



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM
SISTEMA INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO
EM DUTOS DE PETRÓLEO E GÁS**

por

Fábio de Andrade Barroso

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre

FÁBIO DE ANDRADE BARROSO

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM
SISTEMA INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO
EM DUTOS DE PETRÓLEO E GÁS**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. João Bosco de Aquino Silva

B277p Barroso, Fábio de Andrade.
Projeto e desenvolvimento de um sistema intercambiável
para inspeção em dutos de petróleo e gás / Fábio de Andrade
Barroso.--João Pessoa, 2011.
133f. : il.
Orientador: João Bosco de Aquino Silva
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT
1. Engenharia Mecânica. 2. Dutos – inspeção. 3. Sistema
intercambiável.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO EM DUTOS DE
PETRÓLEO E GÁS**

por

Fábio de Andrade Barroso

Dissertação aprovada em 16 de Dezembro de 2011

Período letivo 2011.1

Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior

Examinador Externo ao PPGEM – UFPB

Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

Examinador Externo ao PPGEM – UFPB

Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

Examinador Interno PPGEM – UFPB

Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

Orientador PPGEM – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, aos meus pais, Franklin Macêdo e Fátima Barroso, e irmãos, Franklin Jr. e Fredy Andrade, por todo apoio e auxílio para que fosse possível chegar aonde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a todos os professores do programa, por prestarem informações valiosas e que no decorrer do curso se transformaram em conhecimento.

Profundos agradecimentos a todos que fazem parte das instituições UFPB, IFPB e SENAI, sem as quais não teria base para realizar este trabalho.

Agradecimentos especiais aos professores da UFPB: João Bosco, José Carlos, Marcelo Cavalcanti, Koje Mishina e Rodinei Gomes.

Agradecimentos especiais aos professores do IFPB: Leonardo Araújo, Cesarino Nóbrega, Márcio Gomes, Josevaldo Barbosa, Jobson Francisco, Rivaldo Serrano, Verônica Lacerda, José Menezes, Alfredo Gomes, Joabson Nogueira, Aniceto Duarte e Guedes Caldeira.

Agradecimentos especiais aos professores do SENAI: Edson Alves, Manoel Fideles, Ester Barbosa, Felipe Alves, Martin Luiz, Fredy Andrade, Francisco Silva (Souza), Gláucio, Josicleide Nunes e Sônia Queiroz.

Aos meus amigos e colegas de jornada, Valentina Alessandra, Henrique Nóbrega, Rafael Franklin, Verilton Nunes, Iôgo Paula e Petrov Lobo.

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO EM DUTOS DE PETRÓLEO E GÁS

RESUMO

O projeto e desenvolvimento de um sistema automático de varredura para inspeção em juntas soldadas de dutos tem como objetivo principal garantir uma portabilidade do sistema em áreas de difícil acesso, melhor detectabilidade de falhas, precisão nos laudos, velocidade de análise, fácil manuseio e maior flexibilidade para diferentes configurações de diâmetro e espessura. A partir da geometria do duto, o sistema é capaz de realizar os movimentos circunferenciais e longitudinais com o objetivo de varrer toda a superfície do duto a ser inspecionada. O sistema é composto de dois motores de corrente contínua, engrenagens e um controlador lógico programável, além de uma interface gráfica para mostrar o andamento do processo de inspeção. O projeto é baseado em uma engrenagem externa intercambiável que gira e suporta os transdutores, movida por um pinhão. Outro motor gera o movimento longitudinal do sistema garantindo que toda a superfície do duto seja inspecionada. Testes experimentais demonstraram a eficácia e aplicabilidade do sistema desenvolvido.

Palavras chaves – dutos, inspeção, sistema intercambiável.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN INTERCHARGEABLE INSPECTION SYSTEM FOR OIL AND GAS PIPELINES

ABSTRACT

The design and development of an automated system for inspection of weld in pipelines main objective to ensure portability in areas of difficult access, improved detectability of errors, accurate reports, scan speed, easy handling and greater flexibility for different configurations in diameter and thickness. From the geometry of the duct, the system is capable of circumferential and longitudinal movements in order to scan the entire surface of the pipeline being inspected. The system consists of two DC motors, gears, a programmable logic controller and a graphical interface to show the maintenance of inspection process. The project is based on an interchangeable external gear that rotates and supports the transducers, driven by other gear. Another engine generates the longitudinal movement of the system mensuring that the entire surface of the pipe to be inspected. Experimental tests have demonstrated the effectiveness and applicability of the developed system.

Keywords – inspection, interchangeable sytem, pipelines.

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS	11
LISTAS DE TABELAS	14
LISTAS DE SÍMBOLOS	15
CAPÍTULO I.....	16
INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral	18
1.2. Objetivos Específicos	18
1.3. Apresentação da Dissertação	18
CAPÍTULO II	20
LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DAS TÉCNICAS MAIS ADOTADAS PARA INSPEÇÕES EM DUTOS.....	20
2.1. Introdução	20
2.2. Técnicas de Inspeção em Dutos.....	21
2.2.1. Ultrassom.....	21
2.2.2. Líquido Penetrante.....	22
2.2.3. Gamagrafia, Radiografia e Radioscopia	23
2.2.4. Partículas Magnéticas	24
2.2.5. Emissão Acústica.....	24
2.2.6. PIG Instrumentado.....	25
2.3. Vantagens e Desvantagens da Técnica de Ultrassom	26
2.4. Aplicação das Técnicas em Sistemas de Inspeção.....	27
2.4. Conclusão	30
CAPÍTULO III	31
DESENVOLVIMENTO DA PARTE MECÂNICA DO SISTEMA INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO EM DUTOS	31
3.1. Introdução	31
3.2. Idealização do Sistema	32
3.3. Sistema Definitivo – Parte Mecânica	39
3.4. Conclusão	44

CAPÍTULO IV	45
DESENVOLVIMENTO DA PARTE ELÉTRICA DO SISTEMA INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO EM DUTOS	45
4.1. Introdução	45
4.2. Sistemas de Controle	48
4.2.1. Controle em Malha Aberta	49
4.2.2. Controle em Malha Fechada	49
4.2.3. Comparação entre SCMA e SCMF	51
4.2.4. Controle Digital	52
4.2. Controlador Lógico Programável (CLP)	53
4.2.1. O que é um CLP?	54
4.2.2. Princípios de operação de um CLP	55
4.2.3. Linguagens de programação	56
4.3. Sistema Supervisório	57
4.3.1. SDCD's convencionais	57
4.3.2. Sistemas Supervisórios Modernos	59
4.3.3. Equipamentos Utilizados em Sistemas Supervisórios Modernos	60
4.4. Estudo dos Motores de Corrente Contínua	63
4.4.1. Operação do motor de corrente contínua	64
4.5. Método do Mínimo dos Quadrados Recursivos (MQR)	67
4.6. Sistema Definitivo – Parte Elétrica	67
4.6.1. Acionamento dos motores	68
4.6.2. Programação do CLP e Supervisório	71
4.7. CONCLUSÃO	78
CAPÍTULO V	79
TESTES E RESULTADOS	79
5.1. Testes Iniciais	79
5.2. Resultados Obtidos	81
5.3. Modelamento Matemático	84
5.5. Testes Adicionais	90
5.6. Cálculo da Incerteza	91
5.5. Determinação da Região de Testes	94
5.8. Conclusão	97
CAPÍTULO VI	98
CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
6.1. Conclusão	98
6.2. Sugestão para Trabalhos Futuros	99

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICE	103
ANEXO I.....	104
DESENHO TÉCNICO MECÂNICO	104
ANEXO II.....	111
DIAGRAMA ELÉTRICO DO SISTEMA	111
ANEXO III	114
PROGRAMAÇÃO DO CLP SIEMENS S7-200	114
ANEXO IV	123
CONFIGURAÇÕES DO KEPSERVEREX 5.5 (OPC SERVER)	123
ANEXO V	126
CONFIGURAÇÕES DO SUPERVISÓRIO ELIPSE SCADA.....	126
ANEXO VI.....	130
TABELA DOS DADOS OBTIDOS UTILIZANDO A TÉCNICA DO MQR ATRAVÉS DO SOFTWARE MATLAB.....	130

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 – Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom.....	22
Figura 2.2 – Diversas formas de <i>pig</i> e um operador introduzindo o <i>pig</i> para iniciar a limpeza do duto. Fonte: www.tdwilliamson.com	27
Figura 2.3 – Limpeza do duto. Fonte: Silva, 2001.	28
Figura 2.4 – <i>Pig</i> geométrico, ou <i>pig</i> palito (apalpador), desenvolvido pela PUC-RJ e Petrobrás, e dispositivo apalpador (sensor de medição). Fonte: www.cpti.cetuc.puc-rio.br	28
Figura 2.5 – Sistema desenvolvido pela LAMEF–RCA (UFRGS).....	29
Figura 3.4 – Ilustração dos parafusos allen unindo a engrenagem bipartida, facilitando a sua instalação em dutos.	35
Figura 3.5 – Detalhamento do espaço causado durante a separação do bipartido, e a manutenção deste espaço devido a confecção da rosca anteriormente à operação de serrar.	35
Figura 3.6 – Ilustração do conjunto parafuso-mola-esfera, que regula a folga/atrito entre a engrenagem 2 e o duto, gerando um amortecimento do movimento do sistema como um todo.	36
Figura 3.7 – Ilustração da engrangem 2, com os furos roscados para o alojamento dos transdutores, dos conjuntos parafuso-mola-esfera e a união do bipartido com parafusos allen.....	37
Figura 3.8 – Diagrama de forças durante o movimento radial.	38
Figura 3.9 – Ilustração do sistema desenvolvido, conjunto para deslocamento axial.	40
Figura 3.10 – Ilustração do sistema desenvolvido, guias do deslocamento axial.	40
Figura 3.11 – Ilustração dos discos laterais para o conjunto de deslocamento radial. No detalhe, uma ilustração feita em software CAD, representando o esquema de montagem das peças.	41
Figura 3.12 – Ilustração do sistema desenvolvido, conjunto para deslocamento radial.....	41
Figura 3.13 – Caso o motor 1 gire no sentido antihorário, o sistema irá avançar axialmente.....	42
Figura 3.14 – Caso o motor 2 gire no sentido antihorário, o sistema fará a inspeção no sentido horário.	42
Figura 3.15 – Ilustração da parte mecânica do sistema montada, já com os motores CC.....	43
Figura 3.16 – Detalhe do espaço reservado na base.....	43
Figura 3.17 – Simulação em CAD.	44
Figura 4.1 – Mapa de conceitos do sistema desenvolvido.	47

Figura 4.2 – a) Esquema do regulador de James Watt; b) Foto do regulador utilizado em destilaria local.....	48
Figura 4.3 – a)SCMA representado em diagrama de blocos; b) Exemplo de sistema térmico de malha aberta.....	49
Figura 4.4 – SCMF representado em diagrama de blocos.	50
Figura 4.6 – Exemplo de uma sequência de dispositivos para regulação de temperatura: transdutor de temperatura -> controlador digital PID -> conversor corrente-pressão (I-P) -> válvula de controle.....	51
Figura 4.7– Evolução temporal de alguns sinais em malhas de controle digital.....	52
Figura 4.8 – Ilustração básica de como funciona um CLP.....	55
Figura 4.9 – a) Equipamentos em campo; b) Cubículo do CLP; c) Supervisório na sala de controle ...	57
Figura 4.10 – Configuração antiga de um sistema geral de controle distribuído.	58
Figura 4.11 – Configuração de uma interligação entre EC, ECCs e ERs.	58
Figura 4.12 – Tela principal de um sistema supervisório, onde o operador clica com o mouse no equipamento escolhido e abre-se uma tela com os dados/comandos existentes naquele equipamento. Desenvolvedor: AIMAX.....	60
Figura 4.13 – Circuito magnético com entreferro, ao lado um circuito de uma máquina elétrica elementar.	63
Figura 4.14 – Circuito equivalente do motor de um corrente contínua.....	64
Figura 4.15 – Circuito equivalente do motor de um corrente contínua.....	65
Figura 4.16 – Representação da conexão física da parte elétrica do sistema.	68
Figura 4.17 – a) Diagrama de ligação do motor CC; b) Acionamento no sentido horário; c) Acionamento no sentido antihorário.	69
Figura 4.18 – Resistor tipo potenciômetro.	69
Figura 4.19 – Painel elétrico do sistema.....	70
Figura 4.20 – Programação no CLP Siemens S7-200 (CPU 224).....	72
Figura 4.21 – Tela de aplicação do supervisório para a realização dos testes, software utilizado: Elipse SCADA.	73
Figura 4.22 – Tela de aplicação do OPC para configurar a comunicação com o CLP S7-200, com seu respectivo canal de identificação/comunicação da CPU (ID = 2), software utilizado: KEPServer 5.5.	75
Figura 4.23 – Tela de aplicação do OPC, comunicando com o CLP S7-200 através da porta COM1, taxa de transmissão de 9600bits/s e paridade da comunicação Even (par), software utilizado: KEPServer 5.5.	75
Figura 4.24 – Tela do Elipse SCADA, informando que será utilizado um servidor OPC de dados.	76
Figura 4.25 – Tela do Elipse SCADA, selecionando o servidor de banco de dados que será utilizado.	76
Figura 4.26 – Tela de aplicação do Elipse SCADA, onde é possível informar qual o servidor OPC....	77

Figura 4.27 – Tela de aplicação do Elipse SCADA, onde é possível informar quais as tags do servidor OPC de dados serão recebidas e gerenciadas pelos supervisório.....	77
Figura 5.1 – Gráfico de velocidade do motor 1, sentido horário.....	82
Figura 5.2 – Gráfico de velocidade do motor 1, sentido antihorário.....	82
Figura 5.3 – Gráfico de velocidade do motor 2, sentido horário.....	83
Figura 5.4 – Gráfico de velocidade do motor 2, sentido antihorário.....	83
Figura 5.5 – Gráfico de resposta ao degrau unitário de um sistema de primeira ordem, fonte: Ogatha, 2003.....	85
Figura 5.6 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 1, sentido horário.	88
Figura 5.7 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 1, sentido antihorário.	88
Figura 5.8 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 2, sentido horário.	89
Figura 5.9 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 2, sentido antihorário.	89
Figura 5.10 –ZTA para o processo de soldagem elétrica por eletrodo revestido ($1/2'' = 12,7 \text{ mm}$).	94
Figura 5.11 – ZTA para o processo de soldagem elétrica por eletrodo revestido ($3/8'' = 9,53 \text{ mm}$).	94
Figura 5.12 – ZTA para o processo de soldagem elétrica por eletrodo revestido ($3/16'' = 4,76 \text{ mm}$). ..	95
Figura 5.13 – Tela de aplicação final do supervisório, <i>software</i> utilizado: Elipse SCADA.	96

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1.1 – Vendas apresentadas pelas distribuidoras, de acordo com a Portaria ANP 202/99.....	16
Tabela 5.1 – Valores médios de posicionamento do sistema com o resistor de $32\ \Omega$	81
Tabela 5.2 – Valores de a calculados a partir de T e T_s das curvas geradas.	86
Tabela 5.3 – Valores de a para o sistema.	86
Tabela 5.4 – Modelamento matemático do sistema ao degrau unitário.	87
Tabela 5.5 – Valores de k para um sistema de primeira ordem do tipo “caixa preta”.....	87
Tabela 5.6 – Modelamento matemático do sistema.	87
Tabela 5.7 – Valores médios dos posicionamentos axiais utilizando informações do sistema.	90
Tabela 5.8 – Valores médios dos posicionamentos radiais utilizando informações do sistema.....	91
Tabela 5.9 – Valores de incerteza expandida no posicionamento axial do sistema.	92
Tabela 5.10 – Valores de incerteza expandida no posicionamento radial do sistema.....	92
Tabela 5.11 – Valores de incerteza expandida no posicionamento axial do sistema.	93
Tabela 5.12 – Valores de incerteza expandida no posicionamento radial do sistema.....	93
Tabela 5.13 – Valores aplicados no temporizador do CLP, com seus respectivos desvios-padrão.	95
Tabela 6.1 – Orçamento básico realizado no mercado local.	98

LISTAS DE SÍMBOLOS

α – constante característica do sistema

α – ângulo de pressão tangencial

d/dt – derivada da função em relação ao tempo

$\varnothing$ – diâmetro

ϕ – fluxo por pólo

i – corrente

k – variável que corrige o valor final da resposta no regime estacionário

L – indutância

P – potência

R – resistência

T – fator de tempo do sistema

T_s – tempo de estabelecimento

V – tensão

Z – número de dentes da engrenagem

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A utilização de novas tecnologias para a inspeção em dutos têm sido cada vez maior, devido à grande demanda de transporte do produto para as bases receptoras (de petróleo e/ou gás). Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, nos últimos anos, houve uma crescente demanda por produtos derivados de petróleo – de 2005 à 2010, o consumo equivalente em barris de petróleo passou de 88,81 milhões para 117,95 milhões, um crescimento de aproximadamente 32,81%, como pode-se observar na Tab. (1.1), (ANP, 2011).

Tabela 1.1 – Vendas apresentadas pelas distribuidoras, de acordo com a Portaria ANP 202/99.

Ano	2005	2006	2007	2008	2009	2010
TOTAL: (em milhões de barris de petróleo)	88,81	90,67	97,79	105,97	108,80	117,95

Tal fato se deve à crescente necessidade da população por derivados de petróleo, que até certo tempo foi impulsionado pela instalação de kits de gás natural em automóveis no final dos anos 1990 e início dos anos 2000, mas com o aumento dos preços dos kits e deste derivado do petróleo, esta demanda teve uma pequena queda. Hoje em dia, podemos citar como melhor exemplo, as instalações prediais e industriais de gás natural, que por motivos de abastecimento contínuo, logística e principalmente segurança, estas instalações atendem melhor à população e às empresas que consomem este produto.

Sendo assim, o transporte dos derivados de petróleo deve ser realizado de uma forma mais contínua, sem interrupções no fornecimento. A melhor forma de transporte da atualidade é utilizando malhas de dutos (dutovias), que são formadas por tubos, geralmente de aço carbono ou ligas de aço, soldados uns aos outros. Em intervalos regulares, existem flanges para unir os dutos, facilitar a manutenção, controle e regulação do fluxo transportado, porém, vale salientar que a união entre o duto e a flange também se faz através do processo de soldagem.

A qualificação da mão de obra é um item muito importante, porém nem sempre o resultado da operação de solda é garantida tanto pelo nível de capacitação/experiência do profissional soldador como pelas condições de trabalho e matéria-prima empregada. Para garantir a excelência no produto final (dutos soldados) e a manutenção/acompanhamento deste, ensaios devem ser realizados. Um ensaio mecânico não destrutivo de grande relevância neste âmbito é o de inspeção ultrassônica, existem ainda o de líquido penetrante, raio X, e etc.

Segundo a ANP (2011), os ensaios em dutos devem ser realizados em três momentos:

- ✓ Após a confecção do duto, para garantir a integridade deste como matéria-prima;
- ✓ Após a operação de soldagem, garantindo o total preenchimento da região soldada e que esta operação não causou imperfeições em sua estrutura interna;
- ✓ Acompanhamento para controle do processo de corrosão, geralmente com a ação do tempo, interpéries devido à exposição no campo e próprio produto transportado pode iniciar a corrosão, interna ou externamente, do duto.

Processos de soldagem produzem uma Zona Termicamente Afetada (ZTA) no material e pode reduzir as propriedades do material soldado nesta região (zona), o que pode ser agravado caso o processo de soldagem crie bolhas internas, “mordeduras” ou trincas no material, seja por falha na preparação do material (limpeza), inclinação incorreta do bisel, mal acondicionamento do eletrodo (umidade), inclinação incorreta do eletrodo durante a soldagem e corrente inadequada de soldagem, (SENAI, 2004).

O acompanhamento de falhas na confecção de dutos não é o problema motivador deste trabalho, e sim o acompanhamento do processo de união destes dutos durante a confecção das “dutovias”, além do monitoramento durante a sua vida útil, realizando um gerenciamento dos riscos inerentes à situação, como a corrosão, medindo a espessura da parede do duto.

Segundo Cunha (2001), a corrosão consiste na deterioração pela ação química ou eletroquímica do meio dos materiais, associado ou não a esforços mecânicos. Existem formas de se controlar/minimizar o processo de corrosão de um material, ou mesmo acompanhar este processo, determinando o final da vida útil de um elemento devido ao avanço da corrosão. Pimenta (2001) cita que o controle da corrosão é controlar a reação do metal com o meio no qual ele está inserido, preservando suas propriedades físicas e mecânicas do material ao longo de sua vida útil. Desta forma, teremos um “controle” dos perigos/riscos existentes.

Mishina (2005), diz que é importante fazer a distinção entre perigo e risco, pois aparentemente estas duas palavras possuem o mesmo significado. Muhlbauer (2002), incita que o risco não é sinônimo de perigo, “é possível mudar o risco sem modificar o perigo”.

O risco representa uma possibilidade que um evento ocorra, e o perigo é o conjunto de elementos (ou características) deste potencial evento. Em outras palavras: o perigo em uma malha dutoviária é representado por conexões mal realizadas, vazamentos, pressões acima do normal, e o

principal deles que é o trabalho com produtos inflamáveis; o risco é a probabilidade de que algum acidente/incidente ocorra em se tratando de um trabalho com este produto, que será maior caso haja alguma das situações supracitadas.

Projetos de expansão da malha dutoviária são um reflexo do crescimento da população, bem como do seu poder econômico. Empresas para construção destas dutovias e concessionárias para o fornecimento de derivados serão necessárias, o que intrinsecamente exige que trabalhem de forma mais quantitativa e qualitativamente. Pois por se tratar de produtos classificados (inflamáveis e até explosivos) a implantação de: controles de qualidade em todas as etapas e de um programa de gerenciamento da integridade estrutural é fundamental para minimizar os riscos desta atividade, e até a sobrevivência da própria empresa operadora (Souza, 2003).

1.1. Objetivo Geral

Projetar, desenvolver e implementar um sistema intercambiável de inspeção em dutos de petróleo e gás capaz de utilizar diferentes técnicas de inspeção, como radioscopia, emissão acústica e em especial, o ultrassom.

1.2. Objetivos Específicos

- Estudar as principais técnicas de inspeção de dutos (ensaios não destrutivos);
- Conhecer os efeitos causados pelo processo de soldagem por eletrodo revestido;
- Estudar os dispositivos de inspeção de dutos já desenvolvidos e criar um dispositivo de inspeção em dutos utilizando tecnologias embarcadas, como CLP e Sistemas Supervisórios;
- A partir do estudo dos diversos elementos constituintes do sistema, aperfeiçoar a performance do conjunto, avaliar a precisão e validar sua viabilidade como um sistema automatizado de inspeção.

1.3. Apresentação da Dissertação

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, conforme descrito abaixo:

No Capítulo I é feito um breve histórico relacionando a importância da malha dutoviária, da necessidade de realizar inspeções em todas as fases desta malha, desde o fornecimento da matéria-prima (duto) até o produto acabado (dutovia), controlando os perigos e minimizando os riscos inerentes à esta atividade.

No Capítulo II é feito um breve estudo sobre os dutos, ensaios não destrutivos utilizados nas técnicas de inspeção e alguns dos sistemas já desenvolvidos para inspeção em dutos.

No Capítulo III, é feita uma explanação sobre os principais conhecimentos envolvidos no desenvolvimento da parte mecânica do sistema aqui desenvolvido e estudos realizados no decorrer do trabalho.

No Capítulo IV, é feita uma explanação sobre os principais conhecimentos envolvidos no desenvolvimento da parte elétrica do sistema, estudos realizados no decorrer do trabalho, configurações dos *softwares* adotados e a união da parte mecânica e elétrica do sistema.

No Capítulo V, apresenta-se os resultados dos testes, valores coletados e modelamento matemático do sistema após realizados os procedimentos de melhoria, além dos resultados de alguns testes adicionais no intuito de validar o sistema desenvolvido.

No Capítulo VI, conclusões a respeito do sistema desenvolvido, sobre o trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DAS TÉCNICAS MAIS ADOTADAS PARA INSPEÇÕES EM DUTOS

2.1. Introdução

Dutos são um meio comumente utilizado para a transmissão de substâncias líquidas e gasosas, como por exemplo, petróleo e gás natural. A importância deste tipo de transporte é fundamental em tempos onde a logística e a redução de custos na indústria em geral é cada vez maior. As tubulações são formadas geralmente por tubos de aço de grande diâmetro, que são soldados uns aos outros, formando linhas de tubos “kilométricas”, literalmente, pois em alguns casos estes tubos são utilizados para interligar bases petrolíferas em alto mar a navios ou mesmo a terra firme, TBG (2011).

A linha de gasoduto mais conhecida hoje em dia é a Brasil-Bolívia, que transporta o gás natural da Bolívia para o Brasil. Segundo a Transportadora Brasileira Gasoduto Brasil-Bolívia S.A. – TBG (2011), operadora do gasoduto e regulada pela ANP, o gasoduto Brasil-Bolívia possui 3.150 km de extensão e passa por 137 municípios de 5 Estados brasileiros. O gasoduto opera com pressão máxima de 75kgf/cm², sendo que em apenas alguns pontos da linha a pressão máxima chega a 100kgf/cm², TBG (2011).

“Eles são projetados para suportar altas pressões, internas e externas, e para serem resistentes aos processos de degradação, tais como corrosão” (Cardoso, 2005). “Processos de degradação, tais como corrosão têm uma influência substancial sobre a segurança e confiabilidade, principalmente em plantas de petróleo, causando vazamentos, incêndios, onerosas paradas não programadas e até mesmo desastres ambientais de grandes proporções” (IAEA, 2005) . Com o objetivo de evitar tais transtornos é fundamental que se realizem inspeções periódicas para avaliar a integridade estrutural dos dutos, e consequentemente das plantas de petróleo.

Resumindo, as tubulações são de fácil instalação e práticas do modo de vista operacional, ou seja, uma solução bastante viável, porém não devem ocorrer imperfeições ou vazamentos ao longo de

sua extensão, pois a perda de produtos e riscos de explosões, neste caso, também serão de grandes proporções.

Com o intuito de garantir a integridade estrutural de plataformas petrolíferas é crucial monitorar a qualidade da solda nas tubulações. Apesar de sua relevância, este parâmetro é muito difícil de determinar, devido tanto ao grande diâmetro da maioria dos tubos utilizados e da complexidade do sistema em questão. Existem estudos referentes à uma modelagem computacional baseada em MCNPX (código de MonteCarlo) combinada com a radiografia computadorizada para estimar a perda de espessura da solda em tubulações de grande diâmetro em alto mar. Segundo Correa, 2009, “o uso de modelagem computacional em ensaios não-destrutivos é um instrumento útil, os meios de baixo custo de coleta de informações sobre a interação da radiação com a matéria e avaliar a eficiência e o desempenho dos métodos experimentais. A metodologia para o cálculo da perda de espessura utilizando o código MCNPX (Monte Carlo) e detectores de imagem da placa apresentada neste trabalho tem se mostrado útil, sendo capaz de reproduzir com sucesso todos os processos de interação da radiação com a matéria, em bom acordo com os dados experimentais”.

Várias técnicas de ensaios não-destrutivos são aplicadas pela indústria, mas alguns ensaios ainda estão sendo adaptados para o campo, a maioria quase que absoluta de ensaios são realizados em laboratórios e em condições controladas. A importância do desenvolvimento de procedimentos de aplicação de ensaios em campo são de fundamental importância, pois alguns procedimentos não são realizados no campo devido à complexidade do sistema e a dificuldade de se transportar partes “prontas” de um sistema para a montagem em campo. No caso específico de uma tubulação kilométrica, os dutos são transportados para o campo e soldados *in loco*, ou seja, mesmo que o duto meça 3, 6 ou 12 m, em algum determinado momento a solda deverá ocorrer no local da instalação deste duto (a implatação de flanges como forma de união ocorrem apenas a cada 100 m ou mais, aproximadamente, devido ao custo e a possibilidade de manobras na linha).

