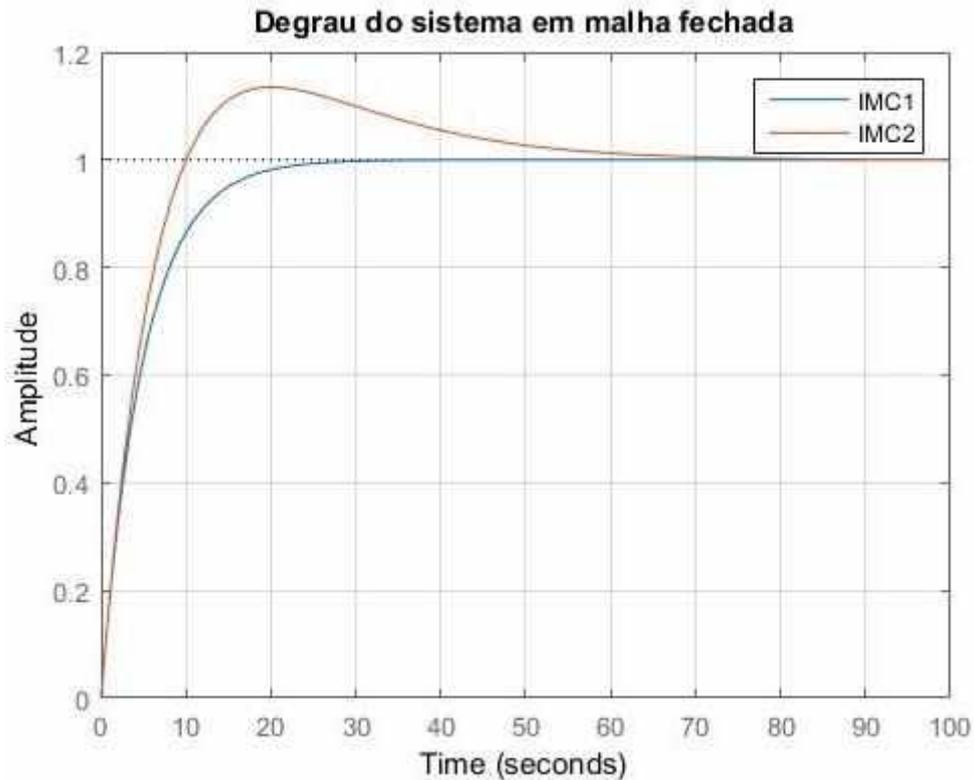
O método do IMC propõe a manipulação da constante “ λ ”, que é o fator de determinação de robustez e desempenho do controlador, para chegar no nível de controle desejado, de acordo com a tabela 6. Além disso há também o tempo morto (θ) que deve ser considerado na determinação do controlador PI de acordo com a tabela 7.

Para o sistema da equação (19) o tempo morto foi desconsiderado e utilizado um $\lambda = 5$ como valor inicial. Com isso foi obtido os seguintes parâmetros para um controlador somente proporcional (P) e um controlador com proporcional e integral (PI):

- Proporcional (IMC1): $K_p = 0.0441$
- Proporcional Integral (IMC2): $K_p = 0.0441$ e $T_i = 20$

Para analisar a sintonia proposta, a figura 55 mostra o desempenho dos dois controladores propostos, sendo de acordo com a legenda IMC1 o controle proporcional e IMC2 o controle proporcional integral.