Nas seções seguintes serão apresentadas as principais técnicas de inspeção de dutos utilizadas na atualidade, bem como as principais características, vantagens de cada uma delas e um breve comparativo.

2.2. Técnicas de Inspeção em Dutos

2.2.1. Ultrassom

Segundo a ABENDI (2011), o aparelho auditivo humano é capaz de captar frequências sonoras entre 20Hz (infrassom) e 20kHz (ultrassom), o que significa um campo de audição relativamente vasto, porém frequências abaixo de 20Hz ou acima de 20kHz são inaudíveis ao ser

humano, não por deficiência deste, mas por caracterizarem extremamente graves ou agudos, passando despercebidos.

“Sons produzidos em um ambiente qualquer, refletem-se ou reverberam nas paredes que consistem o mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Fenômenos como este apesar de simples e serem freqüentes em nossa vida cotidiana, constituem os fundamentos do ensaio ultrassônico de materiais. No passado, testes de eixos ferroviários, ou mesmos sinos, eram executados através de testes com martelo, em que o som produzido pela peça, denunciava a presença de rachaduras ou trincas grosseiras pelo som característico. Assim como uma onda sonora, reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, ao incidir numa descontinuidade ou falha interna a este meio considerado. Através de aparelhos especiais, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades”, (ABENDI, 2011).

Na Figura (2.1) pode-se notar a aplicação deste conceito, um transdutor envia e recebe ondas ultrassônicas em uma determinada peça, de acordo com a estrutura do material examinado a onda refletida se apresentará com uma forma regular. Porém uma descontinuidade no material irá de alguma maneira deturpar o formato da onda refletida, e com o auxílio de um monitor, o operador poderá detectar o local desta descontinuidade.

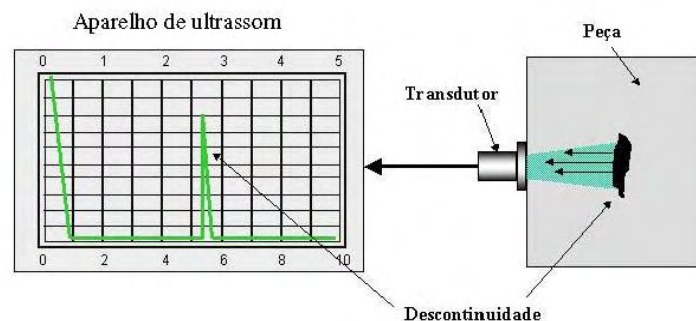


Figura 2.1 – Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom.

Os sinais captados pelos transdutores são convertidos (digitalizados) e transmitidos para os monitores (telas) do equipamento, basicamente em tempo real, (Rodrigues, 2001).

2.2.2. Líquido Penetrante

“O ensaio por Líquidos Penetrantes é considerado um dos melhores métodos de teste para a detecção de descontinuidades superficiais de materiais isentos de porosidade tais como: metais ferrosos e não ferrosos, alumínio, ligas metálicas, cerâmicas, vidros, certos tipos de plásticos ou materiais organo-sintéticos. Líquidos penetrantes também são utilizados para a detecção de vazamentos em tubos, tanques, soldas e componentes”, (ABENDI, 2011).

O líquido penetrante pode ser aplicado com o auxílio de pincel, pistola, aerosol ou imersão da superfície a ser ensaiada, todos com seus respectivos tempos de penetração. Após este tempo efetua-se a remoção deste primeiro líquido (penetrante) da superfície, com água ou solventes, para posterior aplicação de um segundo produto (revelador ou talco) que irá reagir com o primeiro e mostrar a localização das descontinuidades superficiais com precisão e grande simplicidade.

Em geral, materiais fundidos apresentam descontinuidades tais como gota fria e trinca de tensão provocados pelo processo de solidificação (resfriamento inadequado). Materiais conformados apresentam descontinuidades provenientes do processo adotado, tais como costuras, dupla laminação, sobreposição de material, ou ainda trincas provocadas pela pós-usinagem, fadiga do material e corrosão sob tensão. Todas estas descontinuidades podem ser facilmente detectadas aplicando este método.

2.2.3. Gamagrafia, Radiografia e Radioscopia

“O método está baseado na mudança de atenuação da radiação eletromagnética (Raios-X ou Gama), causada pela presença de descontinuidades internas, quando a radiação passar pelo material e deixar sua imagem gravada em um filme, sensor radiográfico ou em um intensificador de imagem”, ABENDI (2011).

O ensaio de radiografia foi o primeiro método de ensaio não destrutivo aplicado na indústria de materiais para descobrir e quantificar defeitos internos. Suas inúmeras aplicações incluem o ensaio em soldas de chapas para tanques, navios, tubulações e plataformas em alto mar, aplicações em peças fundidas em peças de com alto fator de segurança, como a indústria automobilística em porta-eixos, carcaças de direção, rodas de alumínio, airbags, blocos de motores e de câmbio; além de produtos moldados, forjados, materiais compostos, plásticos, engenharia aeroespacial, e outros.

O raio-X industrial pode ser realizado de três formas:

- Gamagrafia: idêntica a radiografia, tendo como fonte de radiação um componente radioativo, chamado de “isótopo radioativo” que pode ser o irídio, cobalto e o selênio, sendo este último o mais utilizado nos dias de hoje;
- Radiografia: técnica convencional, com um filme radiográfico e o gerador de raio-X (ampola de metal cerâmica). O raio-X será direcionado para o material, um filme é posicionado atrás do material e sofrerá o efeito do raio-X que atravessá-lo. Sendo assim, caso o material apresente alguma descontinuidade (interna/externa), o filme sofrerá uma maior incidência do raio-X e a imagem será referente à esta descontinuidade;
- Radioscopia: a peça é manuseada à uma certa distância, dentro da cabine de prova, proporcionando uma imagem instantânea da peça durante o movimento (manuseio), através de um intensificador de imagem conectado a um monitor (TV ou PC). Estas

imagens podem ser agrupadas digitalmente, de modo tridimensional, possibilitando localizar as descontinuidades em três dimensões, semelhante à uma tomografia.

O fator segurança (placas de chumbo, entre outros) é o que torna difícil a aplicação deste tipo de ensaio em campo. Devido a dificuldade do transporte do equipamento e das placas de proteção da radiação, sendo então uma de suas limitações, (Kaminski, 1997).

“A radiografia também passou a ser realizada em processos dinâmicos (tempo real), como no movimento de projétil ainda dentro do canhão, fluxo metálico durante o vazamento na fundição, queima dos combustíveis dentro dos mísseis, operações de soldagem, etc”, ABENDI (2011).

2.2.4. Partículas Magnéticas

“O ensaio por partículas magnéticas é usado para detectar descontinuidades superficiais e sub superficiais em materiais ferromagnéticos. São detectados defeitos tais como: trincas, junta fria, inclusões, gota fria, dupla laminação, falta de penetração, dobramentos, segregações, etc. O método de ensaio está baseado na geração de um campo magnético que percorre toda a superfície do material ferromagnético. As linhas magnéticas do fluxo induzido no material desviam-se de sua trajetória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou sub superficial, criando assim uma região com polaridade magnética, altamente atrativa à partículas magnéticas. No momento em que se provoca esta magnetização na peça, aplica-se as partículas magnéticas por sobre a peça que serão atraídas à localidade da superfície que conter uma descontinuidade formando assim uma clara indicação de defeito”, ABENDI (2011).

Aços ferríticos, peças conformadas, soldas, peças usinadas, tratadas termicamente e trincas por retífica são alguns exemplos típicos de aplicação desta técnica.

A extensão da falha e a idéia de sua profundidade é incitada pelo acúmulo das minúsculas partículas ferromagnéticas sobre a descontinuidade, já que a extensão e a profundidade serão diretamente proporcionais à este acúmulo, (Nepomuceno, 1989). Ou seja, a região da falha irá acumular partículas ao redor de sua extensão, e de forma menos concentrada à medida que esta descontinuidade esteja mais próxima da superfície (e vice-versa).

As descontinuidades são detectadas quando as linhas do fluxo magnético induzido são “interceptadas”. A peça deve ser magnetizada em pelo menos duas direções defasadas em 90°, para determinar o local da descontinuidade. Um avanço significativo desta técnica ocorreu quando do desenvolvimento de leitores óticos para a interpretação automática dos resultados.

2.2.5. Emissão Acústica

“O princípio do método é baseado na detecção de ondas acústicas emitidas por um material em função de uma força ou deformação aplicada nele. Caso este material tenha uma trinca,

descontinuidade ou defeito, a sua propagação irá provocar ondas acústicas detectadas pelo sistema. Os resultados do ensaio por emissão acústica não são convencionais. Na realidade este método não deve ser utilizado para determinar o tipo ou tamanho das descontinuidades em uma estrutura, mas sim, para se registrar a evolução das descontinuidades durante a aplicação de tensões para as quais a estrutura estará sujeita, desde que as cargas sejam suficientes para gerar deformações localizadas, crescimento do defeito, destacamento de escória, fricção, ou outros fenômenos físicos”, ABENDI (2011).

Aplicada em peças ou em estruturas metálicas complexas, a emissão acústica serve para analisar o comportamento dinâmico de defeitos, bem como registrar sua localização. A localização da descontinuidade é feita com o auxílio de sensores instalados na estrutura a ser monitorada. Através de transdutores piezoelétricos instalados sobre a estrutura, de forma estacionária, é possível captar a perturbação no meio (Filho, 2001).

Um exemplo tradicional é o caso da monitoração de cilindros de abastecimento contendo gás pressurizado, teste hidrostático em vasos de pressão, testes de fadiga, controle de processos de soldagem, e em casos específicos, caracterização de materiais.

2.2.6. PIG Instrumentado

PIG – *Pipeline Inspection Gauge* (Célula para Inspeção em Dutos).

“Os pigs instrumentados têm sido largamente utilizados como uma das ferramentas básicas de avaliação da integridade de dutos. Este fato não é diferente em empresas petrolíferas, à exemplo da PETROBRAS, onde o número de inspeções com pigs tem crescido continuamente nos últimos 10 anos. Até pouco tempo atrás, a PETROBRAS só contava com os serviços de pigs instrumentados a partir de empresas estrangeiras. Em 1998, uma opção caseira foi viabilizada, com a utilização de tecnologia da própria PETROBRAS, que através do seu Centro de Pesquisas - CENPES vem desenvolvendo pigs instrumentados há mais de 14 anos”, OLIVEIRA (2002).

Alguns pigs instrumentados utilizam o magnetismo como princípio de funcionamento, um campo magnético é aplicado sobre a superfície a ser examinada, sensores colocados na parte central deste campo monitoram continuamente o fluxo magnético, detectando a possível fuga magnética proveniente das descontinuidades, em geral tubulações já em uso apresentam descontinuidades devido à corrosão. Estes pigs normalmente se deslocam no interior das tubulações de forma autônoma, sendo impulsionados pelo próprio fluido transportado e são capazes de armazenar os dados coletados no curso para posterior análise.

Os pigs com pequeno número de sensores são considerados de baixa resolução, já os de alta resolução possuem um elevado número de sensores, e necessitam de *hardware* e *software* mais robustos para uma melhor caracterização e quantificação dos dados coletados. Os resultados da inspeção são apresentados de forma qualitativa, com os níveis de corrosão em percentual: leve, abaixo de 30%; moderada, entre 30 e 50%; e severa, acima de 50%.

2.3. Vantagens e Desvantagens da Técnica de Ultrassom

Vantagens em relação a outros ensaios:

- Trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outras descontinuidades de difícil detecção por ensaios como radiografia ou gamagrafia;
- Dispensa processos intermediários, agilizando a interpretação das indicações;
- Rapidez em relação ao ensaio de radiografia ou gamagrafia, devido a necessidade de revelação do filme, economizando tempo;
- Outros ensaios por radiações penetrantes requerem planos especiais de segurança e acessórios especiais para a sua realização;
- Dados obtidos no ensaio ultrassônico como: localização, tamanho, profundidade e a interpretação das descontinuidades são mais rapidamente interpretados que em outros exames. Por exemplo: um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho mas não sua profundidade, o que pode ser crucial para a determinação do custo e do processo de reparo.

Desvantagens em relação a outros ensaios:

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor;
- O registro permanente do teste não é facilmente obtido;
- Materiais de espessuras muito finas, constituem uma dificuldade para aplicação do método;
- Requer o preparo da superfície para sua aplicação. Em alguns casos de inspeção de solda, existe a necessidade da remoção total do reforço da solda, o que demanda um tempo considerável.

“Dentre as técnicas utilizadas atualmente, podemos dividir em dois grandes grupos: técnicas de avaliação local (ultra-som, partículas magnéticas e líquidos penetrantes) e técnica de avaliação global (emissão acústica e pig instrumentado ou inteligente). Normalmente é realizado um ensaio global, onde o objetivo é avaliar a condição de integridade, localizando e classificando áreas ativas quanto ao grau de comprometimento que eventuais descontinuidades impõe a integridade estrutural, e a partir daí, indicar qual método de avaliação local deverá ser utilizado. É notadamente visível o resultado das atuais técnicas de inspeções utilizadas, seja ela local ou global, mais é necessário uma abordagem sobre os critérios utilizados na otimização de programas de inspeção, uma vez que se trata de procedimentos de custo elevado exigindo um gerenciamento mais rigoroso”, (Mishina, 2001).

Em resumo, “nenhum ensaio não-destrutivo deve ser considerado o mais sensível ou o mais completo, pois as limitações e as vantagens fazem com que aplicação de cada ensaio seja objeto de

análise e estudo da viabilidade de sua utilização, em conjunto com os Códigos e Normas de Fabricação”, ABENDI (2011).

2.4. Aplicação das Técnicas em Sistemas de Inspeção

Uma análise utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) para o estudo da propagação de ondas elásticas vem sendo realizada para modelagem matemática do fenômeno. “A ferramenta é baseada na análise das anomalias que afetam a viagem das ondas elásticas no duto. O método dos elementos finitos para ondas (WFEM) com base na caracterização das ondas elásticas é introduzido para investigar a dispersão e espalhamento das ondas em tubos. Técnica de redução dinâmica é empregado para melhorar a eficiência computacional”, (Bouchoucha, 2010). Com a modelagem desenvolvida através do WFEM e utilizando decomposição modal, pode-se desenvolver comportamento dinâmico do duto e estudar a detecção de imperfeições que afetam a junção entre dutos adjacentes.

Em sistemas de pequeno porte, a tecnologia adotada se baseia no sistema de *pig*, que é um processo de limpeza interna dos dutos. O *pig* é uma peça grande de material polimérico e que é “soprado” no duto, este conjunto irá arrastar todas as impurezas contidas em um determinado trecho da tubulação. A Figura (2.2) demonstra as diversas formas de *pig* e o início da operação de *pigging*, extraídos do site da TDW (www.tdwilliamson.com). A maioria dos sistemas de inspeção por *pigging* são para a medição de irregularidades na superfície interna da tubulação, pois o instrumento de medição é uma espécie de apalpador de superfície. Na Figura (2.3) é ilustrada a limpeza realizada por um *pig*.



Figura 2.2 – Diversas formas de *pig* e um operador introduzindo o *pig* para iniciar a limpeza do duto. Fonte: www.tdwilliamson.com.



Figura 2.3 – Limpeza do duto. Fonte: Silva, 2001.

O sistema de pig de perfilagem da Figura (2.4), foi desenvolvido para determinação da geometria interna do duto, de movimentação autônoma, durante o trajeto os inúmeros sensores (apalpadores) fazem a leitura da superfície do duto e também se autoajustam caso haja uma variação do diâmetro no duto. Segundo o Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção - CPTI, “foi criado um sensor geométrico de alta resolução, o sensor tipo palito. Este sensor permite a inspeção de corrosão interna no duto com uma qualidade que de outra forma só seria possível utilizando técnicas muito mais caras e complexas como o ultra-som. Por ser baseada em princípios simples, esta tecnologia é bastante robusta, sendo menos sujeita a interferências elétricas e dispensando a necessidade de um líquido acoplante”.

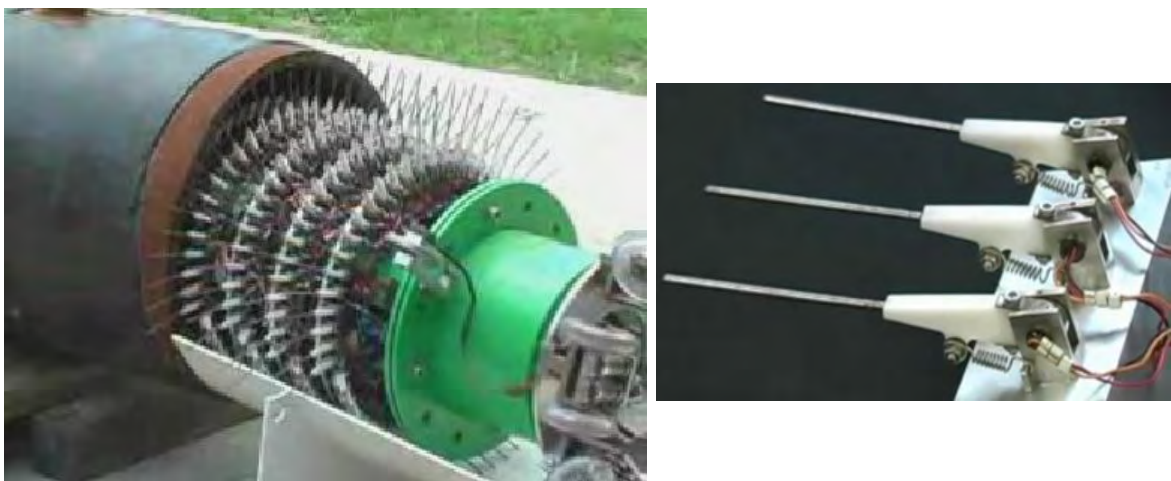


Figura 2.4 – Pig geométrico, ou pig palito (apalpador), desenvolvido pela PUC-RJ e Petrobrás, e dispositivo apalpador (sensor de medição). Fonte: www.cpti.cetuc.puc-rio.br.

Apesar de ser um sistema de pequeno porte, se torna caro devido aos inúmeros apalpadores utilizados, além da desvantagem de necessitar desconectar uma parte da tubulação para o início do trabalho de inspeção. Outra desvantagem dos sistemas baseados em “pigging” é o sistema de medição de irregularidades na tubulação, pois o instrumento é uma espécie de apalpador de superfície, ou seja, não detecta trincas e irregularidades no interior da parede do duto, ou na superfície externa. O sistema de medição de ultrassom pode detectar a irregularidade, seja na superfície interna, externa ou no interior da parede do duto, neste último caso pode ainda informar a o tamanho da “falha” e a distância dela em relação à superfície.

Na Figura (2.5), tem-se um projeto desenvolvido pela parceria do Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF e Grupo de Robótica, Controle e Automação – RCA, ambos pertencentes à Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, para inspeção de dutos de diâmetros entre 4” e 24”, sendo este projeto o que mais se aproxima à este trabalho. Segundo o LAMEF (2011), “apresenta-se aqui um novo conceito em sistemas de inspeção capaz de posicionar os sensores de ultra-som em qualquer posição ao longo do duto, sem limite de comprimento da superfície a fim de inspecionar. Sendo controlado à distância, pode percorrer grandes extensões de tubo, diminuindo os riscos para o operador em áreas com risco de explosão, alagamentos e de difícil acesso”. Nota-se que neste projeto existem vários motores de passo (custo elevado), transdutores de ultrassom e conexões de rede e alimentação, exigindo montagens/desmontagens para adaptação ao diâmetro do duto.

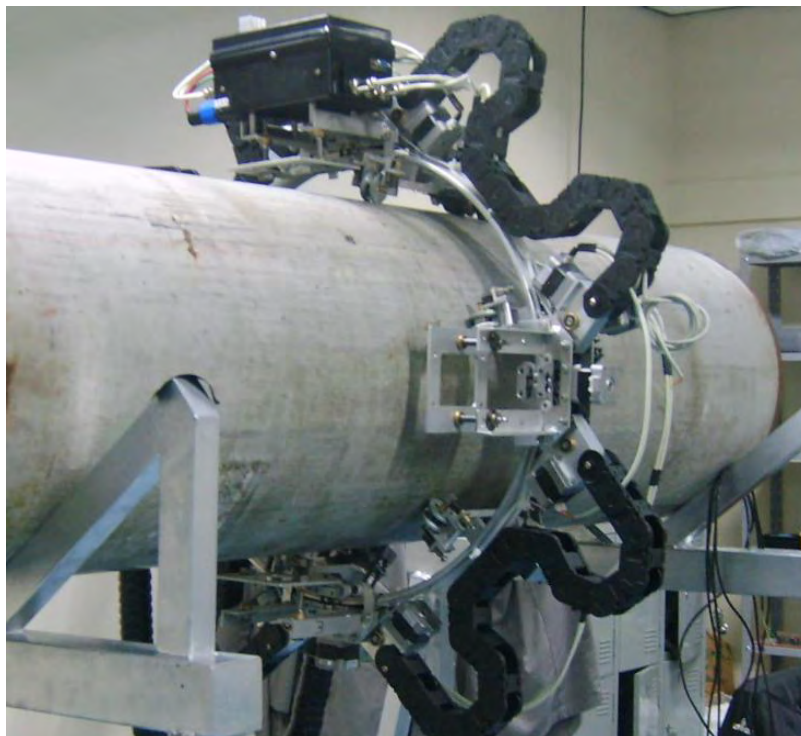


Figura 2.5 – Sistema desenvolvido pela LAMEF–RCA (UFRGS).

2.4. Conclusão

A técnica de ensaio não destrutivo por ultrassom é uma forma bastante simples de verificar a integridade de um material, a emissão de uma onda de alta frequência que será gerada por um emissor em direção ao material, ao ultrapassar o material a onda sofrerá uma variação e por fim será captada por um receptor. Para a determinação de anomalias, um material previamente selecionado é utilizado como padrão de referência (calibração), gerando o sinal padrão que deverá ser captado pelo receptor, e após esta etapa, inicia-se o teste no material a ser inspecionado, a falha é indicada caso haja alguma diferença entre o sinal captado e o sinal de referência. Quaisquer variações de espessura, densidade ou absorção são características do material que provocam alterações no sinal, pois produzem perturbações na intensidade do feixe recebido.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DA PARTE MECÂNICA DO SISTEMA INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO EM DUTOS

3.1. Introdução

O processo de inspeção deve fornecer informações precisas à respeito das possíveis imperfeições (trincas, bolhas, ...) do duto, sobre a localização e tamanho destas. Quanto ao processo de confecção de uma tubulação de petróleo e gás, pode-se realizar inspeções em dois momentos distintos:

- ✓ Durante o processo de união dos dutos por soldagem;
- ✓ Como forma de monitoramento da corrosão (manutenção).

Após algum tempo de observação em processos de inspeção em juntas soldadas, foi possível detectar a dificuldade na obtenção de um padrão de execução para a realização destas inspeções – não cabe aqui discutir a norma ABNT ou suas implicações, a dificuldade aqui implícita se trata da forma como cada operador de inspeção realizar o teste – não que isto traga prejuízo ou minimize a eficiência na detecção das possíveis imperfeições dos dutos, mas – no tempo dispensado para realizar esta operação.

Além do supracitado, existe ainda a necessidade de mantermos uma correlação fiel entre a detecção da possível imperfeição e com a sua devida localização. Uma forma automatizada de se realizar a inspeção, pode trazer benefícios para minimizar estes problemas, basta que este automação do processo seja ágil, confiável e imparcial: abrangendo toda a superfície do duto, com medições que estejam intrinsecamente relacionadas com a posição e que sejam armazenadas de imediato, garantindo assim que todo o processo seja rápido e seguro. No caso particular deste trabalho, foi desenvolvido um sistema para trabalhar com juntas soldadas, mas que ao mesmo tempo pode-se alterar a sua programação para realizar inspeções ao longo do duto.

As tubulações, bem como seus sistemas de inspeção, podem ser basicamente divididos em grande e pequeno porte. As tubulações de grande porte são aquelas que possuem grandes diâmetros, acima de 20” (500 mm). Para tal situação, exige-se um sistema que possa abranger toda a sua

circunferência, sendo assim, tem-se um sistema de inspeção de grande porte, com peças e conjuntos de igual magnitude, e conseqüentemente se torna de custo elevado pela implementação de “inúmeros” elementos (motores e transdutores).

A idéia central deste trabalho é reduzir os componentes envolvidos na construção do sistema de inspeção, tornando-o de simples construção, baixo custo e de fácil transporte, pois na iminência de utilizá-lo em inspeções de monitoramento do processo de corrosão (medição de espessura das tubulações em campo), o seu transporte será um problema a menos para o(s) inspetor(es).

3.2. Idealização do Sistema

A primeira idealização do sistema consistia apenas em utilizar um atuador que acionasse uma espécie de encapsulado. O encapsulador serve de alojamento para o instrumento de medição que realiza a inspeção. Logo foi necessário determinar quais as especificações mais relevantes ao produto desta idealização, assim:

- ✓ a medição deve ser realizada externa ao duto;
- ✓ as medições não devem ser apenas de juntas soldadas, mas também de monitoramento do processo de corrosão de dutos;
- ✓ não deve ser necessário desconectar as flanges dos dutos, o que causaria a interrupção da transmissão do petróleo ou gás;
- ✓ um motor de corrente contínua poderá fazer o papel de atuador, pelo excelente custo-benefício;
- ✓ para garantir a precisão da posição do instrumento de medição, deve ser acoplado ao motor através de engrenagens;
- ✓ como o instrumento de medição poderá necessitar de condutores (fios) para transmitir o sinal de sua medição, o motor de corrente contínua escolhido deverá permitir o seu acionamento no sentido horário e anti-horário, evitando assim que os condutores se enrolem no duto;
- ✓ uma espécie de “carrinho-de-mão” deve ser utilizado como base, para alojar bateria, painel elétrico e demais dispositivos que possam ser utilizados para o controle do sistema.

De posse destas primeiras especificações do sistema, um esboço foi criado à mão e posteriormente, em software CAD para melhor percepção do todo, conforme pode-se observar na Fig. (3.1).

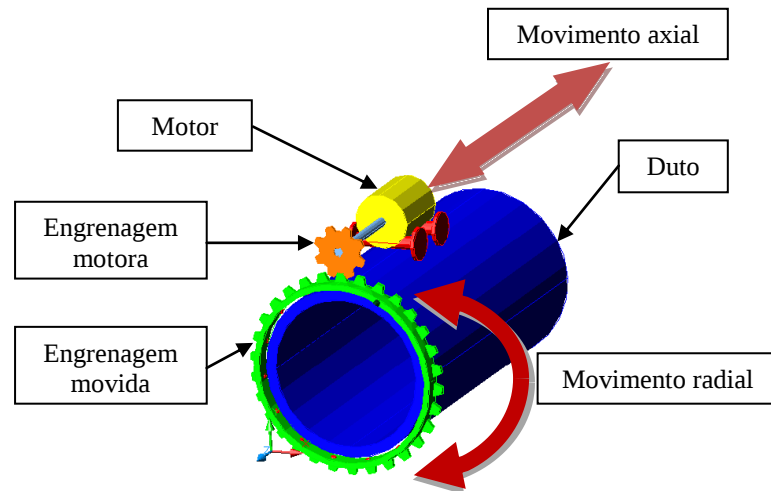


Figura 3.1 – Esboço do sistema. Fonte: Barroso, 2010.

Em seguida, algumas análises foram feitas e assim, o número de características a serem atendidas pelo sistema ganhou acréscimos:

- ✓ o posicionamento do carrinho não deve ser feito manualmente, assim um motor de corrente contínua deve ser implementado de modo a posicionar precisamente o sistema ao longo do duto;
- ✓ o movimento axial do sistema deve ser realizado indefinidamente, ou seja, o sistema poderá se movimentar “quilômetros” sem a necessidade da intervenção humana;
- ✓ roldanas podem ser adotadas como meio de transmissão do movimento axial, não exigindo complexidade para confecção e muito menos de fixação ao duto;
- ✓ para aumentar a fricção da roldana com o duto, anéis de borracha do tipo O’Ring serão fixados nas bordas das roldanas, exemplificado na Fig. (3.2).

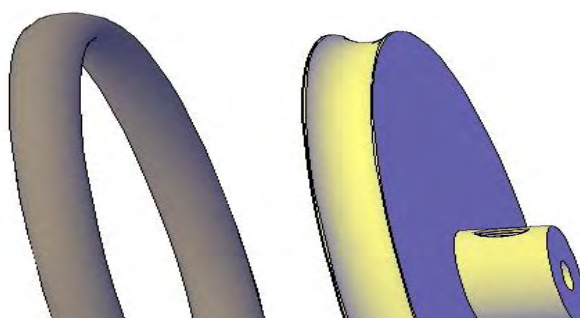


Figura 3.2 – Esboço da roldana e anel O’ring.

Inicialmente, a borda da roldana seria côncava (abaulada) para melhor fixação do anel O’ring, porém por praticidade na confecção, o perfil foi realizado em “V”.

Um detalhe a ser considerado para a confecção do desenho técnico mecânico (Anexo III) das peças do primeiro protótipo era o diâmetro do duto a ser inspecionado, assim foi escolhido um duto de Ø4”, pois o mesmo já se encontrava disponível no Laboratório de Engenharia de Precisão – LEP, do

Centro de Tecnologia do Campus I da UFPB. A Figura (3.3) apresenta a ideia inicial do protótipo, onde o mesmo apresenta basicamente as seguintes partes:

- ✓ Engrenagens: cilíndricas de dentes retos, fabricadas com material de náilon, módulo (m) = 2, ângulo de pressão transversal (α) = 20° , número de dentes da engranagem motora (Z_1) = 32 e número de dentes da engranagem movida (Z_2) = 72, a engranagem 1 transmite a rotação do motor elétrico responsável pela movimentação radial do sistema, a engranagem 2 recebe o movimento e serve de suporte para os transdutores de ultrassom;
- ✓ Motores: elétricos de corrente contínua, tensão de $24V_{cc}$, responsáveis pelo movimento axial e radial.
- ✓ Roldanas: fabricadas em náilon, diâmetro de 106 mm, com perfil em “V” para encaixe de um anel de elastômero do tipo O’ring, uma delas foi utilizada na transmissão da rotação do motor responsável pela movimentação axial do sistema e a outra apenas como sustentação, alinhando o conjunto.

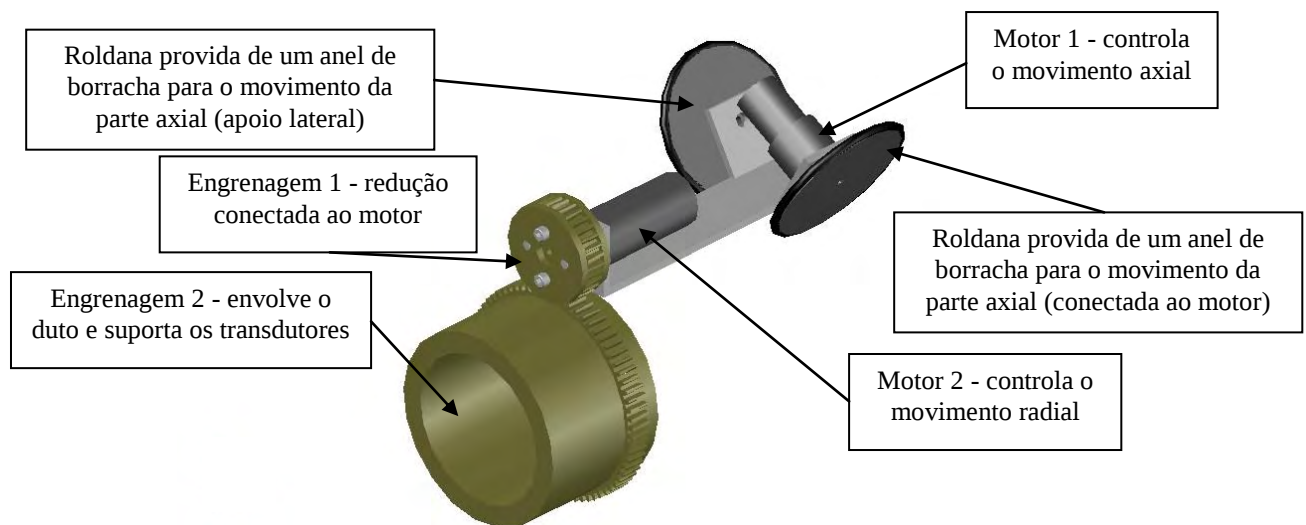


Figura 3.3 – Primeiro protótipo desenvolvido.

Um ponto importantíssimo deste sistema, ficava agora por conta do encapsulado, mencionado anteriormente, que serviria de alojamento para os instrumentos de medição. Como ponto de partida, foi adotado que o instrumento de medição seria um transdutor de ultrassom, o que normalmente requer apenas um furo roscado na dimensão do transdutor, ou caso se adotasse um transdutor retangular (ou quadrado) o furo roscado serviria para a fixação do suporte deste transdutor.

O encapsulado deve possuir dentes de engrenagem para que o motor de corrente contínua possa transmitir o seu movimento. Uma engrenagem normalmente é uma peça única e assim a sua instalação em um duto agora é o problema, pois exige a abertura do duto para instalação, porém caso a engrenagem seja bipartida, o problema será resolvido.

Para tal, deve-se adotar um dispositivo de montagem e desmontagem práticos deste bipartido, no caso, foram aplicados parafusos allen M8 sem cabeça, como mostra a Fig. (3.4). Segundo Shigley (2004), parafusos são elementos que permitem uma prática montagem e desmontagem de peças e equipamentos, além permitir uma fina regulagem de algum elemento/componente (ajuste).

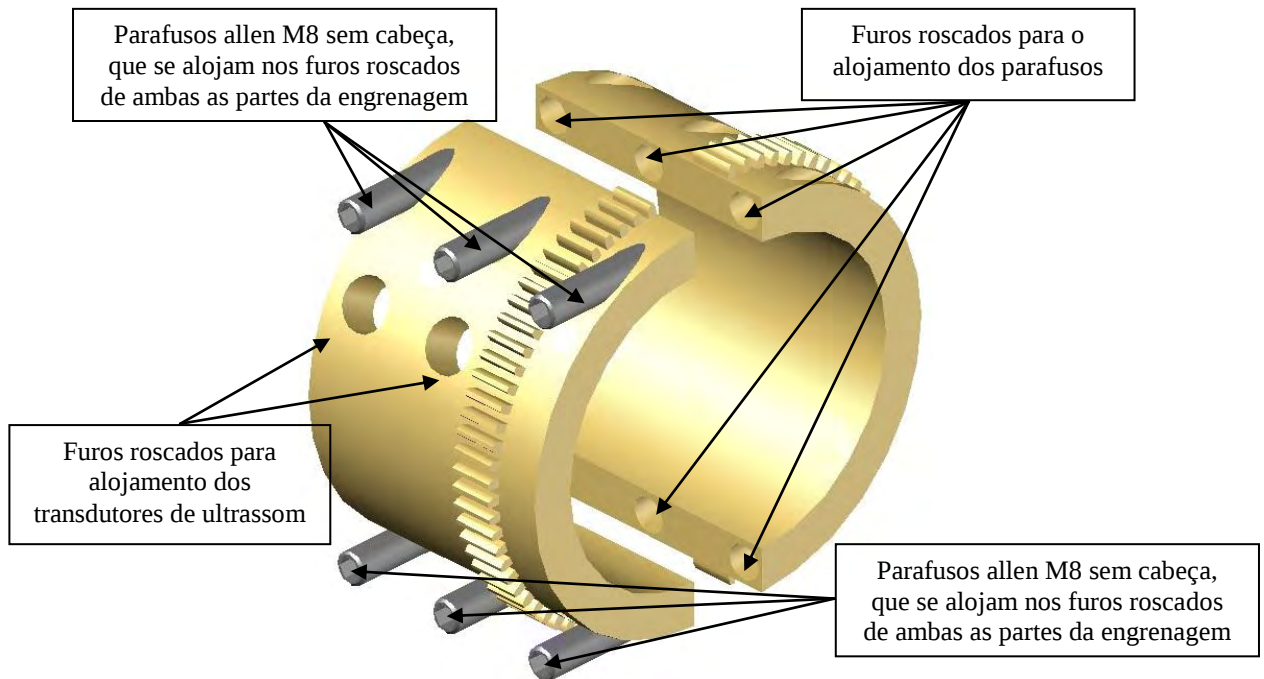


Figura 3.4 – Ilustração dos parafusos allen unindo a engrenagem bipartida, facilitando a sua instalação em dutos.

A engrenagem 2, mostrada na Fig. (3.4), foi confeccionada normalmente como uma peça única, sendo então confeccionados os dentes da engrenagem. Os furos roscados para o alojamento dos parafusos foram feitos antes de serrar a peça ao meio, pois assim a distância entre os dentes da engrenagem foi mantida após a separação, como pode-se observar na Fig. (3.5). Caso a montagem dos parafusos seja feita de forma errada, “atrasando” ou “antecipando” filete(s) de rosca, será possível notar a diferença na distância entre os dentes da engrenagem, maior ou menor, respectivamente.

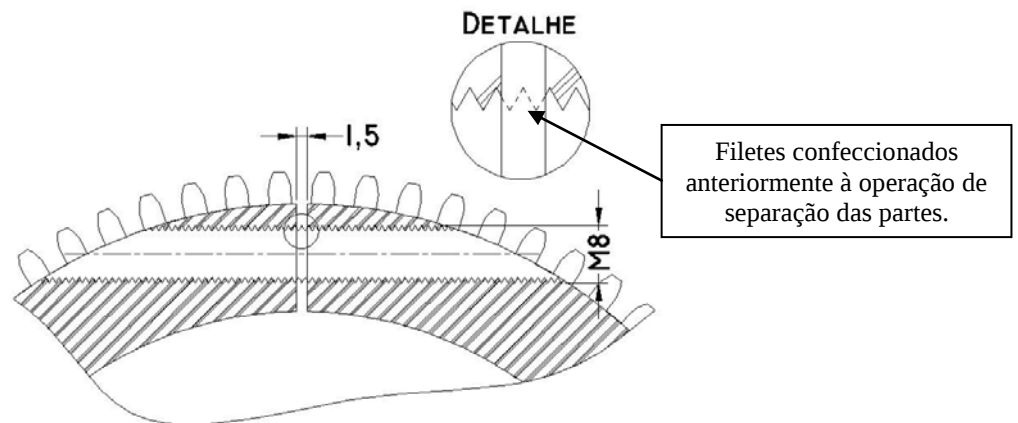


Figura 3.5 – Detalhamento do espaço causado durante a separação do bipartido, e a manutenção deste espaço devido a confecção da rosca anteriormente à operação de serrar.

Um problema detectado, antecipadamente também, foi em relação à fricção excessiva da engrenagem 2 com o duto. O atrito do tipo mancal deslizante do duto com a engrenagem seria muito alto, além de possíveis imperfeições ao longo do duto (corrosão ou “machucados”) impedir o movimento (travar), seja axial ou radial.

A fricção da engrenagem 2 será minimizada com a confecção de furos roscados, nos quais serão alojados molas, esferas e parafusos de ajuste. Com pode-se observar na Fig. (3.6), este conjunto parafuso-mola-esfera entrará em contato com o duto, ao invés da engrenagem 2.

Esferas possuem áreas de contato pontuais, o que reduz o esforço para sua movimentação, por substituição do tipo de atrito, segundo Shigley (2004), “em um mancal de rolamento, a fricção inicial é cerca de duas vezes a fricção inicial de funcionamento, ainda que seja insignificante em comparação com a fricção inicial de um mancal deslizante”. Em suma, este conjunto proporciona uma movimentação mais suave, exigindo menos esforço e ainda corrige possíveis imperfeições do duto.

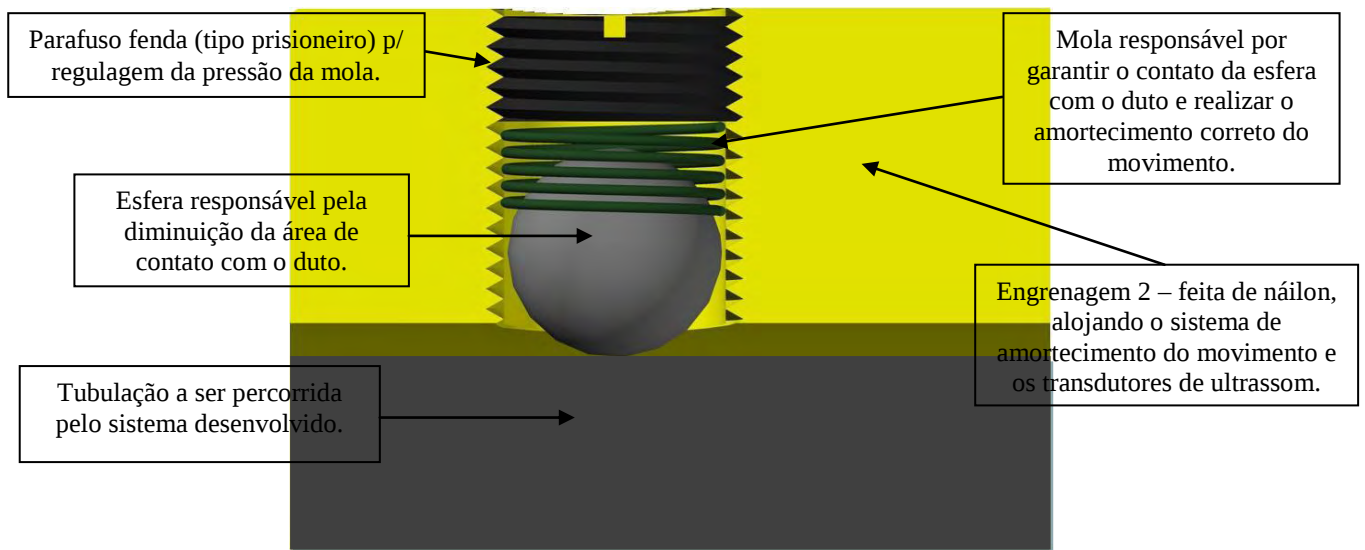


Figura 3.6 – Ilustração do conjunto parafuso-mola-esfera, que regula a folga/atrito entre a engrenagem 2 e o duto, gerando um amortecimento do movimento do sistema como um todo.

Neste tipo de conjunto, parafuso-mola-esfera, visualizados na ilustração da Fig. (3.6) e na foto da Fig. (3.7), ainda pode-se ressaltar que o aperto no parafuso provoca um tensionamento na mola em relação com a esfera, e quanto maior a tensão, maior será a fricção (atrito de deslizamento) entre a mola e a esfera, bem como a fricção entre a esfera e o duto, e assim um dos componentes do coeficiente de amortecimento de movimento será maior. Caso haja irregularidades ao longo do duto, a esfera tem uma certa liberdade com a mola para se movimentar se adaptando a superfície do duto, para cima ou para baixo.

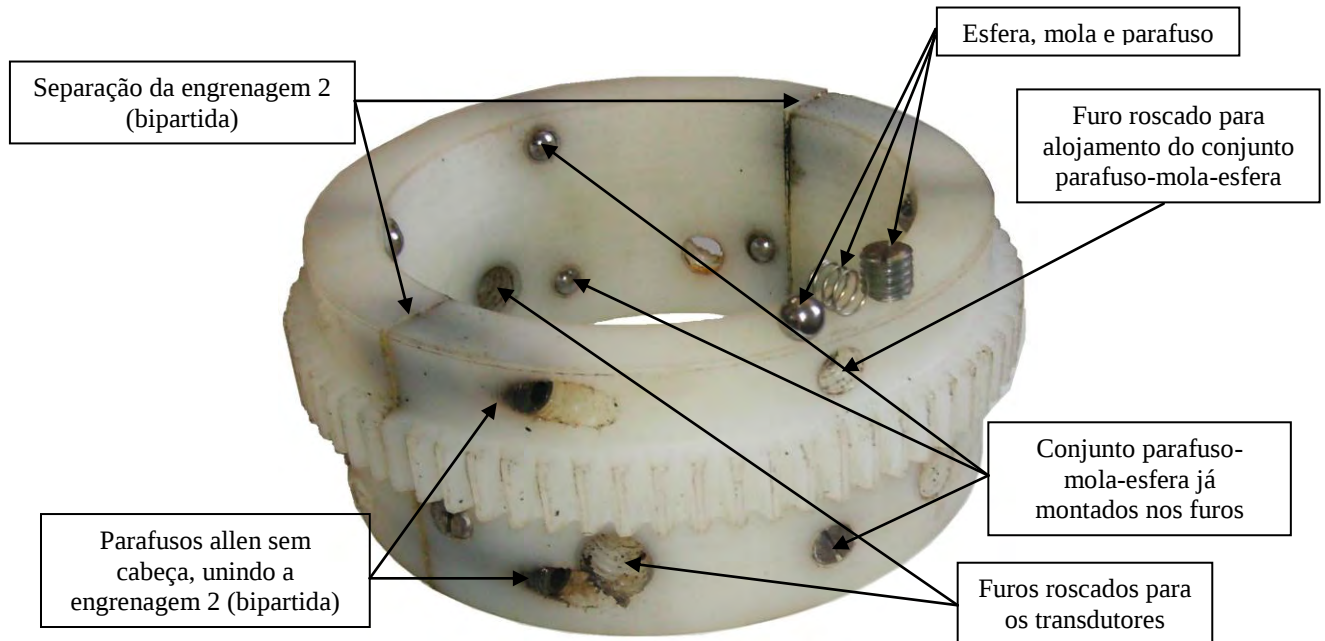


Figura 3.7 – Ilustração da engrenagem 2, com os furos roscados para o alojamento dos transdutores, dos conjuntos parafuso-mola-esfera e a união do bipartido com parafusos allen.

Visando não apenas tubulações de menor porte, ou seja, a utilização de um mesmo sistema que possa realizar suas medições independentemente do diâmetro da tubulação, o projeto foi sendo concebido após várias depreensões. Esta configuração do protótipo (Fig. 3.3) visou a simplicidade máxima do sistema e baixíssimo custo, confirmada na prática, visto que sua confecção foi de extrema rapidez. Porém, este protótipo trouxe consigo alguns problemas como:

- ✓ A pequena massa do conjunto dificultou a sua movimentação no sentido axial do duto, já que a fricção entre a engrenagem 2 e o duto era maior que o apresentado entre as roldanas e o duto, fazendo assim a roldana deslizar, o problema foi solucionado acrescentando massa extra (pesos) à base do conjunto;
- ✓ Mesmo acrescentando massa extra (pesos) à base do conjunto, a força apresentada pelo motor 2 é muito maior do que a necessária, e com a falta de estabilidade, o conjunto não se manteve em cima do duto (caía) sem ao menos rotacionar a engrenagem 2. Para solucionar este problema seria necessário desenvolver um sistema de fixação do conjunto ao duto, o que fugia da premissa de um sistema simples e de baixo custo.

O grupo acionador inicialmente idealizado da forma ilustrada na Fig. (3.3), ficou demasiadamente leve, previsto como potencial possibilidade de falha e posteriormente constatado, levando o grupo acionador ao “colapso”. A estrutura provida de roldanas se mostrou ineficaz para a operação uma vez que a massa do sistema era muito pequena, não garantindo a aderência necessária

para o deslocamento do conjunto, havendo deslizamento quando acionado no sentido axial (patinação) e desestabilização do conjunto quando acionado no sentido radial (queda).

O motor 2 (parte radial), ao tentar girar a engrenagem 2, que suportará os transdutores de ultrassom, mesmo com a pequena fricção proporcionada pelo conjunto parafuso-mola-esfera, fez com que o sistema girasse em torno da engrenagem 2, contrariamente ao desejado, o que derrubou o sistema da tubulação, conforme diagrama na Fig. (3.8).

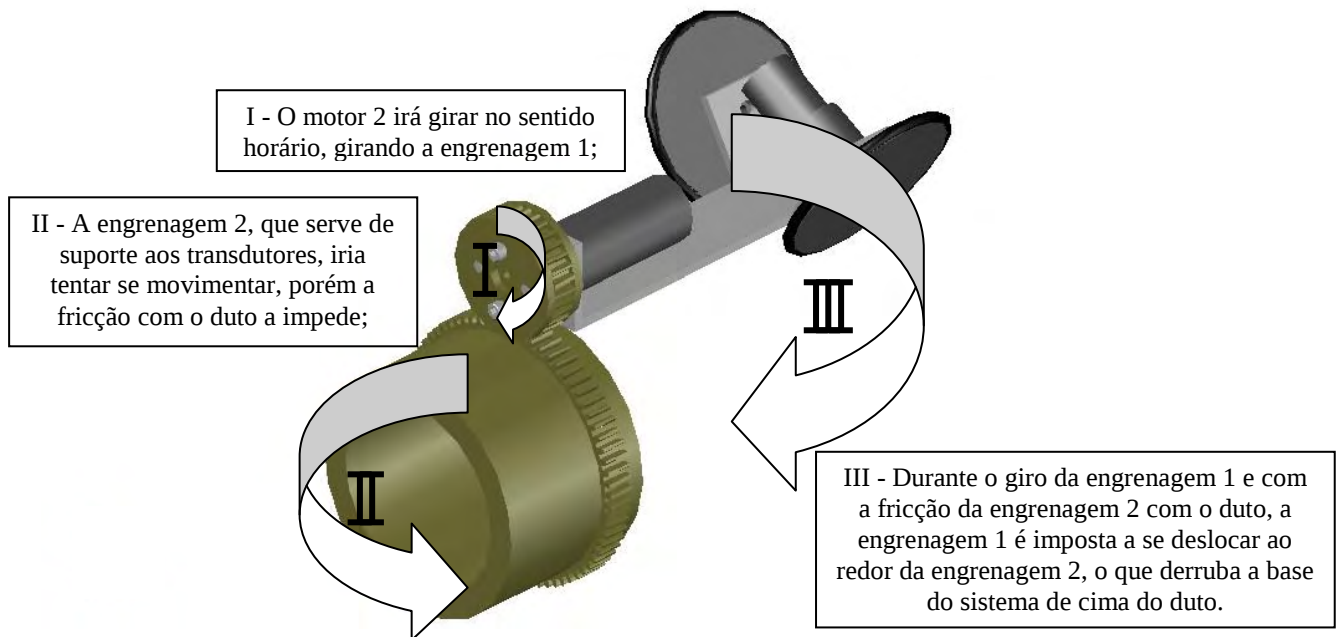


Figura 3.8 – Diagrama de forças durante o movimento radial.

Ao acionar o motor, este aplica o seu torque na engrenagem 1, o que teoricamente fará girar a engrenagem 2. Deve-se observar sempre que para que isto ocorra, a base do motor deve ser sólida e bem fixada, ou que ao menos nesta base haja uma oposição ao movimento muito maior que o conjunto que a ser movido, o que neste caso não ocorreu, pois o atrito entre a engrenagem 2 e o duto era maior que o atrito entre a base do motor e o duto.

Além do problema citado anteriormente, o sistema não poderá se locomover indefinidamente devido à existência de suportes da própria tubulação, válvulas de fechamento e flanges, que se localizam em pontos estratégicos. Desta forma, foram necessárias mais alguns estudos até chegar ao protótipo final. O aumento da massa foi descartada, pois resolveria apenas o deslizamento axial, e não iria garantir a estabilidade quando do movimento radial, conforme mencionado anteriormente.

Assim, o grupo acionador deverá ser fixado à tubulação para que não haja a possibilidade de movimentação relativa entre estas partes, pois eventualmente irá gerar um erro entre o movimento do sistema e a sua real posição.

3.3. Sistema Definitivo – Parte Mecânica

As engrenagens responsáveis pelo movimento radial foram mantidas do primeiro protótipo, pois este conjunto tem como suas características principais ser de baixo custo e fácil transporte. A engrenagem 2 (bipartida) sofreu apenas uma redução na sua largura, mas que indiretamente reflete na diminuição de sua massa. Lembrando que a razão pela qual esta deve ser bipartida é a facilidade de instalação no duto, sem a necessidade desconectar o duto de seus flanges ou outros componentes (que são soldados).

A intercambialidade, sempre mencionada neste projeto, de inspeção automática em dutos de diversos diâmetros pode ser feita mantendo o grupo acionador e substituindo apenas a engrenagem 2 pela específica para o diâmetro em questão. Sendo assim, temos um único grupo acionador, com programação flexível, pequeno porte, leve e fácil de ser transportado, e a engrenagem 2 que será escolhida de acordo com o diâmetro do duto, confeccionada de náilon e bipartida, garantindo assim a leveza para o seu, também fácil, transporte.

Quanto ao grupo acionador, houve uma modificação na base para a parte responsável pela movimentação axial no duto. Foi confeccionada uma transmissão do tipo pinhão e cremalheira. Este tipo de transmissão de movimento garante o não deslizamento entre as partes envolvidas, eliminando o movimento relativo.

Para efeitos de teses, a cremalheira foi fixada ao duto através de parafusos, porém como produto final, a cremalheira pode ser fixada ao duto com auxílio de cintas de aço. Em alguns testes, mesmo com uma fixação (precária) com abraçadeiras de nylon, o sistema se apresentou estável e sem deslizamentos.

Para fornecer a altura necessária para que o motor 1 gire sobre a cremalheira, o pinhão deveria possuir um número de dentes elevado ($Z_x = 37$, $m = 1,5$ e $\alpha = 20^\circ$), o que tornaria o deslocamento muito rápido. O número de dentes ideal ($Z_3 = 20$, $m = 1,5$ e $\alpha = 20^\circ$) para o movimento não proporciona um acoplamento ideal entre as partes (pinhão-cremalheira) devido à altura da posição de fixação do motor na base e a posição de fixação da cremalheira à tubulação, sendo assim, foi confeccionada uma outra engrenagem ($Z_4 = 17$, $m = 1,5$ e $\alpha = 20^\circ$), uma intermediária, Fig. (3.9). A cremalheira foi confeccionada com o mesmo módulo, obviamente, assim o passo circular é de $p = 4,71$ mm, $m = 1,5$ e $\alpha = 20^\circ$.

A inserção desta engrenagem intermediária não prejudica a transmissão, pois como engrenagens dispostas em série produzem um movimento idêntico ao se dispormos apenas a engrenagem motora conectada à última engrenagem da série (mesma relação de transmissão), apenas alterando o sentido de rotação de acordo com o número de engrenagens intermediárias inseridas, (Shigley, 2004).