Figura 58 - Resposta ao degrau, dos controladores com $\lambda = 5$ e $\theta = 0$



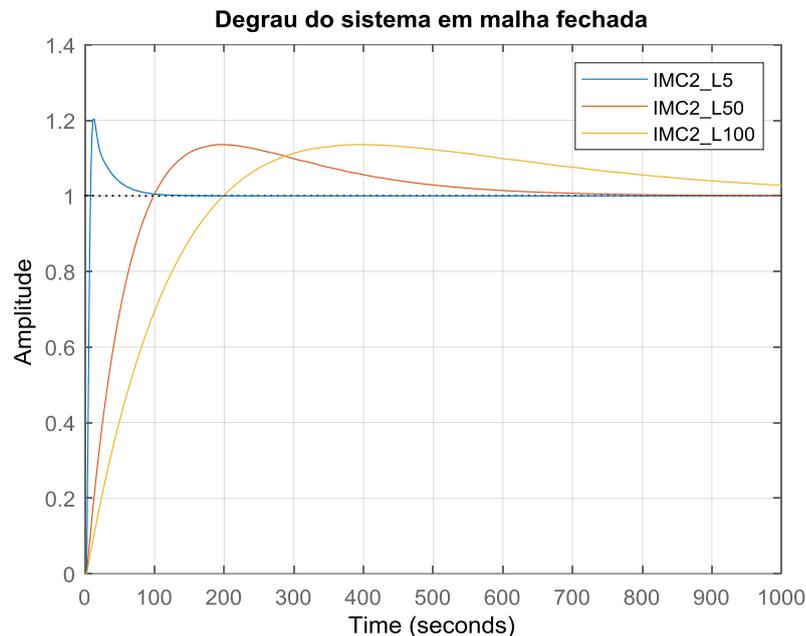
Para o sistema da equação (20) o tempo morto foi considerado e utilizado um $\lambda = 5$ como valor inicial. Com isso foi obtido os seguintes parâmetros para um controlador somente proporcional (P) e um controlador com proporcional e integral (PI):

- Proporcional: $K_p = 3.1294$
- Proporcional Integral: $K_p = 3.1294$ e $T_i = 30.1648$

Como o parâmetro lambda é um parâmetro de ajuste de robustez, e a sugestão é que este parâmetro seja maior que o valor do tempo morto, para não ser tão agressivo. E quanto maior o lambda mais conservador seria a resposta. Desta forma, um aumento no parâmetro lambda faz com que o ganho seja menor e o termo integral maior, ou seja, e o termo integral seria maior deixando a sintonia mais lenta. A figura 56 mostra uma análise da resposta a degrau do sistema para diferentes valores de lambda: 5, 50 e 100 e considerando o modelo da equação (20):

- PI IMC2 para $\lambda = 5$: $K_p = 3.1294$ e $T_i = 30.1648$
- PI IMC2 para $\lambda = 50$: $K_p = 0.3129$ e $T_i = 210.1648$
- PI IMC2 para $\lambda = 100$: $K_p = 0.1565$ e $T_i = 410.1648$

Figura 59 - Resposta ao degrau, da sintonia de um PI pelo método IMC2 com $\lambda = 5, 50$ e 100



4.4 Controle Remoto

Através do desenvolvimento do projeto descrito no capítulo 3, foi possível realizar a comunicação Modbus entre os CLPs e a implementação da lógica de controle e dos controladores no ambiente de desenvolvimento da Siemens.

4.3.1 Controle Remoto utilizando bloco de função ST

A priori foi feita a tentativa de realizar o controle, construindo um bloco de função ST, esse bloco era constituído de duas entradas (PV e SP) e uma saída (MV), dentro do bloco era feita a análise de erro que era multiplicada pelo ganho proporcional do sistema gerando um sinal de saída linearizado, para atender a zona de estabilidade e de operação do atuador. Porém durante a sua aplicação observou-se que o sistema apresentava erro de regime permanente muito grande, pois a simples lógica desenvolvida, não conseguia operar na banda morta de sinal da válvula eletropneumática direcional.