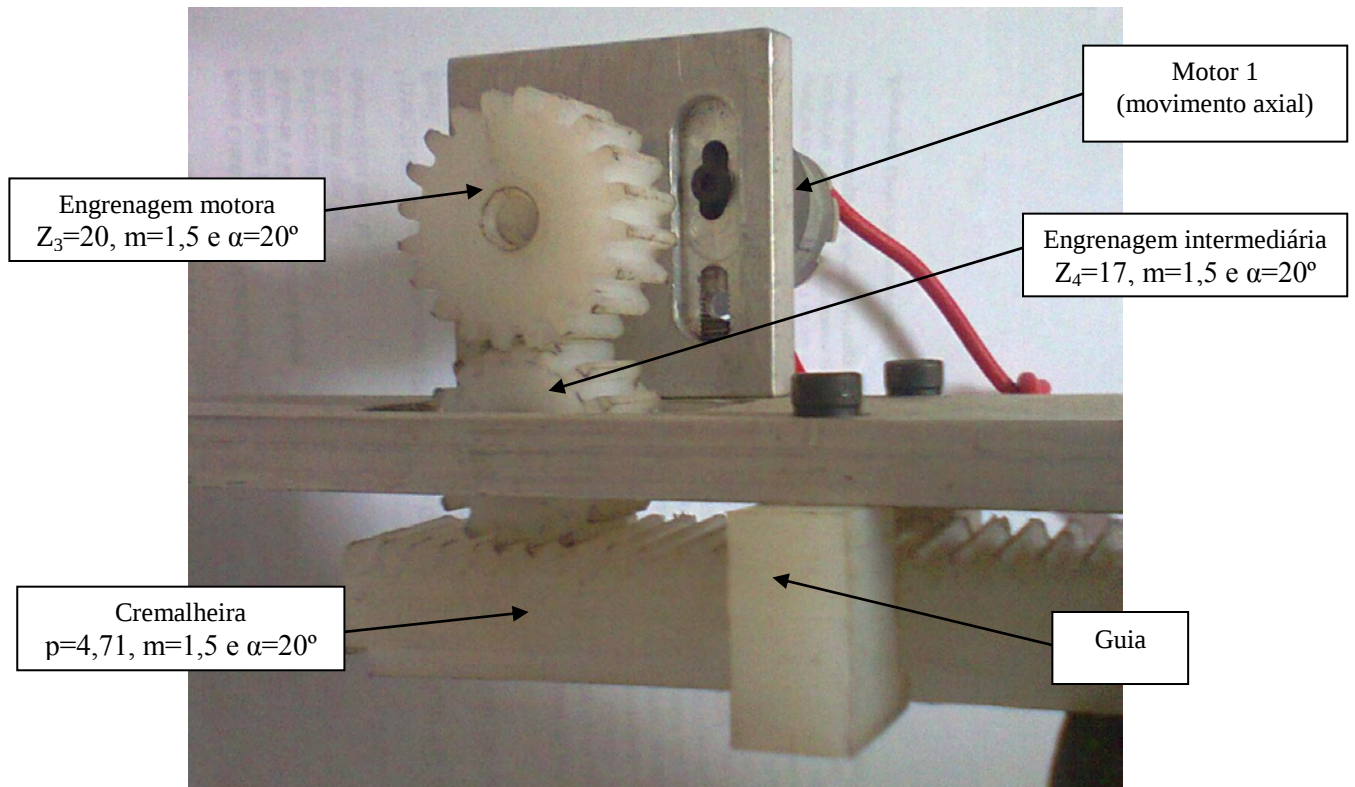


Figura 3.9 – Ilustração do sistema desenvolvido, conjunto para deslocamento axial.

Para o alinhamento do sistema com a cremalheira no deslocamento axial, foram confeccionadas 6 (seis) guias com perfil em “L”, e a cremalheira foi confeccionada no perfil em “T” para o encaixe das guias, vide Fig. (3.10).

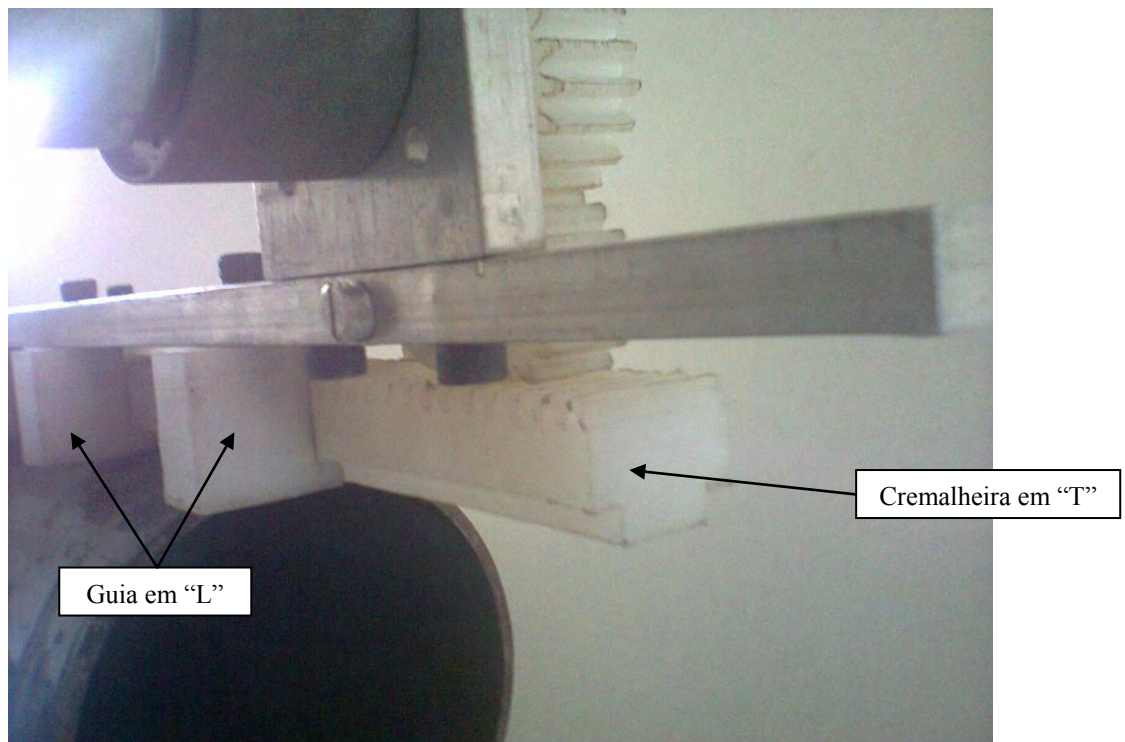


Figura 3.10 – Ilustração do sistema desenvolvido, guias do deslocamento axial.

Conforme mencionado anteriormente, o conjunto responsável pelo deslocamento radial foi mantido. Sendo formado pela engrenagem 1 conectada ao motor 2, e a engrenagem 2 é bipartida para facilitar a instalação nos dutos (para cada diâmetro de tubulação existirá uma engrenagem bipartida correspondente). A engrenagem 1 (motora) é provida de dois discos, um de cada lado, para guiar o giro evitando que a engrenagem 2 (movida) por ventura se desconecte.

Estes discos ainda promovem o movimento axial da engrenagem 2, acompanhando o sistema quando do acionamento neste sentido, pois estes discos irão empurrar/puxar a engrenagem 2, conduzindo consigo os transdutores, Fig. (3.11) e (3.12).

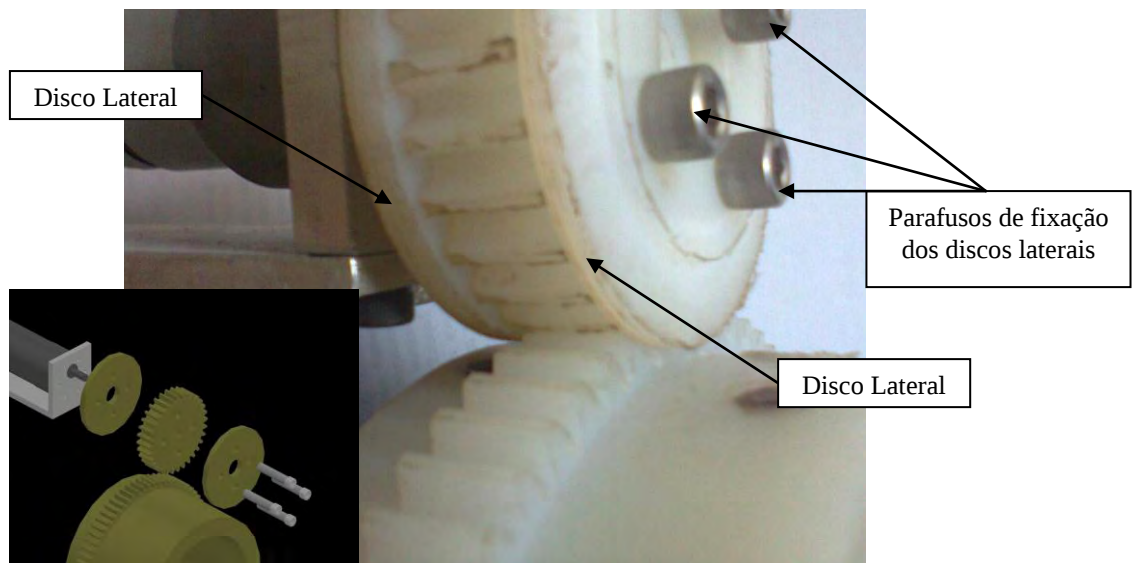


Figura 3.11 – Ilustração dos discos laterais para o conjunto de deslocamento radial. No detalhe, uma ilustração feita em software CAD, representando o esquema de montagem das peças.

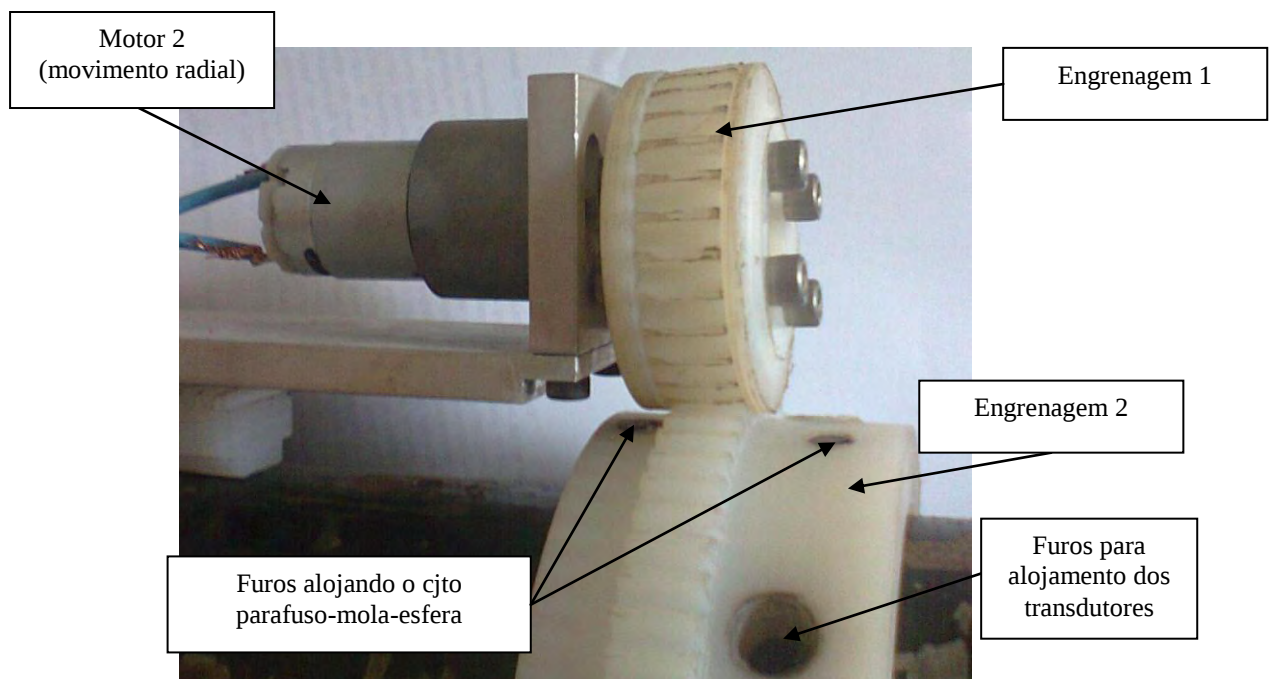


Figura 3.12 – Ilustração do sistema desenvolvido, conjunto para deslocamento radial.

Por fim, com todas as peças montadas, temos dois conjuntos acionados pelos motores de corrente contínua, ilustrados na Fig (3.13 e (3.14).

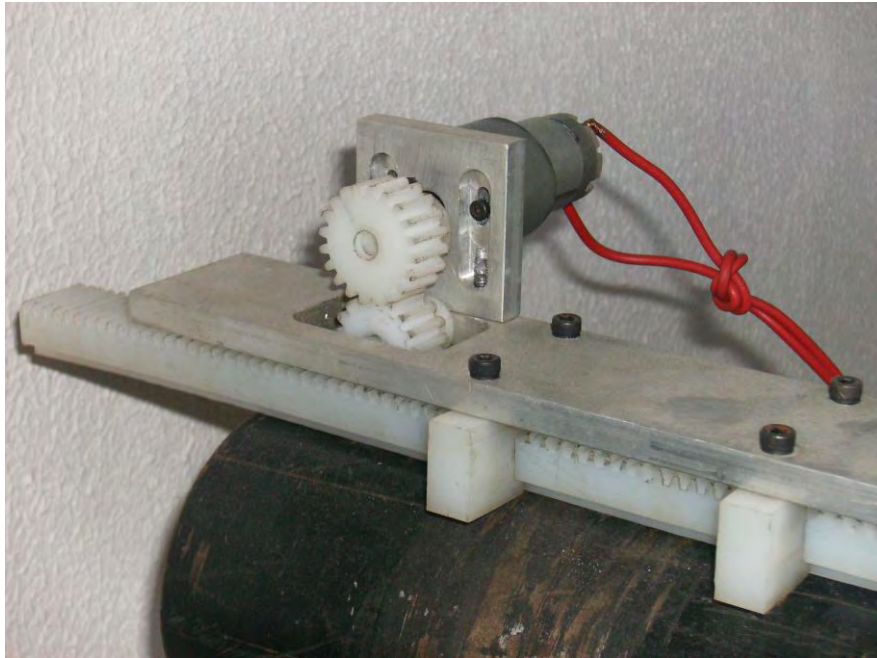


Figura 3.13 – Caso o motor 1 gire no sentido antihorário, o sistema irá avançar axialmente.

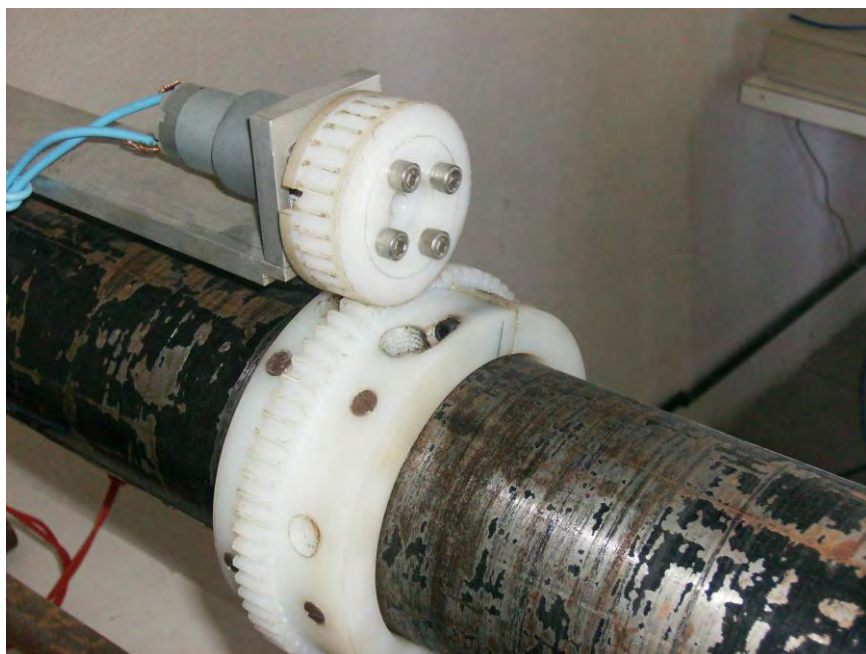


Figura 3.14 – Caso o motor 2 gire no sentido antihorário, o sistema fará a inspeção no sentido horário.

Assim sendo, o sistema de inspeção intercambiável se apresentou bastante robusto, ajustável e isento de deslizamentos, Fig. (3.15).

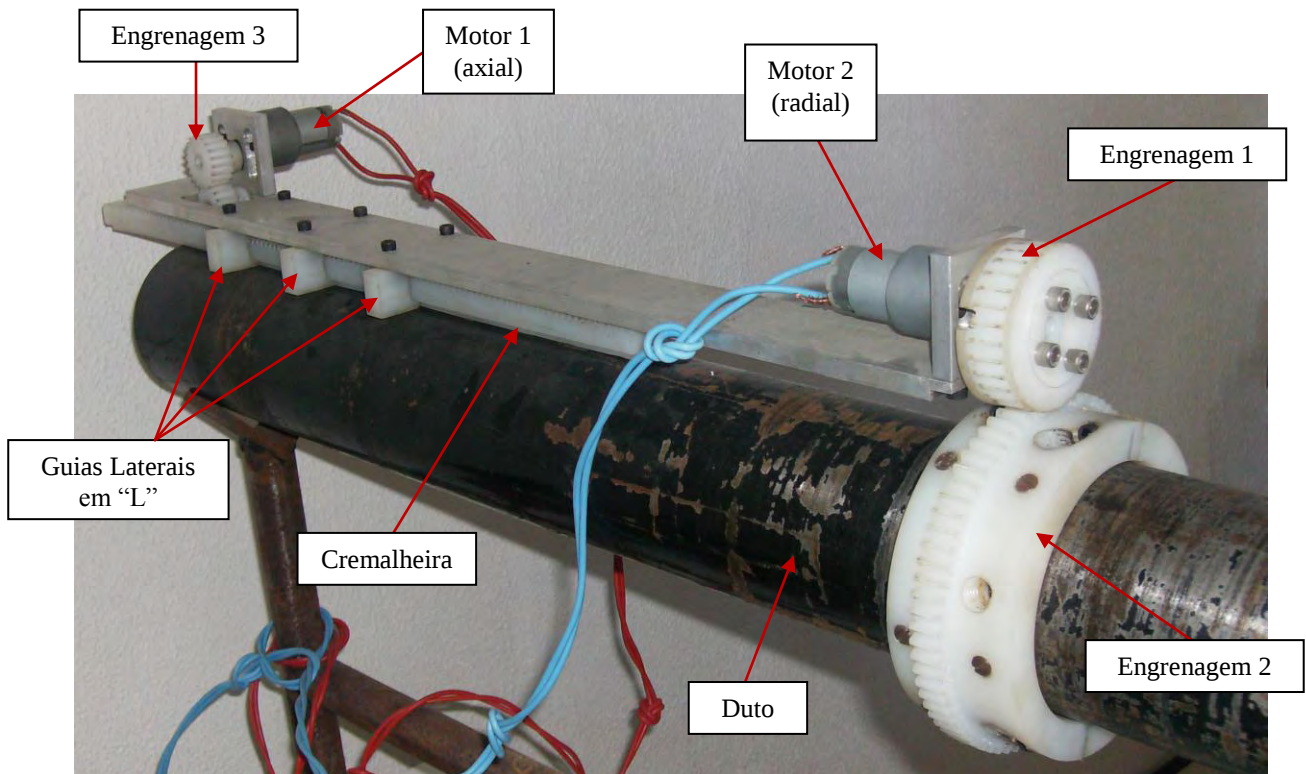


Figura 3.15 – Ilustração da parte mecânica do sistema montada, já com os motores CC.

Pode-se notar o espaço reservado na base, Fig. (3.16), que serve para alocar fonte(s) de alimentação do sistema, painel elétrico, interface para comunicação e outros componentes que se façam necessários, como um tanque de armazenamento do acoplante para o transdutor de ultrassom, no caso de ser utilizada esta técnica.

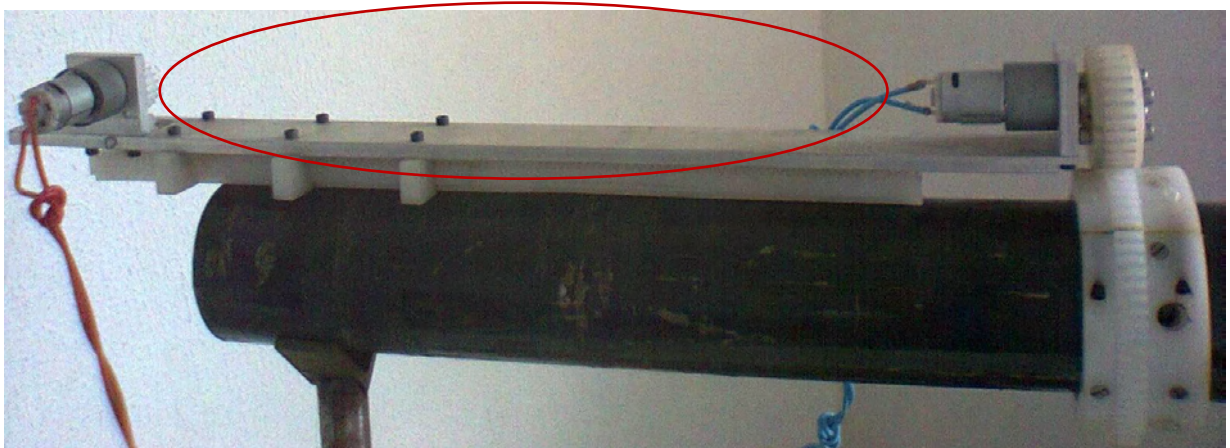


Figura 3.16 – Detalhe do espaço reservado na base.

Na Figura (3.17), tem-se uma ilustração realizada em software CAD deste espaço reservado sendo utilizado com os seguintes componentes:

- Bateria;
- Borne-relés;
- CLP S7-200;
- Reservatório para acoplante.

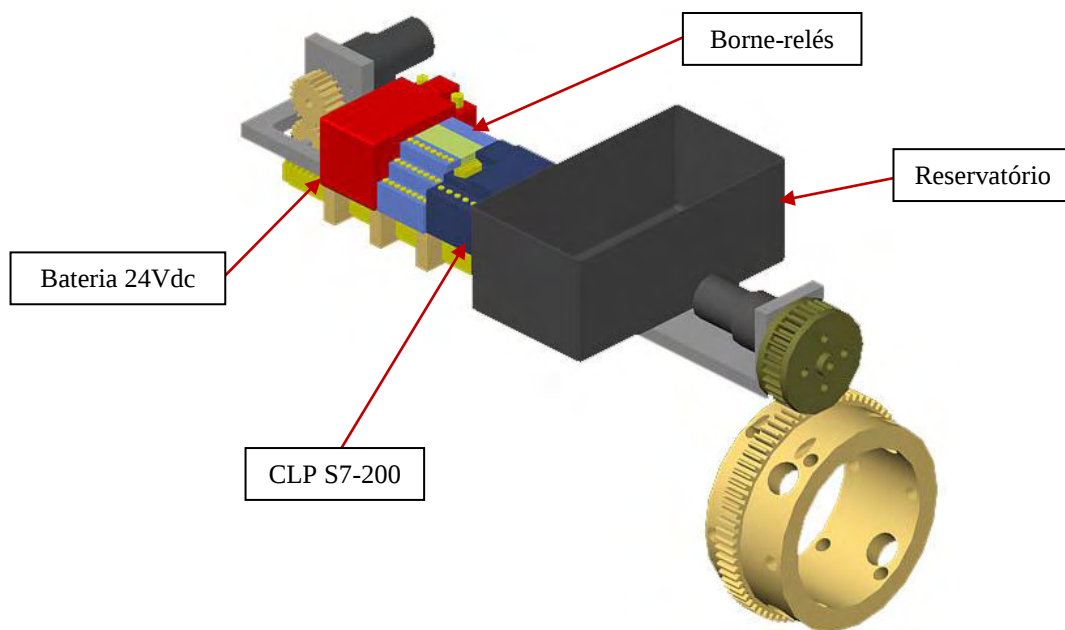


Figura 3.17 – Simulação em CAD.

3.4. Conclusão

O desenvolvimento da parte mecânica visou a simplicidade tanto quanto a construção/montagem do sistema quanto a parte de usinabilidades de suas peças. A escolha por utilizar engrenagens cilíndricas de dentes retos teve papel essencial no desenvolvimento do projeto, já que são elementos de fácil aplicabilidade e de rápida confecção, principalmente em se tratando do material adotado, o nylon. Para esta aplicação, “engrenagens de termoplásticos como o náilon, ..., além de serem capazes de transmitir cargas leves, podendo funcionar sem lubrificação”, (Shigley, 2004).

A rotação das engrenagens é realizada com o auxílio de um motor elétrico de corrente contínua, ideal para pequenas aplicações, apresentam um bom torque, rotação estável e baixo preço, i.e., para sistemas de pequeno porte, os motores elétricos de corrente contínua apresentam um excelente custo-benefício. Como forma de melhorar a performance do sistema, é preferível sempre adotar um motor de rotação mais alta que a necessária, pois com a utilização de um redutor mecânico de velocidade, pode-se baixar a velocidade tornando-a muito próxima da ideal para a aplicação e assim aumentar o torque na saída deste redutor, sendo assim, tem-se a rotação ideal e um torque superior ao necessário, o que reduz o consumo de corrente no motor e maximiza a estabilidade do movimento do sistema.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DA PARTE ELÉTRICA DO SISTEMA INTERCAMBIÁVEL PARA INSPEÇÃO EM DUTOS

4.1. Introdução

Motores elétricos devem ser acionados através de relés principais (contactores ou contadores), a comutação destes relés pode ser realizado de diversas forma, dentre elas, o comando microprocessado, através de: microcontroladores (programados em linguagem C++), controladores lógicos programáveis (CLP), entre outras. A adoção de um CLP para o controle deste sistema é de longe uma das formas mais recomendáveis, devido a flexibilidade e funções intrínsecas deste equipamento, o que torna a organização, configuração e programação do sistema bastante simplificada, tanto na parte de *software* como de *hardware*.

Um CLP possui funções lógicas (eletrônica digital), temporizadores, contadores, comparadores, comandos virtuais, e etc em seu encapsulamento, o que quase sempre dispensa a aquisição e implementação de componentes e ferramentas extras ao *hardware*. Tudo isto ainda está aliado ao *software* de programação com uma interface amigável e ao padrão de comunicação totalmente disponível em qualquer PC.

Um CLP pode trabalhar de forma independente, conectado a outros CLPs, ou ainda conectado a uma rede de comunicação, onde podem estar ligados: CLPs, PCs, IHMs, drivers, atuadores, sensores e outros dispositivos. Muitos CLPs permitem a comunicação com Sistemas Supervisórios, o que permite uma Interface Homem-Máquina (IHM) através de um PC durante a execução do processo, isto flexibiliza ainda mais a operação do processo, (SENAI, 2006).

Os Supervisórios são programa dedicados a facilitar a operação, acompanhamento e registro dos dados do processo, onde são confeccionadas representações gráficas (desenhos) das plantas do processo, permitindo navegar entre as telas (processos), realizando acionamentos: ligando e desligando

atuadores (motores, válvulas, solenóides, ...), emitindo sinais ópticos e sonoros, gerando gráficos e arquivos com históricos de todos os dados do sistema.

Para uma melhor compreensão do sistema desenvolvido neste trabalho, um mapa de conceitos foi construído, Fig. (4.1), apresentando as opções (caixas de texto: brancas e cinzas) e escolhas (caixas de texto cinzas) adotadas. Conexões entre os itens foram feitas com setas e textos, os textos informam como estes itens se conectam. Por exemplo:

a) os sistemas podem ser de malha aberta ou malha fechada, e em se tratando de sistemas eletromecânicos, ambos podem ser controlados por quadro de comando, microcontroladores, CLP e e outros. Os microntroladores são programados com uma liguagem conhecida como C++. Os CLPs podem acionar vários equipamentos, como: motores (através de relés), drivers, solenóides e etc;

a1) um acionamento de motor pode ser feito de várias formas, caso seja com uma botoeira e o motor se mantenha girando enquanto a botoeira esteja acionada, caracterizando um sistema em malha aberta, pois depende de um operador para isto. Caso o motor seja acionado ou desacionado por tempos pré-estabelecidos, desde que a botoeira seja acionada, caracteriza uma malha fechada, pois o liga-desliga independe do operador;

b) todo o sistema foi montado de acordo com as escolhas, e após isto é possível realizar os testes para o levantamento de dados para o modelamento matemático do sistema, do tipo caixa preta. Com o modelo matemático em mãos é possível realizar modificações de componentes e/ou inserir um controlador para que o mesmo atenda às especificações do projeto inicial, pois alguns aspectos construtivos muitas vezes fogem à alçada, por exemplo: uma relação de transmissão de valor igual à 1,3 , é possível manter esta relação com engrenagens cujo número de dentes sejam múltiplos de 10 e 13, mas uma relação de transmissão na ordem 1,2, é possível mantê-la com múltiplos de 5 e 6 dentes, tornando a gama de opções de engrenagens maior. Então com estas pequenas adequações no próprio cálculo realizado para o controlador, aplicando-as e testando-as sucessivamente até que se atenda às especificações do projeto, dentro de um campo de tolerância para a resposta final do sistema obviamente.

Desta forma, pode-se fazer o ajuste da redução de 1,3 para 1,2 , e caso o sistema não tenha um valor de resposta satisfatório, basta aplicar um controlador na parte elétrica para atingir-se o objetivo final. Para isto, deve-se compreender que todos os sistemas (elétricos, mecânicos, orgânicos, e etc.) podem ser compreendidos como um sistema de controle, o qual atenderá pelas especificações e características intrínsecas de sistemas em malha aberta ou fechada. A teoria aplicada de sistemas de controle torna mais simples a compreensão do funcionamento geral de um conjunto e de suas partes.

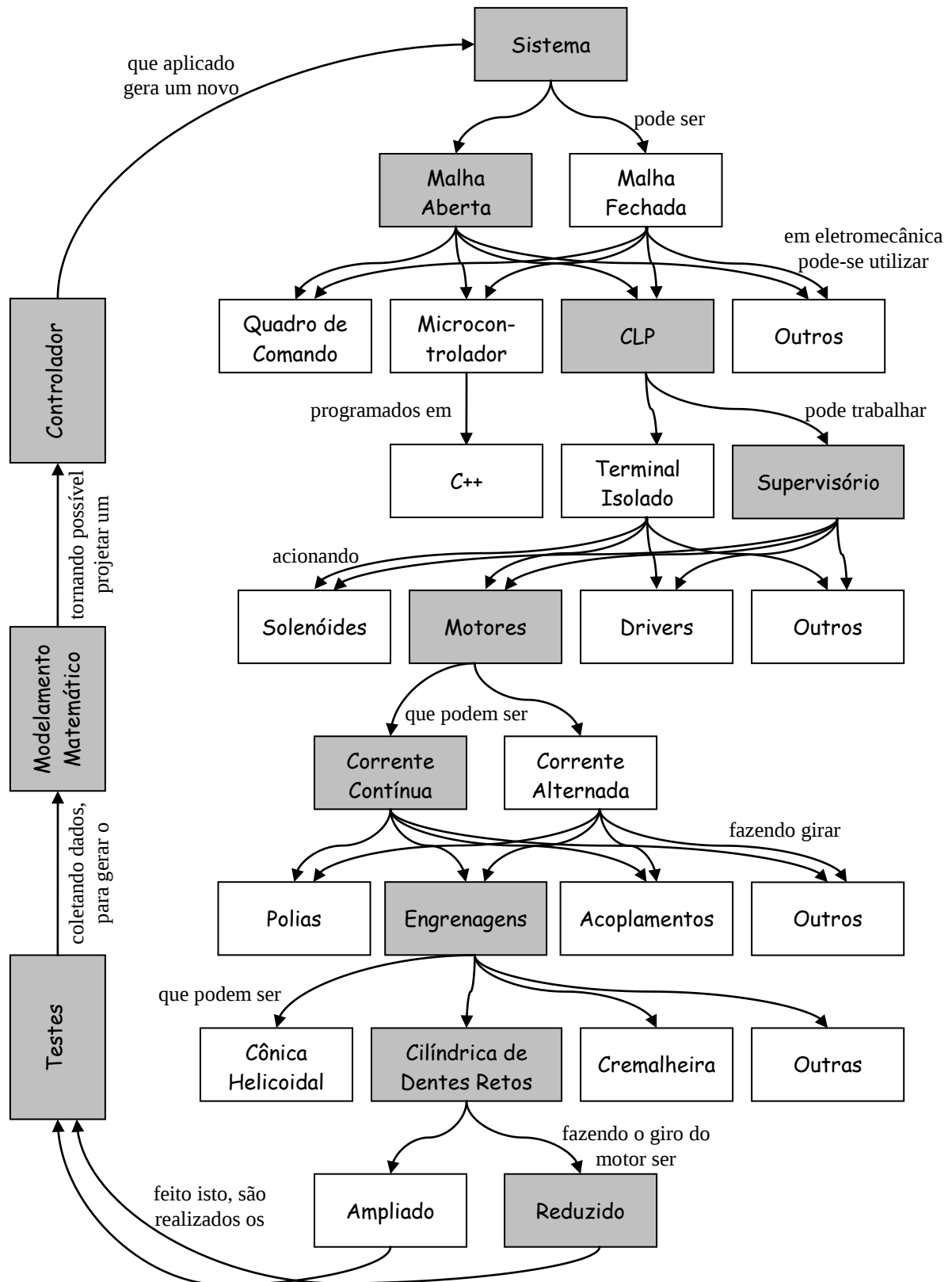


Figura 4.1 – Mapa de conceitos do sistema desenvolvido.

4.2. Sistemas de Controle

A regulação e o controle automático de sistemas se destaca cada vez mais nos ramos das engenharias, como os sistemas de pilotagem (navios, aviões, mísseis, veículos espaciais, ...) e o funcionamento de processos industriais típicos (produção de energia, produtos químicos, alimentícios, conforto térmico, ...), que passaram a se tornar fundamentais nos dias de hoje. Alguns processos são inconcebíveis sem a utilização de um controle automático, por exemplo: em operações industriais como pressão, vazão, temperatura e níveis em geral, em operações de navegação como velocidade do ar (ou da água), posição, temperatura, pressão e altitude.

O homem sempre tentou controlar os fenômenos naturais em seu próprio proveito, a primeira tentativa historicamente registrada é um dos primeiros trabalhos efetuados do investigador James Watt na área de controle automático, no qual construiu um regulador centrífugo para efetuar o controle de velocidade de uma máquina a vapor na Inglaterra, em pleno século XVIII. Na Figura (4.2) pode-se observar o esquema de um regulador de velocidade de um motor ciclo Diesel, baseado neste princípio inventado por James Watt, e ao lado, uma foto de um sistema similar aberto a visitação em uma destilaria local (no município de Alagoa Grande-PB).

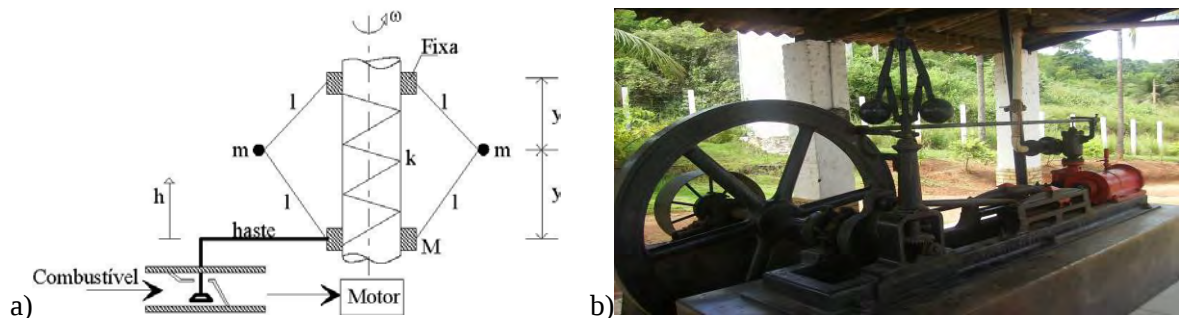


Figura 4.2 – a) Esquema do regulador de James Watt; b) Foto do regulador utilizado em destilaria local.

Na Figura (4.2a), o eixo do motor se acopla a um sistema com duas massas (m) que giram com a mesma velocidade de rotação (ω). Quando o motor aumenta de rotação, as massas tendem a se afastar devido à ação centrífuga, diminuindo o valor da distância (y), elevando a haste ligada à válvula de passagem do combustível. Deste modo, o fluxo de combustível diminuirá em função da restrição causada pela haste, o que fará baixar a velocidade de rotação do motor. Desta forma, obtêm-se o seguinte ciclo: se o motor girar mais lento, as massas também giram mais lentamente, aumentando a passagem de combustível, então o motor irá girar mais rápido, as massas também giram mais rapidamente, diminuindo a passagem de combustível, e assim sucessivamente até a estabilização do sistema, com um ponto de equilíbrio equivalente às massas utilizadas. Enfim, de acordo com a rotação desejada para este motor, serão escolhidas as massas a serem utilizadas.

4.2.1. Controle em Malha Aberta

Nestes tipos de sistemas de controle, a saída não exercerá ação no sinal de controle. Deste modo, o sinal de saída do processo não é medido e nem comparado com um sinal de referência. A Figura (4.3) representa um sistema de controle em malha aberta (SCMA) em diagrama de blocos.

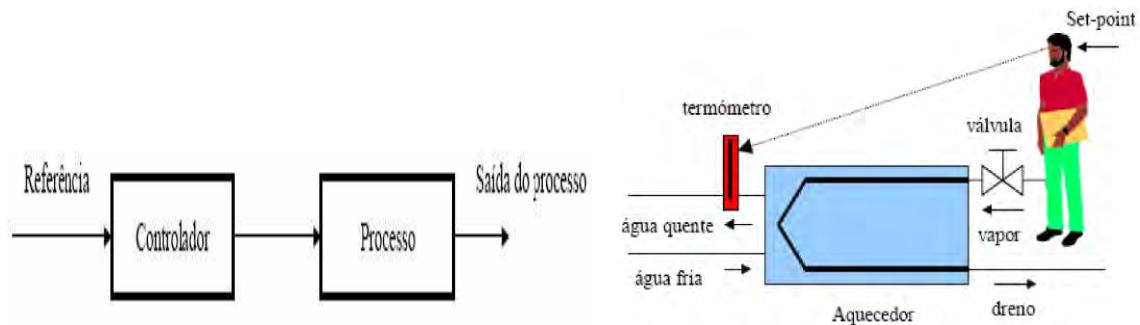


Figura 4.3 – a) SCMA representado em diagrama de blocos; b) Exemplo de sistema térmico de malha aberta.

Como se pode observar na Fig. (4.3), neste tipo de controle, o sinal de saída não é comparado com um valor de referência. Neste caso, o operador do sistema (aquecedor de água) pode verificar a temperatura de saída da água em um termômetro e fazer um ajuste na entrada da água de acordo o valor medido na saída, e assim o fará durante todo o funcionamento do processo, ou seja, caso a água entre muito rápido, o aquecedor não poderá elevar bastante a sua temperatura, e caso a água entre lentamente, a água poderá ser deveras aquecida.

Assim o operador poderá regular a abertura da válvula até que a saída se mantenha o mais próximo do desejado. No entanto, se ao longo do processo, houver variações de temperatura no aquecedor (entrada de maior ou menor de combustível, por exemplo), na temperatura da água que entra ou qualquer outro tipo de perturbação no sistema, a temperatura da água que sai será alterada e só será corrigida apenas quando o operador visualizar a mudança da temperatura de saída e realizar o reajuste necessário.

4.2.2. Controle em Malha Fechada

“No sistema clássico de controle em malha fechada, que na sua forma mais usual é constituído por componentes contínuos ou analógicos, o sinal de saída possui um efeito direto na ação de controle, pelo que poderemos designá-los por sistemas de controle com realimentação ou retroação ("feedback"). Neste tipo de sistemas, o sinal de erro que corresponde à diferença entre os valores de referência e de realimentação (que pode ser o sinal de saída ou uma função do sinal de saída), é introduzido no controlador de modo a reduzir o erro e a manter a saída do sistema num determinado valor, pretendido pelo operador”, (Pinto, 2005).

O termo "MALHA FECHADA" indica a existência de uma realimentação com o objetivo de minimizar o erro, mantendo assim saída do sistema o mais próximo do valor desejado. A Figura (4.4) demonstra um típico sistema de controle em malha fechada (SCMF), representado em diagrama de blocos.

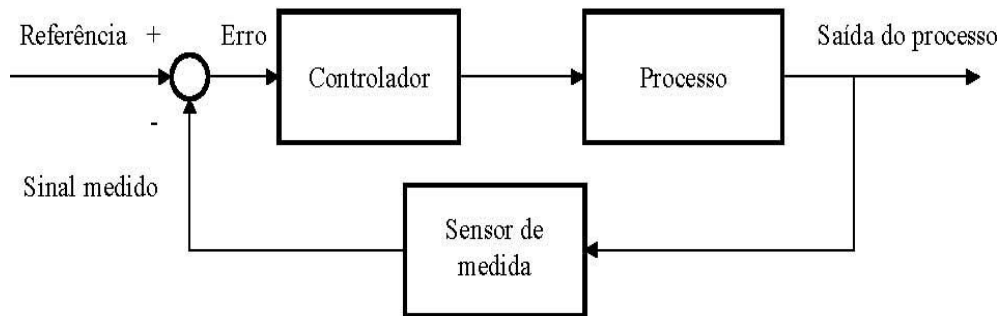


Figura 4.4 – SCMF representado em diagrama de blocos.

Considerando que o sistema ilustrado na Fig. (4.4) seja um sistema térmico, no qual um operador desempenha a função de controlador do sistema. O operador pretende manter constante a temperatura da água que sai do trocador de calor. Na saída existe um termômetro (sensor de medição) que informa ao operador a temperatura de saída da água. Para que o sistema seja considerado um SCMF, é necessária a substituição do controle efetuado pelo operador por um dispositivo que receba a informação de saída e faça a correção da abertura da válvula na entrada, conforme demonstrado na Fig. (4.5).

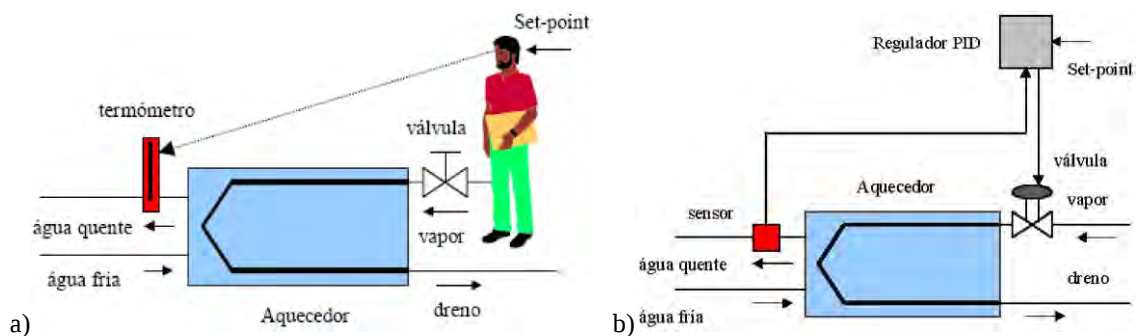


Figura 4.5 – a) Sistema de controle com operador, SCMA; b) SCMF.

O sistema apresentado na Fig. (4.5) recebeu os dispositivos da Fig. (4.6) para realizar o controle automático de saída de acordo com um valor pré-estabelecido pelo operador no controlador PID. Caso haja qualquer perturbação no sistema, a temperatura da água que sai será alterada, a menor alteração será detectada imediatamente pelo transdutor de temperatura, que envia um “novo” sinal ao controlador digital PID, que envia os “novos” valores de correção ao conversor I-P (converte um sinal de corrente em sinal de pressão), e assim com o “novo” valor de pressão de comando a abertura da válvula será regulada, minimizando a diferença entre valor desejado e valor obtido. A função do

operador fica reduzida apenas à informar ao controlador do valor desejado da temperatura de saída da água, e assim o controlador o fará até que uma nova temperatura de saída seja informada.

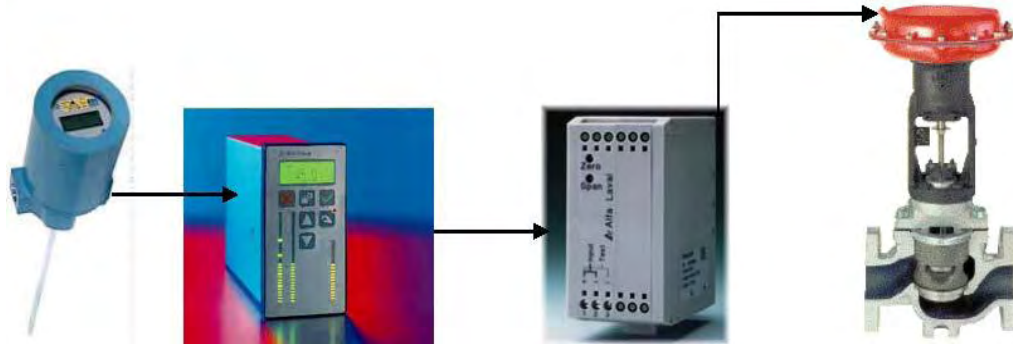


Figura 4.6 – Exemplo de uma sequência de dispositivos para regulação de temperatura: transdutor de temperatura -> controlador digital PID -> conversor corrente-pressão (I-P) -> válvula de controle.

4.2.3. Comparação entre SCMA e SCMF

Os sistemas de controle em malha fechada possuem uma vantagem em relação aos sistemas de controle em malha aberta, devido à sua realimentação que torna a resposta do sistema mais próxima da saída desejada, o que relativamente minimiza o efeito das perturbações externas e a variações internas características do sistema. É possível utilizar componentes (ou pequenos sistemas) simples para melhorar a precisão da resposta. “Do ponto de vista da estabilidade, os sistemas de controle em malha aberta são mais robustos, uma vez que a estabilidade não constitui um problema significativo. Nos sistemas de controle em malha fechada, a estabilidade constitui um problema de primordial importância, visto que o sistema pode tender a sobrepor erros, produzindo oscilações de amplitude constante ou variável”, (Pinto, 2005).

Em linhas gerais, sistemas em que são conhecidas previamente as variáveis de entrada, e nos quais não haja perturbações muito significativas, é aconselhável a utilização do controle em malha aberta. Porém, em sistemas que estejam sujeitos a perturbações imprevisíveis e/ou variações não previstas nos componentes do sistema, é aconselhável utilizar o controle em malha fechada.

Sempre que possível, é aconselhável comparar as respostas do sistema em malha aberta e em malha fechada, e verificado o “custo-benefício” de cada uma. Para sistemas em malha fechada, muitas vezes, se faz necessário o acréscimo de um controlador “externo ao sistema”, ou seja, a instalação de um novo controlador ao sistema já existente, o que tende a maximizar a resposta obtida, diminuindo o erro em regime permanente.

4.2.4. Controle Digital

O avanço da tecnologia dos microprocessadores possibilitou que o desenvolvimento de um regulador clássico possa ser substituído por controladores ou reguladores digitais, baseados em microprocessador. As diferenças básicas entre um sistema analógico e um digital se deve ao fato de que o controlador digital funciona com sinais discretos (amostras temporais do sinal contínuo captados pelo transdutor de medição), ao invés dos sinais contínuos utilizados no controlador analógico.

O sinal $\hat{u}(t)$, ilustrado na Fig. (4.7), poderá ser captado de forma contínua e enviado ao controlador para que este realize a sua ação. O sinal $\hat{u}(t)$ também pode ser captado de forma discretizada no tempo, e sendo assim, o sinal captado será idêntico ao $u(k)$. De forma análoga, temos o sinal $\hat{y}(t)$, que pode ser amostrado continuamente ou na forma de $y(k)$.

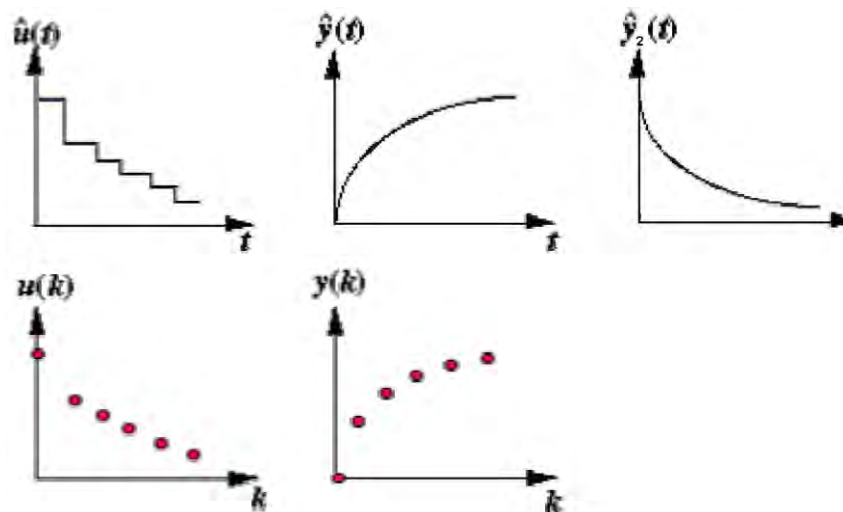


Figura 4.7– Evolução temporal de alguns sinais em malhas de controle digital.

Na Figura (4.7), pode-se notar a diferença nos sinais obtidos com instrumentos analógicos (com amostragem contínua) e digitais (com amostragem discretizada). O acesso à informações do sistema e a atualização das ações de controle para a correção do sinal de saída dependem da complexidade do sistema e da rapidez de processamento dos controladores.

Os sinais amostrados na forma discretizada no tempo, devem obedecer alguns critérios para que não passem informações errôneas ao operador ou controlador. Pois, caso o intervalo na obtenção dos dados não seja adequado, pode-se interpretar um sinal equivocadamente, exemplo: o sinal $\hat{u}(t)$ discretizado no tempo, $u(k)$, pode ser interpretado como se fosse o sinal $\hat{y}_2(t)$ discretizado, ilustrados na Fig. (4.7). Quanto menor o intervalo de tempo para amostragem, melhor a caracterização do

sistema, porém uma placa com alto valor de amostragem pode não trabalhar perfeitamente, pois antes mesmo de se obter a resposta mecânica desejada, um novo valor já foi processado e enviado à saída.

Logo, tecnologias em aquisição de dados estão sendo largamente utilizadas, a amostragem discretizada deve permitir uma boa relação entre a aquisição, processamento e as respostas dos controladores aos dados coletados, ou seja, o intervalo entre as medições deve ser proporcional ao intervalo de processamento e atualização dos parâmetros do controlador para a possível correção do sinal de saída.

Conforme mencionado anteriormente, existem várias formas de se controlar um sistema, e sendo um sistema eletromecânico, o mais comum é que este controle seja do tipo microprocessado, ou seja, através de um microcontrolador ou de um controlador lógico programável. O controle mais acessível economicamente falando é o microcontrolador, do tipo 16F, 18F, SMD, DSP ou DSPIC.

A utilização de um sistema com um microcontrolador se torna vantajoso devido à ótima relação de custo-benefício, pois o custo de um microprocessador é em torno de R\$20,00 e o CLP adotado para os testes do sistema é em torno de R\$1.800,00, ambos em valores atuais.

Porém, a utilização do sistema com base no microcontrolador ficará para estudos futuros. O mais versátil para testes, com programações e reprogramações mais rápidas é o CLP, pois não se faz necessário retirar o componente (microcontrolador) do circuito eletrônico para fazê-las. Logo, será necessário uma introdução sobre este equipamento conhecido como CLP, que facilitará todo o processo de desenvolvimento do sistema nesta fase de testes.

4.2. Controlador Lógico Programável (CLP)

“Ao longo da década de 60, na indústria automobilística, o controle das linhas de produção era totalmente baseado em centenas de relés e sistemas eletromecânicos complexos que ligados por fios formavam um complicado sistema. As mudanças anuais dos modelos dos automóveis exigiam substituições constantes dos sistemas, que gastavam muita mão-de-obra e tempo, e estas mudanças literalmente sucateavam grandes volumes de materiais elétricos. Os painéis eram pesados, difíceis de instalar, de modificar e de diagnosticar falhas. O hardware baseado em relés, a fiação e a documentação fornecida eram extremamente caras”, (SENAI, 2006).

Por volta de 1968, um grupo de engenheiros da Empresa Bedford Associates, Massachusetts, desenvolveu um dispositivo chamado Controlador Digital Modular (MODICON) para solucionar os problemas inerentes aos painéis de relés, para a principal empresa automobilística americana.

O primeiro CLP chamava-se 084, por ser o projeto de número 84 da Bedford e baseado nas idéias do engenheiro Richard Morley, era constituído basicamente por três partes montadas em dois

trilhos verticais. Os pontos de entrada e saída ficavam na parte superior do equipamento, podendo se montar dois *racks* e capacidade total de 256 pontos, todos de fácil acesso para manutenção.

Duas características no equipamento foram cruciais para o interesse dos potenciais clientes:

- Programação Ladder – a lógica Ladder foi o ponto principal para a rápida aceitação do CLP, pois ainda hoje “agrada à gregos e troianos”, tanto técnicos eletricitas como engenheiros eletricitas. Utilizando uma comparação bastante grosseira, a lógica Ladder é simplesmente uma rotação em 90° de um diagrama elétrico (comando), que todos os profissionais da área já utilizavam, excluindo totalmente o problema da aceitação de “uma nova linguagem” em substituição à já adotada há anos;
- Robustez – o 084 foi construído para suportar o agressivo ambiente de chão-de-fábrica: vibrações, oscilações de energia elétrica, balanceamento de neutro, poeira e etc. Para confirmar sua durabilidade, peças sobressalentes e suporte técnico foram mantidos durante 20 anos.

“Blocos temporizadores, contadores e de cálculos, que tratam-se de funções básicas dos controladores atuais, foram adicionados ao controlador 084, expandindo a sua funcionalidade. Uma inovação importante foi a utilização de cartuchos magnéticos para a gravação, cópia e carregamento das aplicações”, SENAI (2006).

A primeira demonstração do 084 ocorreu em novembro de 1969 e instalado em março de 1970, na General Motors situada em Ypsilanti, Michigan. No Brasil, a primeira empresa a utilizar o 084 foi a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD).

4.2.1. O que é um CLP?

Em 1978, após quatro anos de trabalho, um comitê composto por representantes dos fabricantes de controladores lógicos programáveis, o NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) definiu um padrão. Os padrões do NEMA definem que “um controlador lógico programável é um aparelho eletrônico digital que usa uma memória programável para armazenamento interno de instruções para implementar funções específicas tais como lógica, sequenciamento, analógico ou digital, de vários tipos de máquinas ou processos”.

Independente da classificação do porte: mini, pequeno, médio ou grande, um controlador lógico programável possui basicamente cinco elementos básicos:

- Processador;
- Memória;
- Entradas / Saídas (I/O);
- Fonte de alimentação;
- Dispositivos de programação.

Os CLP's de miniporte são normalmente chamados pelos fabricantes de relés programáveis, por sua capacidade ser reduzida, apesar de que são capazes de realizar muitas operações. Os CLP podem ser classificados por portes: diferenciados pelo número de entradas/saídas, tipos e quantidades de funções, além do tamanho da memória.

O processador, memória e fonte de alimentação juntos formam a chamada unidade central de processamento (CPU), o que usando de uma analogia com o corpo humano, seria o cérebro/coração do sistema. O *hardware* do CLP é muito similar ao de um computador, porém os *softwares* utilizam linguagens de programação diferentes. Assim, pode-se dizer que o CLP é um PC, com diferentes dispositivos de entrada e saída: os dispositivos de entrada se comunicam com cartões que coletam os dados, são processados na CPU e enviadas as “respostas” para os cartões conectados aos dispositivos de saída, vide Fig. (4.8).

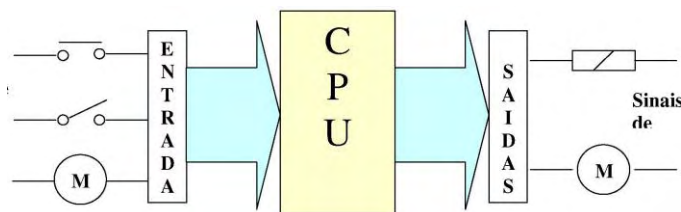


Figura 4.8 – Ilustração básica de como funciona um CLP.

4.2.2. Princípios de operação de um CLP

Ao inicializar um CLP, este realiza uma rotina de inicialização gravada em seu sistema operacional. Essa rotina realiza as seguintes tarefas:

- Limpeza das memórias-imagem;
- Teste da memória RAM;
- Teste de executabilidade do programa.