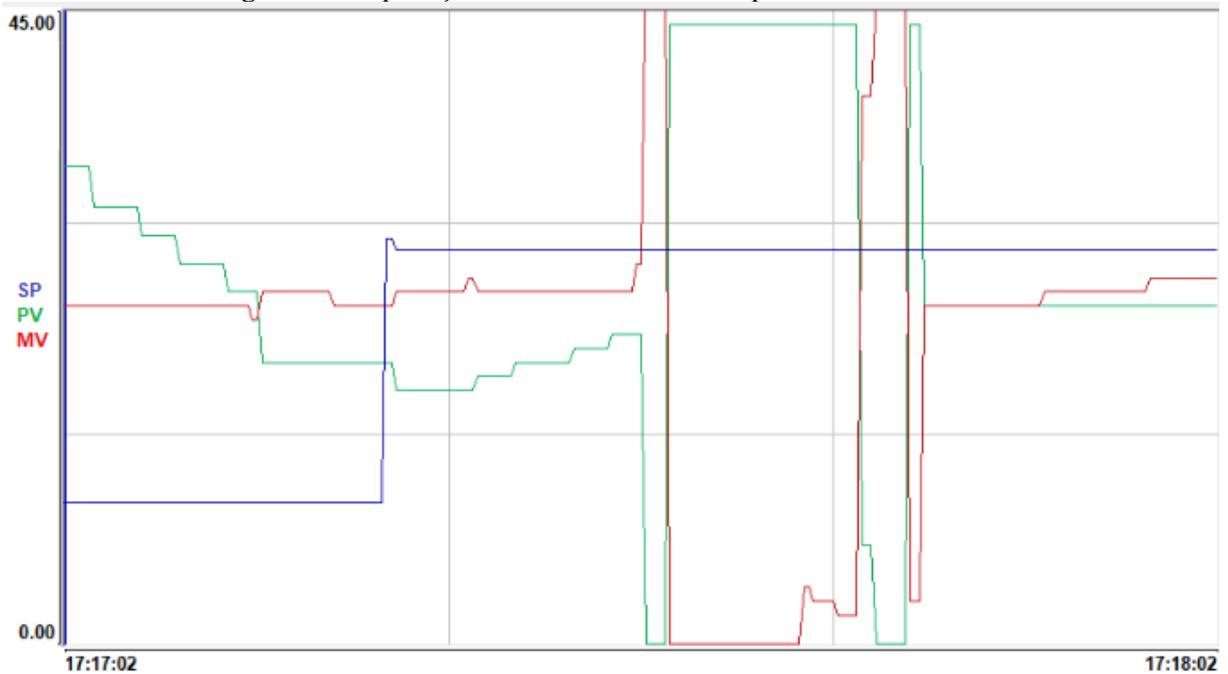
4.3.2 Controle remoto utilizando o bloco PID_COMPACT

Devido aos resultados do tópico 4.3.1, a posteriori foi desenvolvida a lógica de controle mencionada no tópico 3.6.1 utilizando o bloco de controle “PID_COMPACT” e aplicado os controladores obtidos através da identificação e sintonia apresentada no tópico 4.2 do sistema.

Durante a aplicação dos controladores mencionados no tópico 4.2, não foi obtido sucesso na mudança de Set point, pois o sistema não apresentava estabilidade. O sistema se