Após esta execução, a CPU passa a trabalhar continuamente com o programa gravado, em um ciclo que consiste basicamente em 3 passos:

Passo 1 – verifica os estados das entradas: o CLP verifica o estado de cada entrada para determinar se está ligada ou desligada (entrada digital), ou qual o nível de tensão ou corrente (entrada analógica). Após isto, o CLP registra os valores nas correspondentes posições de memória (imagem das entradas) para serem utilizados no próximo passo.

Passo 2 – executa o programa: de acordo com a imagem das entradas feita no primeiro passo, o CLP irá executar as instruções linha por linha de sua programação, até a última. Com base nos resultados do programa, o CLP atualiza a imagem das saídas e a imagem dos dados virtuais (memórias/*flags*, temporizadores, contadores e etc), para usá-los no próximo passo.

Passo 3 – atualizar os estados das saídas: finalmente o CLP atualiza as saídas. E após esta etapa, o CLP irá voltar ao primeiro passo, realizando este *loop* infinito.

4.2.3. Linguagens de programação

Existem cinco linguagens padronizadas para a programação de um CLP, sendo duas baseadas em texto estruturado, duas baseadas em gráfico e uma baseada em fluxograma:

- Instruction List (IL) – linguagem do tipo assembler para pequenas aplicações, baseada no *German Anweisungsliste*, ou AWL;
- Structured Text (ST) – linguagem de texto com sintaxe de alto nível, se assemelha ao Basic;
- Function Block Diagram (FBD) – linguagem gráfica baseada em blocos lógicos da eletrônica digital, mais popular na Europa;
- Ladder Diagram (LD) – linguagem gráfica originária dos Estados Unidos, e é a mais usada em todo o mundo, com raras exceções;
- (SFC) – é uma ferramenta de linguagem gráfica, tipo fluxograma, baseada no Grafset (IEC 848), pode-se dizer que é a mais nova moda em termos de linguagem de programação para CLPs por não exigir formação técnica na área de eletricidade para desenvolver o programa, basta o programador entender da sequência do processo (fluxograma).

Os usuários tem várias razões para usarem o CLP, podem usar para aplicações das mais diferentes possíveis: fabricantes, modelos, processos, controles, monitoramento, e etc. Um programa pode ser convertido para outra linguagem, ou seja, o mesmo programa é executado em outro modelo de CLP e até de outro fabricante, que a aplicação será mantida. O maior custo benefício advém em sistemas de grande porte, e que quando da mudança de processos, a necessidade se faz a partir de um simples *download* do programa no equipamento, ou ainda, é possível ter dois ou mais programas armazenados no CLP e que de acordo com a posição de uma chave no painel, será “rodado” o programa referente ao processo selecionado.

Com a possibilidade de receber as informações e realizar comandos na planta, Fig. (4.9), em tempo real, na tela de um PC que pode, ou não, estar na própria sala do ambiente de trabalho. A utilização dos sistemas supervisórios é ideal para esta situação, além de reduzir custos e tempos na criação dos infinitos relatórios e históricos do processo de produção, pois basicamente sem nenhum custo significativo, frente aos benefícios que serão adquiridos, os supervisórios se tornam uma ferramenta poderosa em um mundo competitivo.

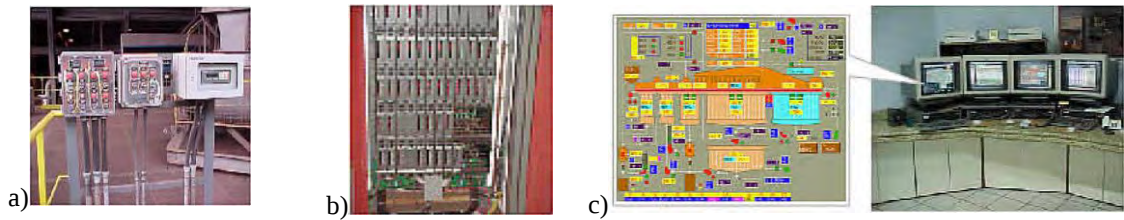


Figura 4.9 – a) Equipamentos em campo; b) Cubículo do CLP; c) Supervisório na sala de controle

4.3. Sistema Supervisório

“Os Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD) se tornaram mais comuns e acessíveis devido à evolução dos microprocessadores, que por sua vez viabilizaram também a criação dos computadores pessoais popularizados no início da década de 80 e, também, o aparecimento das estações de trabalho, que são computadores com alta capacidade de computação e grande capacidade de processamento gráfico. Produziu-se, então, uma grande transformação na metodologia de supervisão, comando e controle das indústrias. A popularização dos sistemas de redes de computadores contribuiu também de forma significativa. Nestes sistemas, os painéis mímicos foram abolidos, sendo substituídos, com grandes vantagens, por monitores coloridos com capacidade gráfica, como os atualmente existentes nos computadores pessoais”, (Pinto, 2005).

O termo SDCCD tem caído em desuso devido à evolução da capacidade e a queda do preço dos computadores pessoais, assim as estações dedicadas foram sendo substituídas por PC's. A compatibilidade entre os sistemas operacionais com os softwares de supervisão tornou viável esta substituição. Sendo assim, a denominação Sistema Supervisório torna-se mais ampla.

4.3.1. SDCCD's convencionais

Estes sistemas eram utilizados com os primeiros computadores pessoais, nos primórdios dos processadores 8086, que não possuíam capacidade de processamento gráfico e eram equipados com monitores monocromáticos (visualizando apenas caracteres alfanuméricos). Para melhorar a interpretação dos dados do processo, os famosos painéis sinópticos eram interligados com os computadores. Segundo SENAI (2006), apenas com o surgimento das estações de trabalho, anos 1980, houve então o lançamento dos SDCCDs de diversos fabricantes e permitindo a visualização do processo nas telas dos monitores coloridos.

Um computador central e as estações de trabalho, Fig. (4.10), normalmente só eram ligados à rede em instalações de grande porte para efetuarem operações diversas: controle de qualidade, desempenho, controle de produção, e até tarefas de CAD, CAM e CAE.

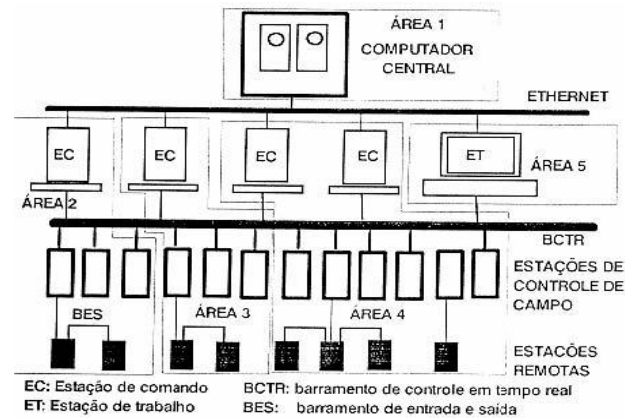


Figura 4.10 – Configuração antiga de um sistema geral de controle distribuído.

Sobre as denominações da Fig. (4.10), a estrutura base é referência até os dias de hoje e pode-se descrevê-las como:

- **ESTAÇÕES DE TRABALHO (ET)** – computadores de pequeno porte, muito usados para operações de CAD-CAM;
- **ESTAÇÕES DE COMANDO (EC)** – computadores de pequeno porte, muito usados para acompanhamento por parte dos operadores e comandos básicos do processo;
- **ESTAÇÕES DE APLICAÇÃO (EA)** – computadores de médio porte, usados para comandos diversos sobre o processo, geração de relatórios e armazenamento de históricos;
- **ESTAÇÕES DE CONTROLE DE CAMPO (ECC)** – computadores de médio porte, usados para monitoramento do processo e aquisição de dados;
- **ESTAÇÕES DE CONTROLE AVANÇADO (ECA)** – computadores de grande porte, usados para monitoramento das demais estações e comandos avançados do processo, geração de relatórios e armazenamento de históricos;
- **ESTAÇÕES REMOTAS (ER)** – computadores de pequeno à médio porte, muito usados para acompanhamento, aquisição de dados, comandos básicos do processo e interligação com as ECs e ECCs, exemplificado na Figura 4.11.

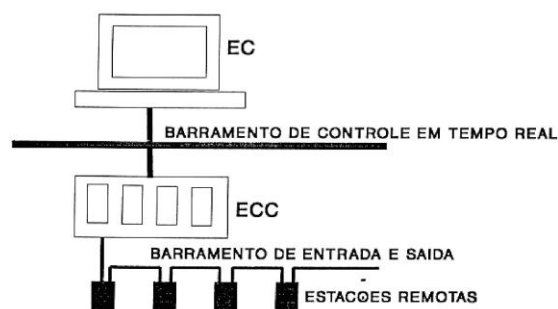


Figura 4.11 – Configuração de uma interligação entre EC, ECCs e ERs.

“A maioria desses conceitos estão presentes nos sistemas supervisórios modernos. A grande diferença é que os SDCDs eram sistemas fechados, havendo dificuldades no uso de equipamentos de diferentes marcas. Os sistemas supervisórios modernos são abertos com diversos fabricantes, tanto de hardware como de software, compartilhando a mesma rede de computadores”, (Pinto, 2005).

4.3.2. Sistemas Supervisórios Modernos

“Pode-se definir os sistemas supervisórios como conjuntos de equipamentos usados para controlar e comandar as operações de instalações industriais, usinas e concessionárias”, (Pinto, 2005). Nos sistemas modernos, a supervisão e os comandos do processo podem ser realizados de qualquer computador ligado à rede. Hoje em dia, diversas plantas/processos possuem tais sistemas empregados, citando-se concessionárias de energia, água, gás, sistemas de esgoto urbano e indústrias de todo tipo, porte e produto.

Com relação aos primeiros supervisórios utilizados nas estações de trabalho, os sistemas operacionais predominantes eram o UNIX e o OS2/OS2WARP. Hoje com a difusão do Windows, uma parcela dos supervisórios desenvolvidos trabalham sobre esta plataforma, mas com certa relutância por parte dos grandes desenvolvedores.

4.3.2.1. Configurações Gerais dos Sistemas Supervisórios

Sistemas supervisórios podem ser desenvolvidos das mais diversas formas e configurações. Em casos isolados, as estações trabalham sozinhas. Porém, na maioria dos casos, as estações trabalham interligadas em rede, geralmente:

- Estação de Comando Avançado: apresenta dados, históricos e relatórios do processo para acompanhamento do processo total, e em casos de emergência pode intervir no processo realizando comandos e neutralizando uma ECC ou ER com problemas;
- Estação de Comando de Campo: apresenta dados, históricos e relatórios do processo para acompanhamento do processo em dois ou mais setores, e em casos de emergência pode intervir no processo realizando comandos e neutralizando uma ER com problemas;
- Estação Remota: apresenta dados, históricos e relatórios do processo para acompanhamento do processo do setor onde está instalado, realiza comandos neste setor, podendo ser desativada por outra ER ou ECC, em caso de falha/travamento da estação (PC).

Na Figura (4.12), um exemplo da tela do sistema supervisório disponível em uma ECA. Em geral, um sistema de supervisão e controle obedece a seguinte classificação de seus equipamentos:

- Computadores;

- Sistemas de redes locais;
- Sistemas de aquisição de dados;
- Controladores lógicos programáveis;
- Interfaces.

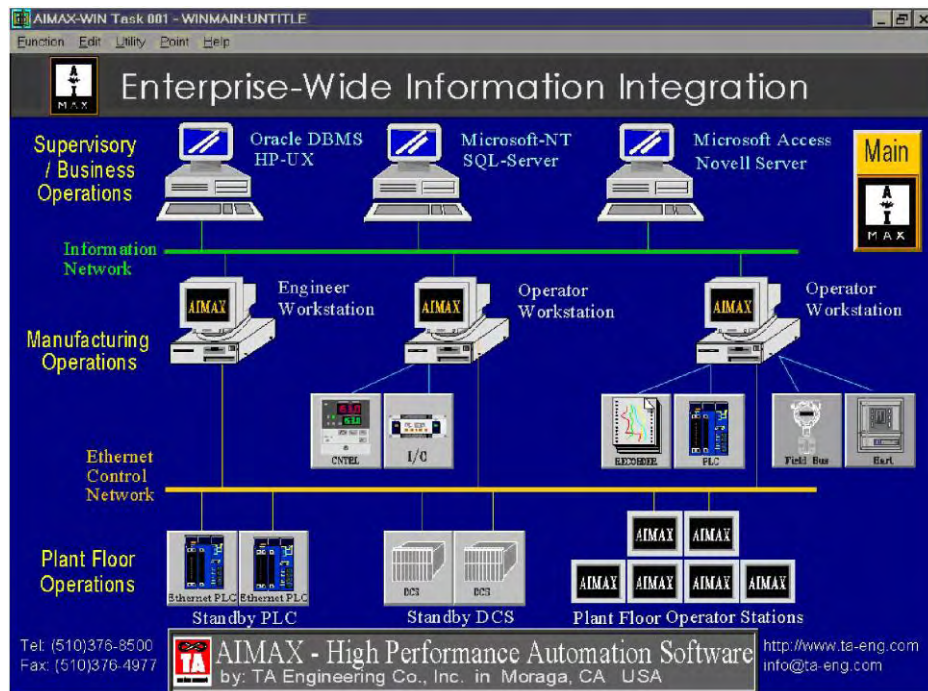


Figura 4.12 – Tela principal de um sistema supervisório, onde o operador clica com o mouse no equipamento escolhido e abre-se uma tela com os dados/comandos existentes naquele equipamento. Desenvolvedor: AIMAX.

4.3.3. Equipamentos Utilizados em Sistemas Supervisórios Modernos

4.3.3.1. Computadores

Os sistemas supervisórios iniciaram suas aplicações “mais avançadas” em computadores do tipo IBM-PC, PowerPC, MACOS, entre outros. Um computador com microprocessador Pentium (III ou IV), clock acima de 800MHz, 256 Mb de memória RAM, 64 Mb de placa de vídeo e 20 Gb de disco rígido é suficiente para que um sistema supervisório processe todas as suas telas gráficas, funções de supervisão, monitoramento e controle de uma ER. Estações de hierarquia maior que uma ER necessita de um equipamento ligeiramente mais “potente” (memória RAM de 1Gb), para evitar a lentidão no tráfego de informações.

Normalmente os PC's ainda possuem portas paralelas e seriais para a conexão com os CLP's, modems, atuadores microprocessados, conversores para Fieldbus, Modbus, ASI e etc. Há também a conexão através da porta ethernet, podendo ser PC-rede-CLP, ou diretamente o PC-CLP.

4.3.3.2. Portas de comunicação

Os CLP's, assim como os computadores, utilizados nos sistemas supervisórios, devem possuir portas para comunicação entre si (PC-CLP e/ou CLP-CLP), normalmente seriais. Os padrões mais adotados são as RS232 e RS422/485, sendo a RS232C o padrão largamente adotado para curtas distâncias.

Hoje em dia, a utilização da porta de comunicação ETHERNET e a IBM Token Ring vem se difundindo bastante pela praticidade, rapidez e confiabilidade na transmissão de dados, sendo a ETHERNET a mais usada. Os inúmeros recursos (*softwares* e *hardwares*) desenvolvidos para a comunicação em rede, a compatibilidade dos equipamentos com recursos de rede e a gratuidade destes, conquistou o interesse dos desenvolvedores.

A porta ethernet vem ganhando adeptos como solução para o padrão de comunicação com inúmeras vantagens:

- Total compatibilidade de interface física;
- Custo “zero” na aquisição de conversores ou dispositivos do gênero, pois já estão presentes em qualquer PC;
- Custo reduzido para meio físico de transmissão, pois cabos de comunicação com CLP são exclusivos para cada modelo de CLP com valor altíssimo;
- Todos os elementos da rede podem acessar os dados;
- Redução da quantidade de cabos necessários para uma conexão ponto a ponto.

Além do problema da comunicação através de cabos exclusivos para cada modelo de CLP, existe também uma dificuldade de criar uma espécie de servidor de banco de dados, com as informações referentes ao processo a ser trabalhado.

O sistema supervisório é implantado, aplicado e utilizado em um computador pessoal, com o sistema operacional e outros programas anexos, para ajudar o operador com o registro dos dados do sistema (relatórios e gráficos). Sendo assim, um padrão vem sendo continuamente aperfeiçoado e facilitando a vida dos desenvolvedores de Sistemas Supervisórios, o OPC, que cria uma série de dados compatíveis com diversos programas e disponibiliza-os em um único banco de dados, como uma espécie de servidor.

4.3.3.3. Comunicação OPC – OLE for Process Control

A fim de possibilitar a integração das redes de industriais, o procedimento usual era o desenvolvimento de *drivers* de comunicação entre os diversos sistemas. Porém, a solução mais ideal é a criação de um *driver* padrão, assim foi criado o OPC.

Em 1995, algumas empresas se reuniram com o objetivo de desenvolver um padrão baseado na tecnologia OLE/DCOM para acesso à dados de tempo real dentro do sistema operacional Windows.

A primeira especificação produzida surgiu em agosto de 1996, chamada *OPC Specification Version 1.0*, e em setembro de 1997 foi liberada a primeira atualização da especificação OPC que passou a ser chamada de *OPC Data Access Specification Version 1.0A*.

- OLE - Object Linking and Embedding: tecnologia da Microsoft (1990), para integrar diferentes aplicações na plataforma Windows, e solucionar os problemas do padrão DDE (*Dynamic Data Exchange*);
- DCOM - Distributed Component Object Model: como uma continuação da tecnologia OLE, o DCOM surgiu com o sistema Windows NT e rapidamente aceito pela indústria, pela facilidade de acesso aos componentes de uma rede;
- OPC - Ole For Process Control: é um padrão para comunicação de dados no qual fontes de informação localizadas em pontos diversos da rede (controladores, dispositivos de E/S, banco de dados, etc.) podem ser conectadas diretamente a um cliente.

Abaixo algumas vantagens proporcionadas pelo padrão OPC:

- Padronização das interfaces de comunicação entre os servidores e clientes de dados em tempo real;
- Eliminação da necessidade de *drivers* específicos;
- Melhoria do desempenho e otimização da comunicação entre dispositivos de automação;
- Interoperabilidade entre sistemas de diversos fabricantes;
- Redução dos custos e tempo para desenvolvimento de interfaces e *drivers* de comunicação;
- Facilidade de desenvolvimento/manutenção de sistemas e produtos para comunicação em tempo real;
- Facilidade de treinamento de pessoal.

A interface criada para o acionamento dos elementos e atuadores de uma planta é bastante amigável, dependendo da criatividade do desenvolvedor obviamente, e com o auxílio de uma boa programação do CLP, as ações do sistema são melhor realizadas, e, que por uma questão física, se tornam também mais rápidas que as ações convencionais de um operador.

A evolução da informática e das telecomunicações permite basicamente operar à qualquer distância em tempo real, o que significa por exemplo que o operador pode abrir ou fechar uma válvula de um duto com um *click* de mouse à “quilômetros” de distância. Segurança, eficiência, aumento da flexibilidade e racionalização no uso da mão-de-obra são as principais vantagens da automação na operação, um exemplo geral destas vantagens é a ausência física do operador em uma área classificada (risco de explosão).

O estudo de sistemas supervisórios forneceu novos conhecimentos a respeito desta tecnologia cada vez mais presente no ambiente industrial, e que no ramo das pesquisas é uma ferramenta importante na redução do trabalho a ser executado, quando se faz necessária a criação de uma interface

entre sistema e pesquisador. É mais fácil aprender e utilizar uma tecnologia comprovadamente funcional do que tentar desenvolver um paleativo para uma situação específica.

Enfim, todos os conhecimentos abordados nos itens 4.1, 4.2 e 4.3 se fazem necessários para o acionamentos dos motores de corrente contínua utilizados como atuadores do sistema de inspeção projetado, confeccionado e desenvolvido mecanicamente no Capítulo 3. Para que seja possível realizar os devidos ajustes nestes motores, adequando-os às características desejadas para o sistema, deve-se compreender melhor algumas características inerentes à eles, além da excelente performance e sua ótima relação custo-benefício para este tipo de aplicação.

4.4. Estudo dos Motores de Corrente Contínua

A interação entre dois campos magnéticos formam o princípio de funcionamento de qualquer máquinas elétricas, em geral os campos são estacionários no espaço, e deslocamento angular de 90° entre si, promovendo o máximo conjugado. Pode-se observar o fenômeno da produção de força mecânica lembrando do comportamento de um condutor elétrico imerso em um campo magnético, pois o condutor no momento do transporte de uma corrente elétrica, ficará sujeito à uma força mecânica, conforme Eq. (4.1).

$$\vec{f} = \int (\vec{i} \times \vec{B}) dl \quad (4.1)$$

A força obtida é a integral em relação ao comprimento do fio (dl) do produto vetorial entre o vetor densidade de corrente $\vec{i}$ e o vetor densidade de campo magnético $\vec{B}$.

A partir de materiais magnéticos adequados, pode-se realizar campos magnéticos para direcionar o fluxo magnético, através de uma estrutura elementar com entreferro, ilustrado na Fig. (4.13).

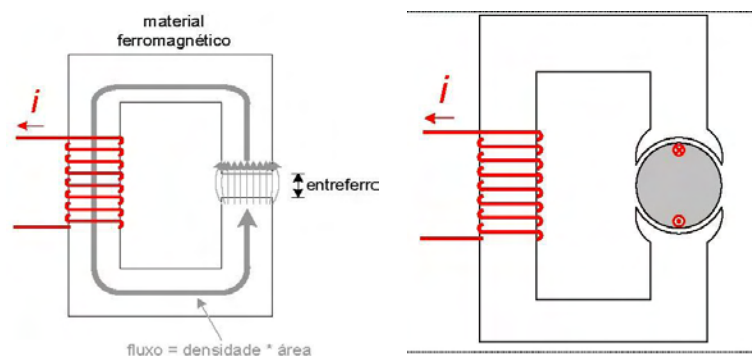


Figura 4.13 – Circuito magnético com entreferro, ao lado um circuito de uma máquina elétrica elementar.

4.4.1. Operação do motor de corrente contínua

“Máquinas de corrente contínua, por sua construção e princípio de funcionamento são muito adequadas para operação controlada. Mesmo em malha aberta é possível exercer algum controle sobre as características de saída dessas máquinas, isto é, sobre o conjugado e a velocidade” (Andrade, 2005). O circuito equivalente de um motor de corrente contínua, de excitação independente, ou com fluxo produzido por ímãs permanentes é mostrado na Figura 4.14.

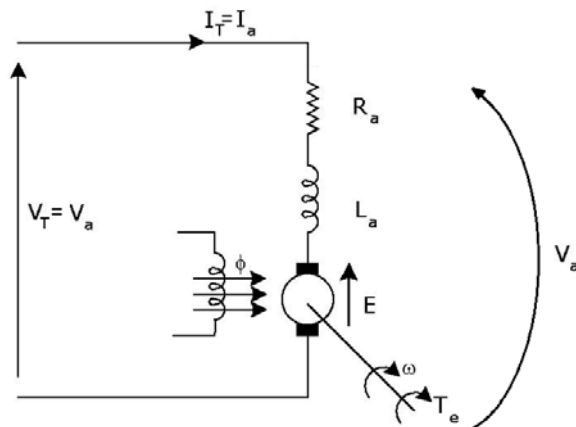


Figura 4.14 – Circuito equivalente do motor de um corrente contínua.

O modelamento matemático que descreve o comportamento desse motor é dado pela Eq. (4.2):

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E \quad (4.2)$$

Onde R_a e L_a são a resistência e indutância do enrolamento de armadura, respectivamente. E é a força contra eletromotriz e é dada em Volts pela Eq. (4.3):

$$E = K\phi\omega \quad (4.3)$$

K é a constante que envolve aspectos construtivos da máquina, ϕ é o fluxo por pólo, e ω corresponde à velocidade mecânica.

A primeira Lei de Ohm, demonstrada na Eq. (4.4), cria uma relação entre a tensão aplicada em uma carga e a corrente gerada:

$$V = R I \quad (4.4)$$

Onde, V é a tensão aplicada, R a resistência e I a corrente. Como pode-se observar na fórmula, caso o valor da resistência seja mantida, a tensão será diretamente proporcional ao valor da corrente.

Em aplicações práticas, geralmente, temos que a tensão aplicada é constante, assim os valores de resistência e corrente são indiretamente proporcionais, caso o valor da resistência seja maior, a corrente percorrida no circuito será menor. Desta forma, têm-se um fluxo ϕ menor, velocidade mecânica ω menor, e que conseqüentemente gera uma força contra eletromotriz E muito menor, justificando a experiência conhecida de que ao girar um rotor, este gera uma oposição ao movimento, de intensidade maior à medida que se aumenta a sua velocidade e vice-versa.

A segunda Lei de Ohm, demonstrada na Eq. (4.5), cita a relação entre a potência de um circuito elétrico, ou componente/dispositivo integrante do circuito, com a tensão e a corrente aplicadas. Fazendo as devidas correlações, chega-se a uma explicação de um fato que todos implicitamente já conhecem, que aplicando-se uma tensão menor em um dispositivo elétrico, este irá apresentar uma menor força (devido à menor potência).

$$P = VI \quad (4.5)$$

Caso seja inserida uma carga resistiva em série com o motor, a tensão (V_t) antes aplicada entre os pólos do motor, agora será dividida entre o motor (V_a) e o resistor (V_1), ou seja, V_a será menor que V_t . Como consequência direta da inserção desta carga em série com o motor, temos que a corrente do circuito (I_t) também será menor, sendo assim, a potência elétrica é menor que a potência elétrica sem o resistor, pois será o produto destes dois valores (V_a e I_a) menores, conforme visualizado na Fig. 4.15.

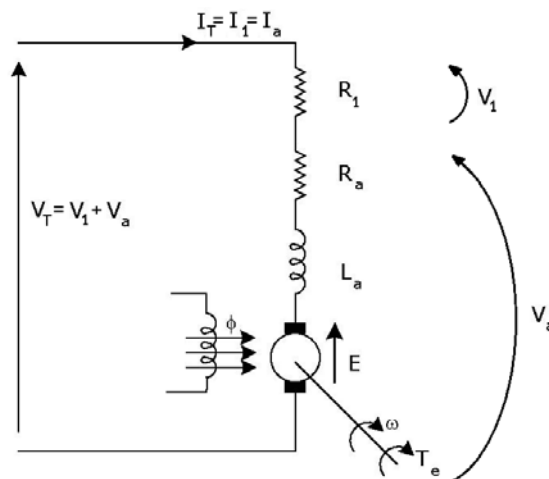


Figura 4.15 – Circuito equivalente do motor de um corrente contínua.

Teoricamente, quanto maior o valor da resistência inserida neste circuito em série, menor será a tensão e a corrente dispensada ao motor, logo, a potência elétrica, que é o produto entre esta tensão e corrente, fornecida para que o motor a transforme em potência mecânica também será menor. Porém

na prática, a potência mecânica necessária para realizar o movimento irá exigir um consumo maior de corrente compensando a menor tensão. Muitas vezes pode-se realizar pequenos ajustes na rotação do motor utilizando esta técnica. Porém deve-se observar que este ajuste pode causar uma perda elevada de potência, tornando o motor inapropriado para o trabalho que se deseja realizar (podendo levar a perda do motor), nestes casos deve-se aplicar um redutor mecânico, ou a combinação dos dois (resistor e redutor mecânico).

Motores de corrente contínua possuem uma significativa importância no desenvolvimento de sistemas, a construção simples e a facilidade no controle foram fatores primordiais para a sua utilização neste estudo. De acordo com a aplicação, os acionamentos com motores de corrente contínua são geralmente os que apresentam os maiores benefícios, em termos de confiabilidade, operação amigável e dinâmica de controle. Em casos onde se exige uma grande potência, esse tipo de acionamento se torna inviável devido aos seguintes fatores: custo elevadíssimo de um motor CC de alta potência (frente aos motores CA de indução monofásicos ou trifásicos de mesma potência), maior necessidade de manutenção e dispositivos especiais para efetuar a partida.

Após todo a seleção, montagem e regulação dos componentes do sistema, pode-se iniciar o ciclo de testes para o levantamento do comportamento do sistema, ou seja, o seu modelamento matemático. Primeiramente, é necessário verificar se o sistema atende às especificações, caso necessário, é possível confeccionar um controlador (compensador) através do modelamento matemático levantado. Após a aplicação deste controlador, é feito um novo teste para verificar se o sistema atende às expectativas, i. e., verificando na prática se o controlador realmente está executando sua função.

Caso não atenda, são re-feitos os cálculos para a confecção/configuração de um novo controlador, com novos testes, e assim sucessivamente até que as características desejadas para o sistema sejam alcançadas.

Muitas vezes, os sistemas devem possuir várias configurações, para diversos tipos de saída (produto final, posição, velocidade, ...), isso gera a necessidade de aplicar também inúmeros controladores, um para cada situação, o que por sua vez, necessita de vários testes, até que todas as configurações desejadas sejam atendidas.

Uma ferramenta poderosa para o levantamento dos dados para a determinação do modelo matemático do sistema é o Método do Mínimo dos Quadrados Recursivos (MQR), pois através de pontos coletados nos testes, este método permite estimar quais os valores intermediários serão entre os pontos citados, ou seja, não é necessário realizar infinitos testes para se obter todos os valores possíveis do sistema no intervalo desejado. Sempre é importante citar que alguns cuidados devem ser adotados para uma maior fidelidade dos valores obtidos com a utilização desta técnica, bem como qualquer outra, pois deve-se conhecer suas características, requisitos, limitações, cuidados, vantagens e desvantagens.

4.5. Método do Mínimo dos Quadrados Recursivos (MQR)

Um intervalo de valores $x[1], \dots, x[N]$ pode ser utilizado para obter uma estimativa dos parâmetros do modelo de ordem $a_k; k = 1, \dots, p$ de forma recursiva e evolutiva ao longo do tempo e à medida que novas observações vão sendo obtidas. Uma forma normalmente aceita de realizar um ajuste temporal dos coeficientes do modelo, é considerar que os valores mais recentes são mais significativos (“mais verdadeiros”) do que os valores obtidos anteriormente. Esta ponderação dos coeficientes das observações é normalmente feita utilizando uma janela exponencial decrescente.

Dois dos algoritmos mais utilizados na literatura são:

- Algoritmo dos mínimos quadrados recursivos clássico;
- Algoritmo dos mínimos quadrados recursivos rápido.

O algoritmo rápido explora a estrutura das equações de Yule-Walker, derivando as equações que permitem determinar o valor dos coeficientes utilizado no sistema de equações a cada iteração, através de operações vetoriais em vez das operações matriciais, reduzindo o esforço computacional e produzindo respostas mais rapidamente.

A literatura informa que após algumas análises computacionais a aproximação dos valores é bastante eficiente, num determinado contexto, além de ser de fácil compreensão e interpretação.

Apenas lembrando que alguns cuidados importantes devem ser observados, o tamanho das amostras é vital para a validação dos valores calculados. Quando o número de amostras é muito pequeno ou o intervalo entre amostras é grande, não é possível calcular adequadamente e o erro de estimação pode ser significativo.

4.6. Sistema Definitivo – Parte Elétrica

Após todo o entendimento, compreensão e seleção dos elementos para utilização no sistema, deve-se determinar como se farão as alimentações de acordo com os manuais e especificações fornecidas pelo fabricante. Sendo assim, é necessário confeccionar a interface do painel elétrico, no qual se utilizará uma fonte de alimentação utilizada foi de $24V_{cc}$, para o acionamento dos motores, relés principais e as entradas/saídas do CLP adotado (Siemens S7-200), e uma alimentação de $220V_{ca}$ para a fonte interna da CPU deste CLP (segundo o fabricante).

A escolha deste tipo CLP foi pela disponibilidade dos modelos S7-200 se comunicarem com softwares OPC (Ole Process Control) e Supervisórios. A única ressalva do modelo (CPU 224) é quanto a alimentação da fonte externa da CPU ser de 220V_{ac}, porém era o único disponível (empréstimo) durante o desenvolvimento deste trabalho.

A porta física de comunicação do CLP S7-200 com o PC é a serial RS232, o cabo de comunicação possui um padrão PPI da Siemens. O PC adotado foi um notebook sem porta serial RS232, sendo então necessário a utilização de um conversor do tipo USB-Serial.

O diagrama de ligação destes itens está ilustrado na Fig. (4.16).

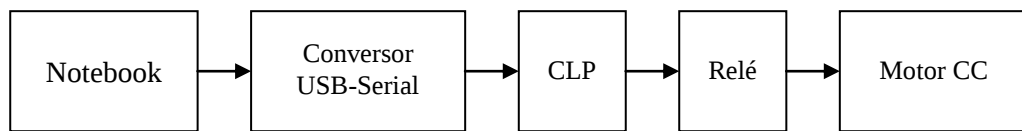


Figura 4.16 – Representação da conexão física da parte elétrica do sistema.

4.6.1. Acionamento dos motores

Alguns motores de corrente contínua possuem acionamentos em apenas um sentido (horário ou anti-horário), porém a maioria pode ser acionada nos dois sentidos de rotação. Na Figura (4.17), está ilustrada a representação da ligação dos contatos dos relés quando dos acionamentos em sentidos contrários, realizando um intertravamento. O relé K1 quando acionado abre o seu contato NF, impedindo que o contato NA deste mesmo relé feche um curto circuito – a segurança deste tipo de aplicação se deve ao fato do aspecto construtivo do componente, que primeiro abre os contatos NF e depois de um breve período de tempo, fecha os contatos NA.

Na Figura (4.17b), o motor CC irá girar no sentido horário, e caso o relé K2 seja acionado, Fig. (4.17c), o motor irá girar no sentido anti-horário. Caso nenhum relé seja acionado, ou ambos sejam acionados, o motor CC terá em seus pólos tensões iguais (negativa ou positiva, respectivamente), o que não fará o motor girar já que não existirá uma diferença de potencial entre os pólos do motor.

Resistores foram inseridos no circuito em série com o motor, para ajustes de controle na rotação. O ideal em uma situação de testes e regulagens são resistores reguláveis, tipo potenciômetros. A corrente máxima suportada pelos resistores adotados, Fig. (4.18), é de 5A, e foram selecionados segundo as características do motor e os dados levantados, que serão apresentados no Capítulo 5.

Este resistor possui dois terminais e entre eles um condutor enrolado em várias camadas, uma parte de cada camada é exposta para que seja possível conectar um terceiro terminal (intermediário). Desta forma, a resistência entre o terminal (1 ou 2) e este terceiro terminal será menor que a resistência total entre os terminais 1 e 2. O terminal 3 pode ser deslocado afim de regular a resistência até o valor desejado, obviamente limitado entre zero e a resistência total.

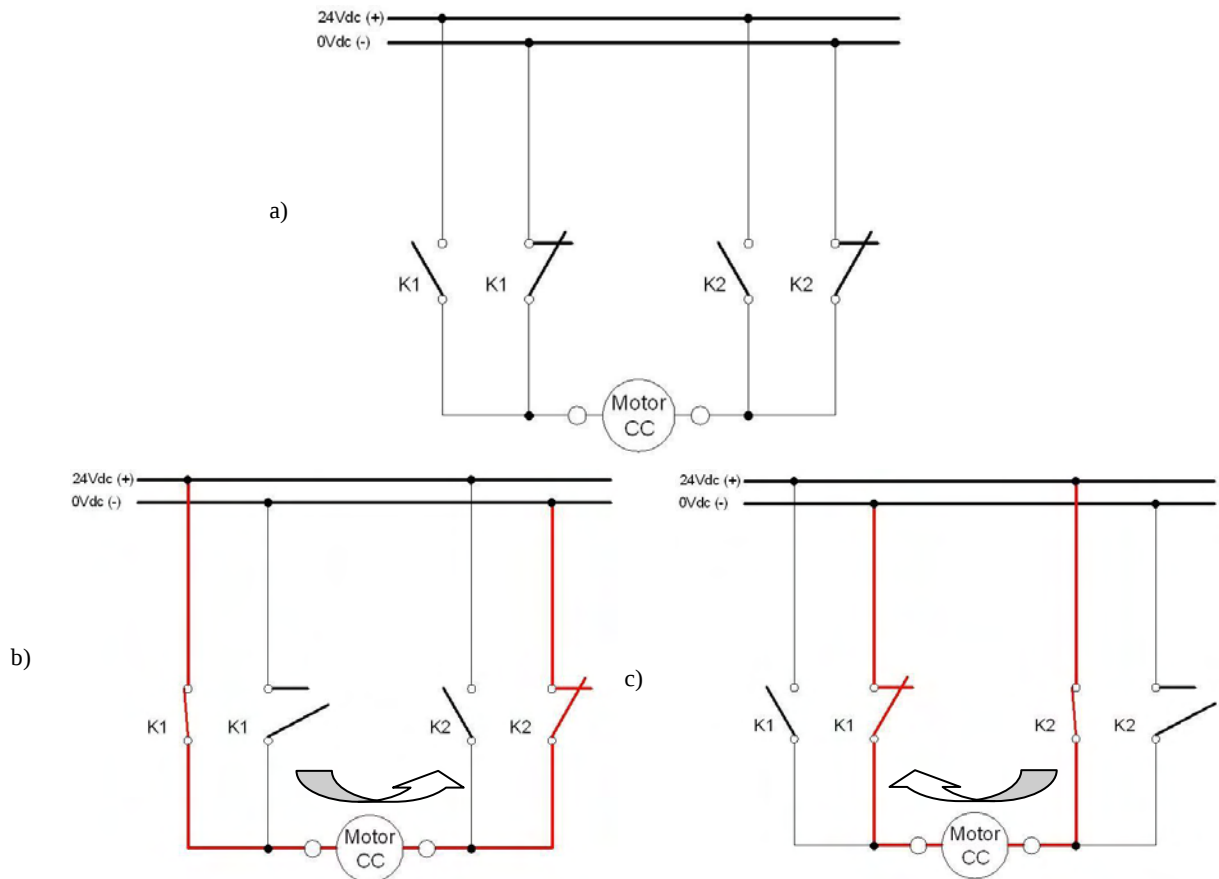


Figura 4.17 – a) Diagrama de ligação do motor CC; b) Acionamento no sentido horário; c) Acionamento no sentido anti-horário.



Figura 4.18 – Resistor tipo potenciômetro.

A Figura (4.19) mostra o painel elétrico montado: no primeiro trilho têm-se o CLP adotado, régua de bornes e disjuntor monofásico; no segundo trilho têm-se os relés principais citados na Figura 4.17, onde dois são para o motor 1 e dois para o motor 2; no lado esquerdo, uma canaleta aloja os botões para acionamento manual local (sem o auxílio do supervisor); e nas canaletas que fazem as divisórias do painel, são passados todos os condutores de alimentação do circuito, conexão entre os

sinais de entrada e saída, acionamento dos motores e alojam também os resistores, mantendo proteção destes e a segurança quanto à um eventual contato físico do operador com a fiação.

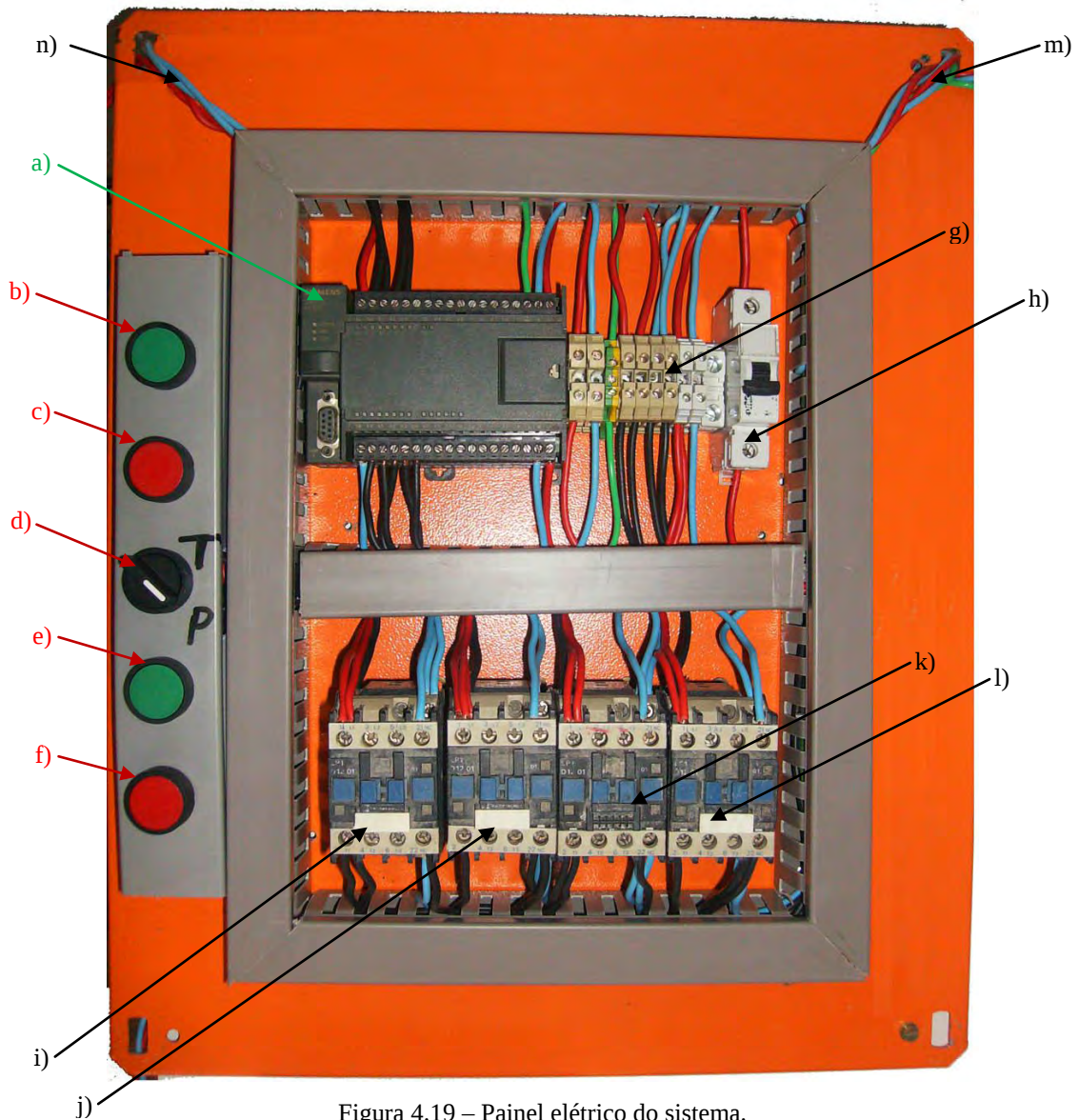


Figura 4.19 – Pannel elétrico do sistema.

Os seguintes componentes foram demarcados na Fig. (4.19):

- a) CLP SIEMENS S7-200 CPU 224, utilizado para o controle do sistema;
- b) Botão pulsador NA: utilizado para o acionamento avulso no sentido horário do motor 1, fazendo o sistema recuar axialmente caso a chave seletora esteja na posição P; caso a chave seletora esteja na posição T, este botão irá iniciar o ciclo de teste para um duto de 3/16" de espessura;
- c) Botão pulsador NA: utilizado para o acionamento avulso no sentido antihorário do motor 1, fazendo o sistema avançar axialmente caso a chave seletora esteja na posição P; caso a

chave seletora esteja na posição T, este botão irá iniciar o ciclo de teste para um duto de 3/8" de espessura;

- d) Chave seletora de duas posições: caso esta chave esteja na posição P, ao acionar os botões b), c), e) e f) serão realizados acionamentos avulsos nos motores 1 e 2; caso a chave seletora esteja na posição T, este botão irá iniciar o ciclo de testes;
- e) Botão pulsador NA: utilizado para o acionamento avulso no sentido horário do motor 2, fazendo a engrenagem 2 girar no sentido antihorário caso a chave seletora esteja na posição P; caso a chave seletora esteja na posição T, este botão irá iniciar o ciclo de teste para um duto de 1/2" de espessura;
- f) Botão pulsador NA: utilizado para o acionamento avulso no sentido antihorário do motor 2, fazendo a engrenagem 2 girar no sentido horário caso a chave seletora esteja na posição P; caso a chave seletora esteja na posição T, este botão não tem função definida;
- g) Régua de Bornes: responsáveis pela interligação da alimentação elétrica do sistema e dos elementos de campo (motores) com o painel;
- h) Disjuntor 16A: dispositivo de proteção elétrica, neste caso, protegendo a fonte da CPU do CLP, pois o modelo 224 do S7-200, exige uma fonte de $220V_{ac}$ para a alimentar a CPU e uma fonte de $24V_{cc}$ para alimentar as interfaces das entradas e saídas;
- i) Relé Principal: responsável pelo acionamento no sentido horário do motor 1;
- j) Relé Principal: responsável pelo acionamento no sentido antihorário do motor 1;
- k) Relé Principal: responsável pelo acionamento no sentido horário do motor 2;
- l) Relé Principal: responsável pelo acionamento no sentido antihorário do motor 2;
- m) Condutores: alimentação do sistema, fornecendo as tensões de $220V_{ac}$ e $24V_{cc}$;
- n) Condutores: oriundos dos contatos dos relés i), j), k) e l) para a alimentação dos motores (1 e 2).

4.6.2. Programação do CLP e Supervisório

A programação inicial do CLP consistia em detectar a configuração do sistema, realizando os testes para levantamento de dados e posteriormente o seu modelamento matemático. Desta forma, o CLP foi programado para realizar o acionamento dos motores em tempos pré-determinados, ou seja, ao clicar em um botão na tela do Supervisório (PC) desenvolvido, o motor é acionado por um tempo e depois verificada a distância percorrida pelo conjunto.

Na Figura (4.20), é apresentada um trecho da estrutura de programação no CLP para o acionamento do motor 1 no sentido horário, fazendo o conjunto recuar axialmente. Todos os itens da programação foram identificados com tags. A tag é o nome característico que representa um determinado elemento no sistema, e abaixo seguem as tags adotados para este trecho de programação:

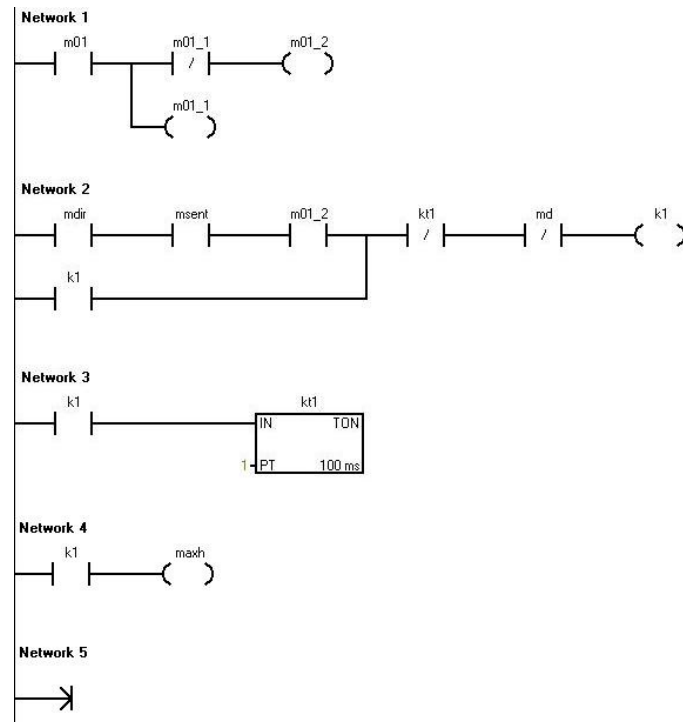


Figura 4.20 – Programação no CLP Siemens S7-200 (CPU 224).

- a) maxh: saída do CLP que é conectada ao relé principal que aciona o motor responsável pelo movimento axial do sistema, fazendo o motor girar no sentido horário;
- b) m01: botão construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de liga;
- c) m01_1: parte integrante de um esquema elétrico que evita o acionamento indevido, sendo assim ao acionar o botão m01, será enviado apenas um pulso (similar à uma função impulso);
- d) m01_2: parte integrante do esquema elétrico do m01_1;
- e) md: botão construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de emergência, desligando o sistema;
- f) mdir: chave seletora na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de seleção da direção, ou seja, qual motor será acionado, o responsável pelo movimento axial ou o responsável pelo movimento radial;
- g) msent: chave seletora na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de seleção do sentido, ou seja, qual será o sentido de rotação do motor, horário ou antihorário;
- h) kt1: temporizador de retardo no acionamento, pseudônimo TON – *Timer ON delay*, programado para acionar seus contatos após 100ms de acionada a sua bobina, indicados pelo produto entre o fator de tempo do temporizador, 100ms, e o múltiplo estabelecido PT, 1;
- i) k1: relé “virtual” responsável por acionar a saída maxh, que será acionado caso a seletora de direção (mdir) esteja acionada, informando que o motor 1 é o escolhido e a seletora de

sentido (msent) esteja acionada, informando que o sentido de rotação é o horário, assim ao acionar o botão de liga (m01) e o botão de emergência (md) não esteja acionado, será acionado o motor (maxh) e o temporizador (kt1), e após 100ms o temporizador irá desligar o motor.

Após a criação das linhas de programação do CLP referentes aos acionamentos dos motores (1 e 2) nos dois sentidos de rotação (horário e antihorário), para os vários tempos pré-determinados dos testes, se faz necessário criar a tela do supervisorio, de onde iremos gerenciar o sistema, Fig. (4.21).

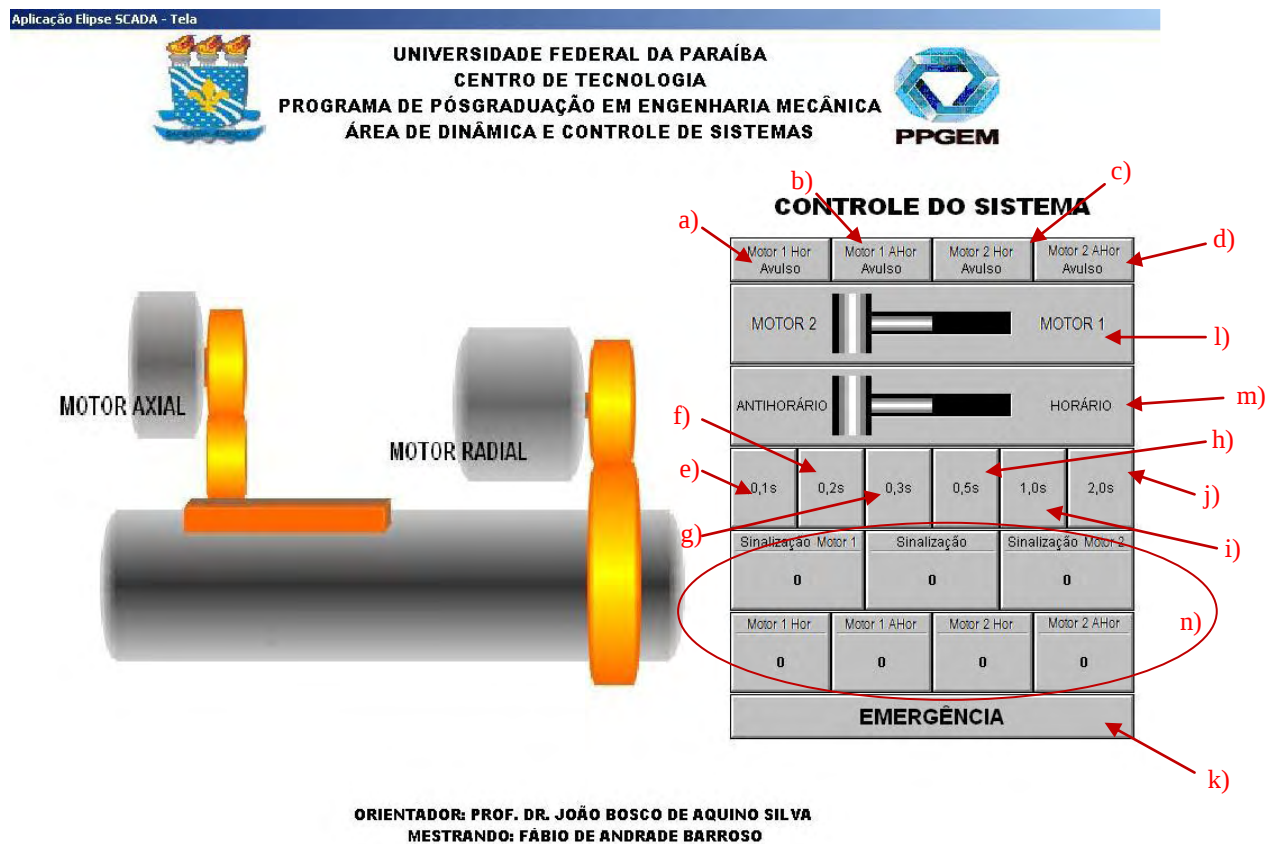


Figura 4.21 – Tela de aplicação do supervisorio para a realização dos testes, software utilizado: Elipse SCADA.

A tela do supervisorio desenvolvido, Fig. (4.21), ilustra os tempos estabelecidos para a configuração do sistema e posterior modelamento matemático com os valores medidos.

Existem ainda outras funções identificadas na tela, como acionamentos axial e radial, nos sentidos horário e antihorário, avulsamente, onde é possível acionar o sistema livremente para o posicionamento correto do sistema na tubulação, além do botão de desliga, em caso de se desejar realizar uma parada no teste ou alguma emergência.

Para cada item ilustrado na Fig. (4.21), existe uma tag específica:

- a) maxhav: “botão” para acionamento direto do motor 1, fazendo-o girar no sentido horário avulsamente, i. e., enquanto o botão estiver pressionado, sem tempo pré-determinado;

- b) maxahav: “botão” para acionamento direto do motor 1, fazendo-o girar no sentido antihorário avulsamente, i. e., enquanto o botão estiver pressionado, sem tempo pré-determinado;
- c) mradhav: “botão” para acionamento direto do motor 2, fazendo-o girar no sentido horário avulsamente, i. e., enquanto o botão estiver pressionado, sem tempo pré-determinado;
- d) mradahav: “botão” para acionamento direto do motor 2, fazendo-o girar no sentido antihorário avulsamente, i. e., enquanto o botão estiver pressionado, sem tempo pré-determinado;
- e) m01: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de liga, para um acionamento na ordem de 0,1s;
- f) m02: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de liga, para um acionamento na ordem de 0,2s;
- g) m03: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de liga, para um acionamento na ordem de 0,3s;
- h) m05: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de liga, para um acionamento na ordem de 0,5s;
- i) m10: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de liga, para um acionamento na ordem de 1,0s;
- j) m20: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de liga, para um acionamento na ordem de 2,0s;
- k) md: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de um botão de emergência, desligando o sistema;
- l) mdir: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de uma chave seletora, escolhendo qual motor será acionado (1 ou 2), assim o sistema irá se deslocar axial ou radialmente;
- m) msent: elemento gráfico construído na tela de Supervisório que faz o papel de uma chave seletora do sentido de rotação do motor, horário ou antihorário;
- n) Sinalizações: algumas sinalizações foram adicionadas à tela apenas como meio de verificar a integridade da comunicação do CLP com o PC.

Alguns modelos de conversor USB-Serial apresentam alguns atrasos devido à taxa de transmissão empregada.

Os *softwares* adotados para o Sistema Supervisório (Elipse SCADA versão 2.39) e o KEPServerEX são do tipo *demoware*, ou seja, funcionam por tempo limitado, aproximadamente 2 horas. Sendo assim, a implementação de um sinal, na tela do supervisório, para verificar da integridade na comunicação teve a sua relativa importância.

Logo, com o CLP programado e a tela do supervisório confeccionada, deve-se efetuar a comunicação entre o PC (supervisório) e o CLP.

Neste caso, foi utilizado um servidor de banco de dados em tempo real específico para PC e CLP, um *software* do tipo OPC (Ole for Process Control) chamado KEPServerEx Versão 5.5, da Kepware Communication Server, no qual é possível configurar a porta de comunicação (serial do PC) com o padrão do cabo do CLP (PPI), conforme ilustradas nas Fig. (4.22) e (4.23).