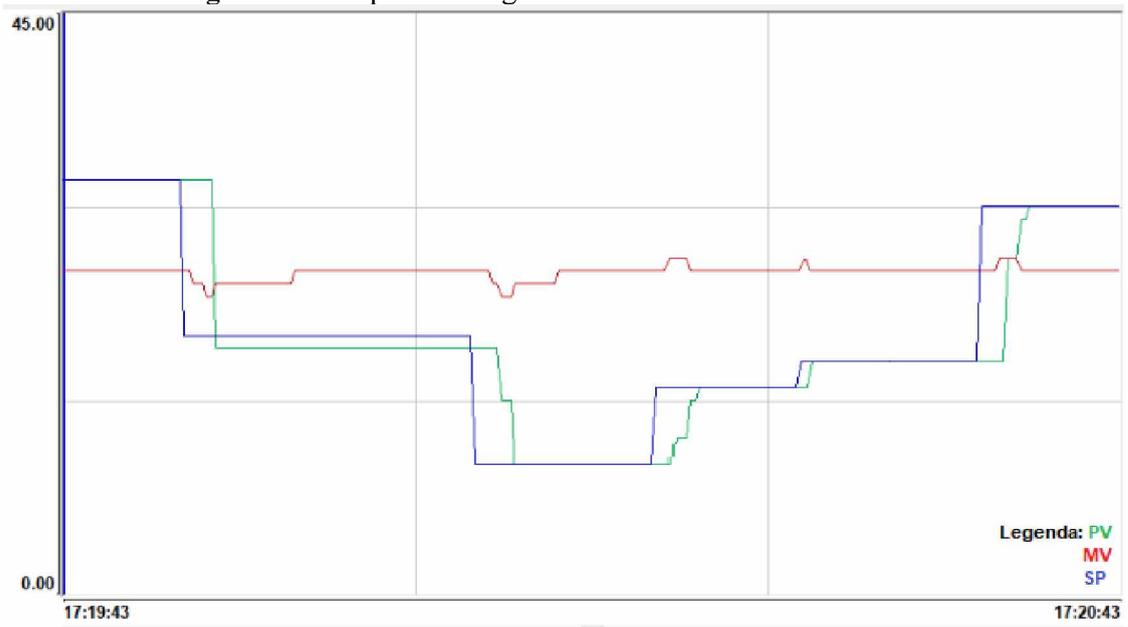
mostrou bastante instável, tanto para o controlador P quanto PI, sendo inviável utilizar o parâmetro de robustez e desempenho mencionados no tópico 4.2, que define o valor dos parâmetros do controlador a ser utilizado. Na figura 57 pode-se observar a instabilidade do sistema utilizando o controlador Proporcional (IMC1).

Figura 60 - Aplicação do controlador obtido pelo IMC1 com $\lambda = 5$



Com isso, foi se aumentando o parâmetro λ até se obter um controlador proporcional desejável. O valor ajustado para poder proporcionar o melhor desempenho do sistema foi com $\lambda = 70$, para o controlador (IMC1), obtendo um ganho proporcional $K_p = 0.0031$. Após chegar nesse ganho de valor proporcional foi feito ajustes finos para obtenção de um controlador com erro de regime permanente próximo de 0, com isso iniciou-se a utilização do campo integrador do controlador.

Os valores finais do controlador foram estabelecidos em $K_p = 0.003$ e $T_i = 1$. A figura 58 mostra a ação do controlador ajustado.

Figura 61 - Resposta ao degrau do controlador em malha fechada

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs desenvolver um sistema completo de supervisão e controle, em malha fechada de um sistema servoposicionador pneumático, disposto no laboratório de redes industriais. Para comunicação com o sistema foi utilizado uma comunicação remota entre dois CLPs industriais (S71200 e LC700) através do protocolo Modbus RTU. Para controle do sistema foi utilizado o PID do próprio S71200. Por fim, para supervisão de todo o sistema foi realizada uma aplicação usando software SCADA Indusoft. Todos estes objetivos propostos foram realizados com sucesso.

Com relação a comunicação entre os controladores, após vários problemas encontrados foi possível estabelecer a comunicação RS485 entre os controladores principal e remoto através da rede Modbus RTU. Além disso, foi possível visualizar a aplicação de uma lógica mestre escravo de leitura e escrita, com base desenvolvida a partir de uma lógica em linguagem de programação SFC e depois convertida para linguagem de programação Ladder. Com isso, foi obtido sucesso na comunicação e na implementação da programação no controlador principal, que suportou a configuração e possibilitou a aplicação.

Em relação ao LC700, na proposta inicial seria realizado um controle PID local e comparado com o PID remoto. Porém, apesar do controlador LC700 possuir um bloco PID, o sistema de configuração do LC700 apresentou muitos problemas, e o bloco PID também não possuía tantos recursos, o que dificultou demais os testes. Desta forma optou-se por apenas configurar o básico na comunicação do LC700.

Em relação a proposição de controle, foi pensado na hipótese de se modelar e desenvolver a função de transferência do sistema, para realizar as simulações e propor o controlador. Porém, devido aos cálculos complexos envolvidos, a dificuldade em mensurar todos os parâmetros e a restrição de tempo para desenvolvimento do projeto, preferiu-se utilizar métodos empíricos para determinar o controlador do sistema. Os resultados finais mostraram que o controlador PID obtido neste trabalho alcançou boa sintonia e robustez no controle da planta.

Os melhores caminhos a serem percorridos para o desenvolvimento de trabalhos futuros utilizando-se desse trabalho são:

- Rever a Modelagem matemática da planta pois trabalhos pesquisados mostram que o sistema é bem mais complexo que o obtido neste trabalho.
- Levantamento de um controlador por métodos teóricos e melhor ajuste do controle.

6 REFERÊNCIAS

BRAGA, Newton C. **Como funciona o protocolo Modbus**. Disponível em <<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/12089-como-funciona-o-protocolo-modbus-r0001>> Acesso em 10 nov. 2019.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa; TEIXEIRA, Herbert C. G. (2010) – **Controles Típicos de equipamentos e processos industriais**, 2ª Edição, Editora Blucher, 2010.

EURICH, Alexandre Maier (2014) - **Validação experimental de um modelo matemático representativo de um sistema pneumático de posicionamento**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

FERNANDES, Renato F. (2009) - **Identificação remota de plantas industriais utilizando tecnologias OPC e CYBEROPC**. Dissertação de mestrado USP, São Carlos, 2009.

FESTO, **Displacement encoders**. 2015. Disponível em <https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ENGB/PDF/EN/MLO-MME_EN.PDF> Acesso em 08 ago. 2019.

FESTO, **Proportional directional control valves MPYE**, 2019. Disponível em <https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ENUS/PDF/US/MPYE_ENUS.PDF> Acesso em 08 ago. 2019.

FREITAS, Carlos Márcio. **Protocolo Modbus: Fundamentos e Aplicações**, 2014. Disponível em <<https://www.embarcados.com.br/protocolo-modbus/>> Acesso em 10 nov. 2019.

GOEKING, Weruska. **Da máquina a vapor aos softwares de automação: Entenda de que forma a automação foi incluída como parte fundamental dos processos industriais e sua influência no desenvolvimento fabril**. O Setor Elétrico, São Paulo, v. 1, n. 1, p.70-77, maio 2010. Mensal. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br>>. Acesso em: 14 out. 2019.

KUMAR, Sunit Sen (2014) – **Fieldbus and Networking in Process Automation**, CRC Press, 2014.

MENDONZA, Y. E. A. **Desenvolvimento de um sistema servopneumático para regulação de velocidade de turbinas em pequenas centrais hidroelétricas**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006

MODICON, **Modbus Protocol Reference Guide**, 1996. Disponível em <http://www.modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf> Acesso em 10 ago. 2019.

MORAIS, Leticia Correa (2017) - **Automação de um sistema de classificação e seleção de objetos utilizando transmissor rfid modbus**, Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Controle Automação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

PETRUZELLA, Frank D. **Controladores lógicos programáveis [recurso eletrônico]** / Frank D. Petruzella ; tradução: Romeu Abdo ; revisão técnica: Antonio Pertence Júnior. – 4. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2014.

RIBEIRO, Kevin Mauricio Menon. **Modelagem Matemática de um Sistema Pneumático de Posicionamento**. 2014. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

SIEMENS. **S7-1200 Programmable controller**. 2012. Disponível em <https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf> Acesso em 16 out. 2019.

SMAR. **Guia do Usuário**. 2007. Disponível em <<http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LC700HWMP.pdf>> Acesso em 05 out. 2019.

SMAR. **Manual de configuração do LC700**. 2011. Disponível em <<http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LC700SWMP.pdf>> Acesso em 15 out. 2019.

USP, Edisciplinas. **Sequential Function Charts**, Disponível em <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=956133>> Acesso em 10 nov. 2019.