A partir da configuração, o *software* OPC cria um arquivo que pode ser lido/escrito fazendo a interface com o Supervisório.

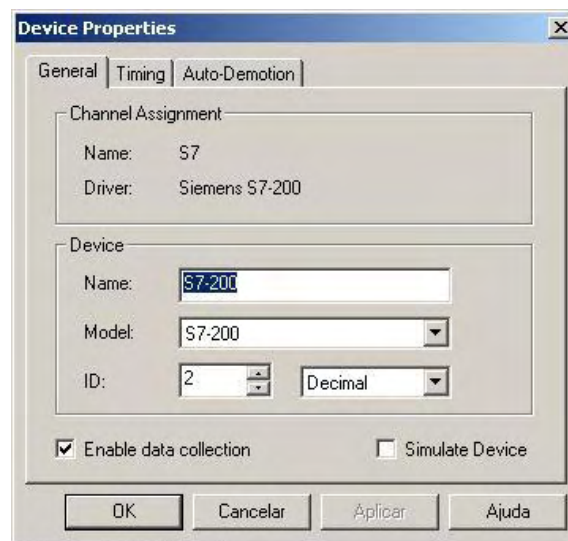


Figura 4.22 – Tela de aplicação do OPC para configurar a comunicação com o CLP S7-200, com seu respectivo canal de identificação/comunicação da CPU (ID = 2), software utilizado: KEPServer 5.5.

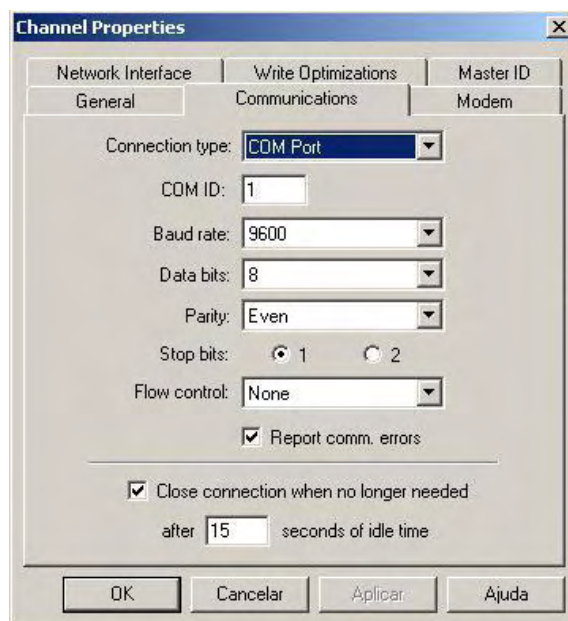


Figura 4.23 – Tela de aplicação do OPC, comunicando com o CLP S7-200 através da porta COM1, taxa de transmissão de 9600bits/s e paridade da comunicação Even (par), software utilizado: KEPServer 5.5.

Nas Figuras (4.22) e (4.23), tem-se a configuração do software de OPC, KEPserverEX, este cria uma espécie de servidor de informações como uma interface entre o Supervisório Elipse SCADA e o CLP S7-200 adotados. Para configurar o Supervisório Elipse SCADA de forma que este utilize a interface criada pelo KEPserverEX, deve-se informar na janela *Organizer* (organizador, ou configuração em outros termos) do Elipse SCADA, que existe um servidor OPC de informações para “gerenciar”, como pode-se observar na sequência das Fig. (4.24), (4.25), (4.26) e (4.27).

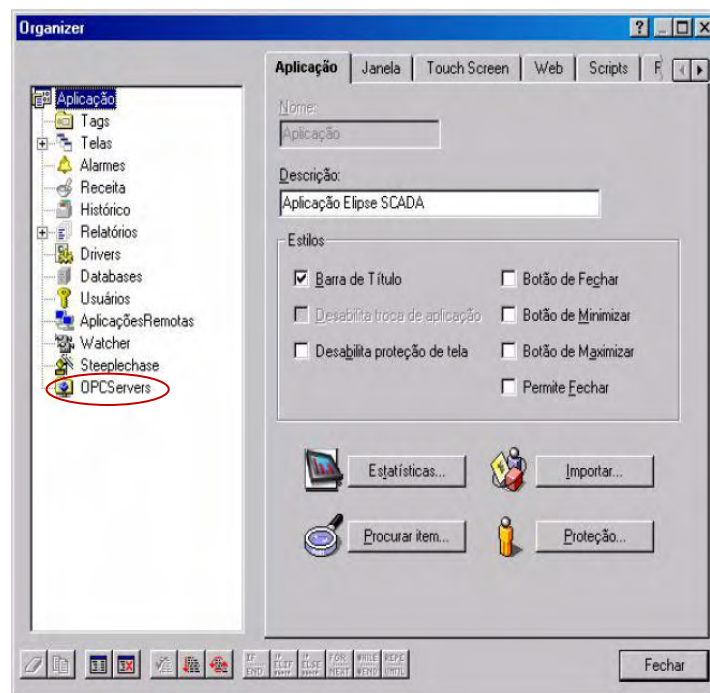


Figura 4.24 – Tela do Elipse SCADA, informando que será utilizado um servidor OPC de dados.

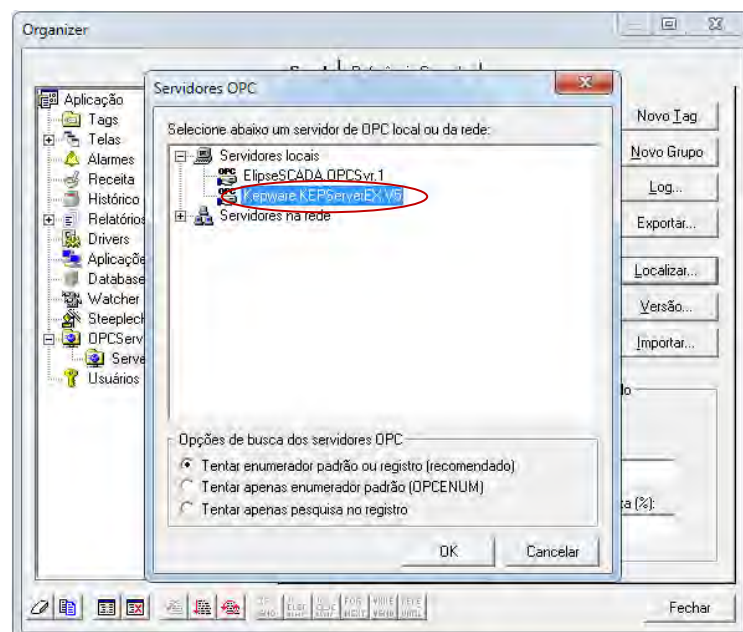


Figura 4.25 – Tela do Elipse SCADA, selecionando o servidor de banco de dados que será utilizado.

Sendo assim, o Elipse SCADA irá fazer uso deste servidor de informações, sendo atualizado do status das entradas/saídas do CLP e ao mesmo tempo atualizando as entradas virtuais, por sua vez, o KEPServerEX envia os novos dados das entradas virtuais ao CLP, que efetuará todo o processamento destes dados de acordo com a programação existente e efetuará as devidas alterações em suas saídas, obviamente monitoradas pelo KEPServerEX que repassa ao Elipse SCADA, fechando o ciclo de comunicação, como um *loop* infinito de leitura e escrita de dados.

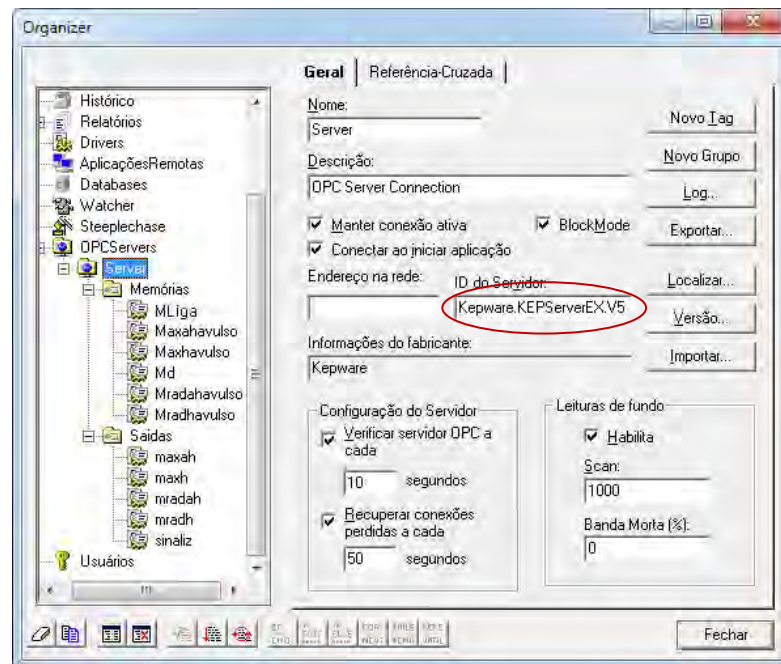


Figura 4.26 – Tela de aplicação do Elipse SCADA, onde é possível informar qual o servidor OPC.

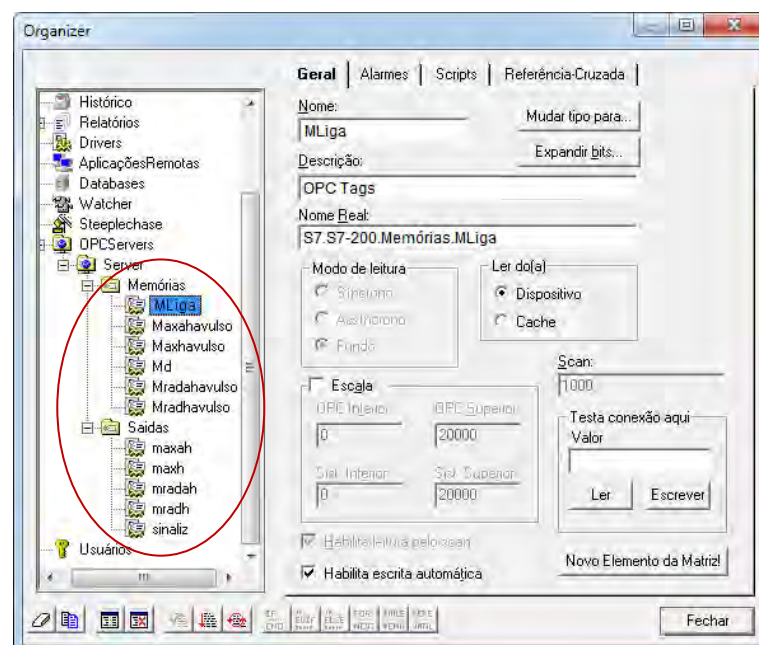


Figura 4.27 – Tela de aplicação do Elipse SCADA, onde é possível informar quais as tags do servidor OPC de dados serão recebidas e gerenciadas pelos supervisório.

Feito isto, o cuidado maior na programação do CLP foi quanto ao acionamento dos motores, de modo a garantir um intertravamento entre os contatos dos relés, pois os motores CC devem ser acionados nos dois sentidos de rotação, conforme pode-se observar no Anexo II.

Um intertravamento de relés (ou emissores de sinal, como botoeiras) é realizado quando se deseja garantir que determinados pontos de uma ligação elétrica não devem ser acionados ao mesmo tempo, devido a algum encontro de tensões (fases) diferenciadas. Ou seja, em um determinado momento um dos pólos do motor receberá tensão positiva da fonte de alimentação, em outro momento, receberá tensão negativa e para garantir que os pólos (positivo e negativo) da fonte de alimentação não irão se ligar, provocando um curto circuito, devemos adotar o intertravamento como medida cautelar.

4.7. CONCLUSÃO

A vantagem da utilização das técnicas de modelamento dos sistemas é a aproximação dos resultados reais de forma não empírica, i. e., de acordo com modelos matemáticos pode-se realizar cálculos, auxiliados ou não, de computadores, e assim obter os parâmetros que o sistema deve possuir em situações não obtidas empiricamente.

Se um sistema não estiver de acordo com as especificações do projeto, o primeiro passo é ajustar o valor do ganho (proporcional). Se esta ação não for suficiente, insere-se um outro elemento compensador (integral/derivativo) com o objetivo de suprir a deficiência do sistema original. Estas compensações podem ser feitas através do controlador, que basicamente pode ser composto por um destes três elementos: proporcional, derivativo e integral, ou combinações entre eles. Os controladores têm o objetivo de ajustar o sistema para que este funcione de acordo com os requisitos pré-determinados na fase de idealização.

O estudo destes tópicos possibilitou o desenvolver do sistema idealizado, reduzindo o tempo no processo de escolha, aquisição, confecção, montagem/conexão e ajustes dos elementos. Pois, todos os itens foram escolhidos e dimensionados de forma a obter o objeto limite entre a simplicidade dos componentes com a performance desejada. Enfim, foi de uma importante contribuição, que proporcionou aprender e aplicar a relação teoria e prática com estes novos conhecimentos, além de solucionar os desafios propostos pela situação.

CAPÍTULO V

TESTES E RESULTADOS

5.1. Testes Iniciais

A partir do momento em que o sistema de inspeção foi montado, tanto a parte mecânica quanto conectado com a parte elétrica, e devidamente configuradas as partes de *softwares* para controle, se faz necessário iniciar os procedimentos de testes para a aquisição dos dados que serão utilizados para o modelamento matemático e posteriormente os devidos ajustes.

Inicialmente foram utilizados quatro motores de corrente contínua, dois com rotação de 83 rpm e outros dois com rotação de 35 rpm, disponíveis no Laboratório de Engenharia de Precisão. Aparentemente, os motores se apresentavam estáveis e confiáveis para a implementação no sistema, porém após alguns testes preliminares, foi observado que o motor de 83 rpm, possuía algumas restrições para atender as características desejadas.

Durante a execução destes testes, foram feitas as seguintes observações:

a) quanto a utilização dos motores de 83 rpm:

a1) como responsável pelo movimento do conjunto no sentido axial: muito rápido e instável, mesmo utilizando controladores, apresenta erros aleatórios, o que torna a determinação da posição do conjunto não-confiável;

a2) como responsável pelo movimento do conjunto no sentido radial: muito rápido devido ao tempo necessário para a leitura de qualquer transdutor (sensor), e aplicando um controlador, o mesmo perde o torque necessário para a movimentação do sistema;

b) quanto a utilização dos motores de 35 rpm;

b1) como responsável pelo movimento do conjunto no sentido axial: apresenta boa velocidade, com alguns erros aleatórios, mas com a aplicação de um controlador, tornou o movimento mais estável e a determinação da posição mais confiável;

b2) como responsável pelo movimento no sentido radial: idem ao b1);

c) devido ao movimento do duto ser pré-determinado pela espessura do duto, estabelecer uma região fixa é primordial, evitando algumas irregularidades existentes no duto disponibilizado para os testes;

d) temperaturas e tempo de repouso do sistema mantidos constantes, e quando comparado os acionamentos com o sistema “frio” e após sucessivos acionamentos (sistema “quente”), mostrou que as variações entre estes valores não são significativos em relação à tolerância desejada.

Após as observações realizadas nos testes preliminares, se iniciou a coleta de dados para a obtenção de um modelamento do sistema. Os valores obtidos ainda possuíam algumas discrepâncias, então o uso de um controlador se fazia necessário. Algumas opções seriam:

- a) aplicar apenas um resistor em série com o motor CC, controlador do tipo proporcional (P);
- b) aplicar apenas um resistor em série com o motor CC, e o motor ligado em paralelo com um capacitor, evitando ruídos, controlador do tipo proporcional e derivativo (PD);
- c) aplicar um resistor em série com o motor CC, e o motor em paralelo com um capacitor e um indutor, controlador do tipo proporcional, integral e derivativo (PID).

Destas opções apenas a primeira foi implantada, pois o capacitor iria acumular carga e assim o motor iria continuar girando após o término do acionamento. O indutor iria apenas consumir uma corrente excessiva da fonte, e caso o indutor fosse aplicado em série com o motor, faria apenas o papel de mais um resistor.

Aplicando-se o resistor em série com um motor CC, foi criado um divisor de tensão, conforme mencionado no Capítulo 4, e assim a tensão efetiva aplicada nos pólos do motor é reduzida, diminuindo também a sua corrente, então sua potência elétrica fornecida é menor. De certa forma, esta configuração equilibra as forças envolvidas, estabiliza seu torque, e consequentemente mantém uma aceleração no regime transitório bastante satisfatória.

Aplicando as Teorias de Laplace, alguns cálculos para o controlador foram realizados, obtendo assim três valores de resistência para três supostas situações. Ao inserir cada um dos resistores em série com o motor CC, e realizados os devidos testes, obteve-se na prática que o:

- a) Resistor de 22 Ω : a estabilidade não melhorou significativamente, ainda apresentava alguns erros aleatórios (instabilidade);
- b) Resistor de 32 Ω : o movimento do motor foi estável e com velocidade bastante satisfatória;
- c) Resistor de 60 Ω : apresentou ótima velocidade para a varredura de um transdutor, porém em alguns acionamentos perdia torque, ou seja, voltou a não ser constante.

5.2. Resultados Obtidos

Alguns ajustes no conjunto parafuso-mola-esfera foram necessários para que a engrenagem movida realizasse o movimento axial de forma mais harmônica, ou seja, uma constante de amortecimento mais adequada para o sistema. Feito isto, iniciou-se os testes com o resistor de $32\ \Omega$ em série com o motor CC, o sistema se comportou estavelmente, com valores regulares e sem alterações significativas ao longo do regime de testes (trabalho).

Cada motor foi acionado individualmente, com o resistor em série, nos sentidos horário e anti-horário. Trabalhando em um mesmo sentido de rotação, de modo a eliminar uma possível folga entre os dentes das engrenagens, foram realizados 30 (trinta) acionamentos para cada tempo pré-determinado, ou seja:

- 30 acionamentos do motor 1 no sentido horário (Hor);
- 30 acionamentos do motor 1 no sentido anti-horário (AHor);
- 30 acionamentos do motor 2 no sentido horário (Hor);
- 30 acionamentos do motor 2 no sentido anti-horário (AHor).

Assim, obteve-se as médias de cada acionamento, apresentado na Tab. (5.1), bem como os seus respectivos desvios-padrão (DP).

Tabela 5.1 – Valores médios de posicionamento do sistema com o resistor de $32\ \Omega$.

TEMPO	Motor 1 (movimento axial em mm)				Motor 2 (movimento radial em mm)			
	Hor	DP	AHor	DP	Hor	DP	Ahor	DP
0,1s	0,91	0,10	0,94	0,11	*	*	*	*
0,2s	3,50	0,53	3,60	0,74	5,10	0,88	4,80	0,63
0,3s	6,00	0,09	6,20	0,26	9,60	0,52	9,20	0,42
0,5s	10,40	0,52	10,60	0,52	19,60	0,52	19,20	0,79
1,0s	*	*	*	*	40,70	1,06	39,90	0,74

* dados inconclusivos ou testes não realizados.

A partir dos valores obtidos no sistema com o controlador projetado, Tabela (5.1), foram levantados gráficos referentes às velocidades com o auxílio do *software* MATLAB. Este *software* permite que, a partir de um conjunto de pontos seja possível estimar uma curva, com uma técnica conhecida como Mínimo dos Quadrados Recursivos – MQR.

A velocidade média de cada ponto pode ser obtida pela razão entre o deslocamento médio obtido e o tempo necessário para tal deslocamento, sendo assim, obtêm-se os pontos para inserir no *software* para posterior estimação da curva e que realizando um processo inverso são determinados os “infinitos” pontos que formam a curva.

Enfim, com alguns pontos pode-se determinar uma curva, e com esta curva estimada, pode-se estimar os demais pontos que pertencem à esta curva, como se todos os pontos tivessem sido obtidos empiricamente. Para esta aproximação é aplicada uma função do tipo MQR para estipular seus valores intermediários. Os gráficos obtidos podem ser observados nas Fig. (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4). De posse desta interpolação é possível encontrar os valores necessários para o modelamento matemático da curva (T_r - tempo de subida e T_s – tempo de estabelecimento).

Este processo possui limitações, e gera incertezas que devem ser estudadas para que estes pontos obtidos no processo inverso sejam validados, estudos estes que serão realizados posteriormente ao modelamento.

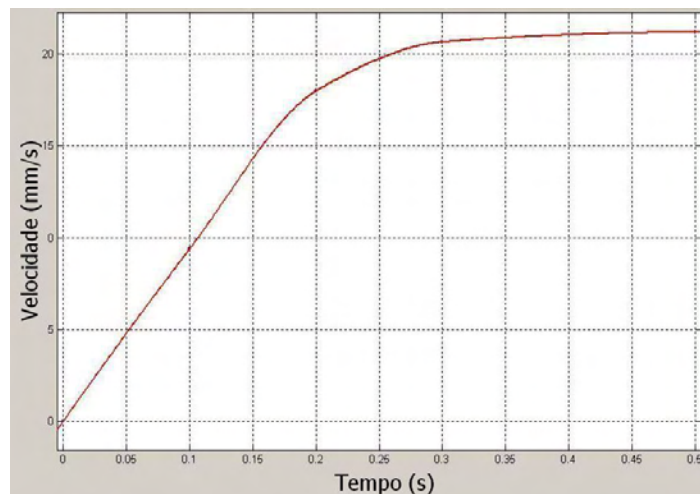


Figura 5.1 – Gráfico de velocidade do motor 1, sentido horário.

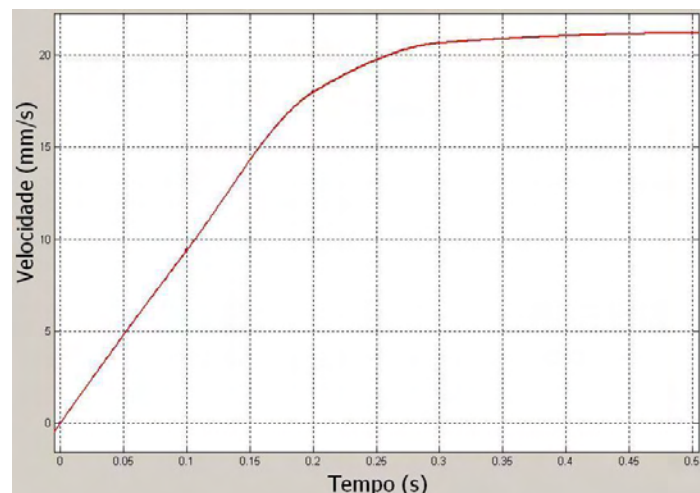


Figura 5.2 – Gráfico de velocidade do motor 1, sentido antihorário.

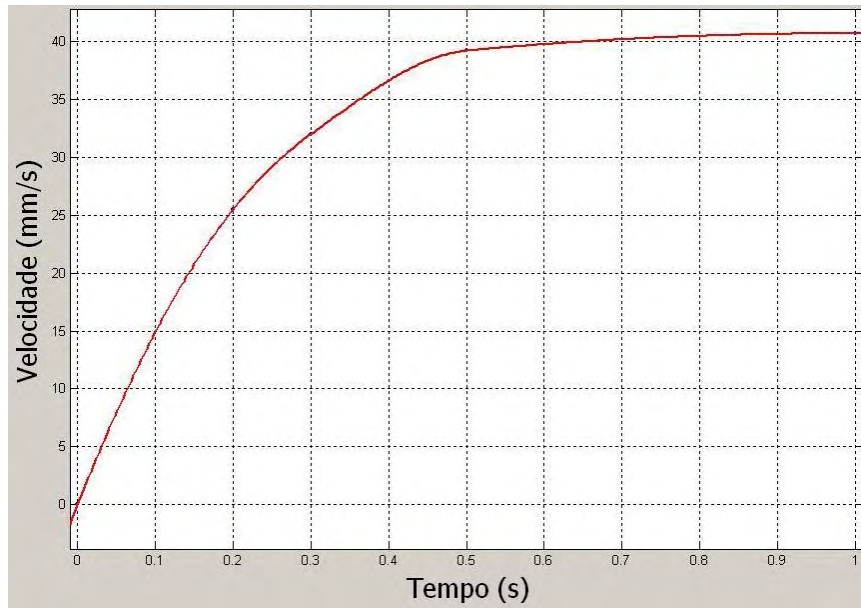


Figura 5.3 – Gráfico de velocidade do motor 2, sentido horário.

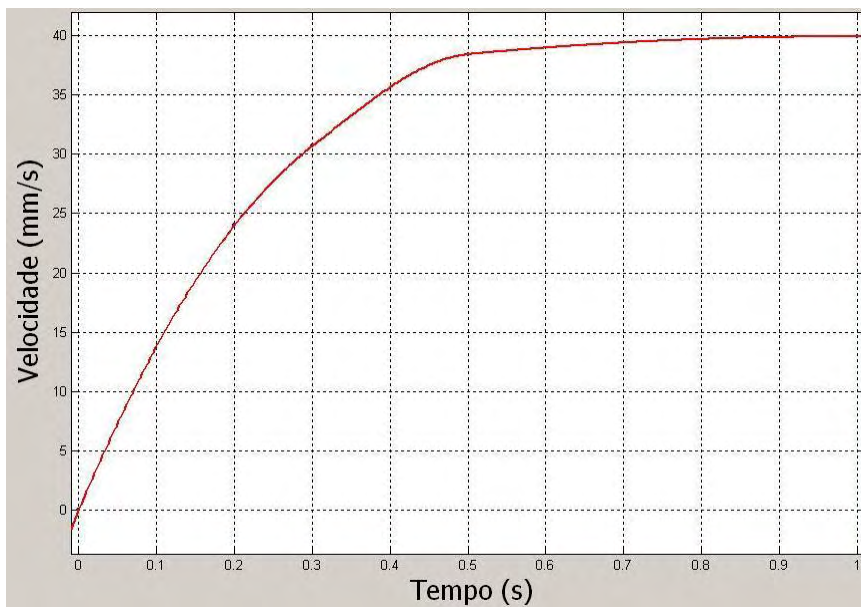


Figura 5.4 – Gráfico de velocidade do motor 2, sentido antihorário.

Pode-se notar uma diferença nos valores de resposta dos gráficos no regime estacionário entre o motor 1 e o motor 2, nos sentidos horário e antihorário. Quanto a diferença apresentada entre os sentidos horário e antihorário de cada motor, deve-se ao aspecto construtivo do motor. Quanto a diferença entre os valores dos motores, deve-se a carga aplicada em cada movimento: o motor 2 é responsável pelo movimento radial, onde a carga do motor se resume em um giro da engrenagem, e o motor 1 é responsável pela movimentação axial, onde a carga do motor aplicada é o giro de uma engrenagem sobre a cremalheira levando consigo todo o conjunto mecânico e “arrastando” a engrenagem 2 bipartida, justificando a menor velocidade obtida.

5.3. Modelamento Matemático

Comparando as formas dos gráficos de respostas com os gráficos de respostas de sistemas de primeira ordem com entrada degrau unitário, modelados com a Transformada de Laplace, nota-se a similaridade entre eles. O sistema em si possui as características de um sistema massa-mola-amortecedor, porém os coeficientes de massa e amortecedor possuem valores não significativos frente ao coeficiente de mola (proporcional), justificando a similaridade do seu gráfico ao de um sistema de primeira ordem. Sendo assim, segundo Ogatha (2003), tem-se que um sistema de primeira ordem se caracteriza da seguinte forma:

a) a função de transferência de um sistema de primeira ordem é

$$\text{dado pela fórmula } \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}, \quad (5.1)$$

onde $C(s)$ é a saída, $R(s)$ a entrada e T o inverso da constante que caracteriza o sistema ($1/T = a$);

b) a função degrau unitário é $1/s$, e substituindo $R(s)$ por $1/s$ na Eq.

$$(5.1), \text{ obtem-se } C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \times \frac{1}{s}; \quad (5.2)$$

c) expandindo em frações parciais tem-se $C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + 1/T}; \quad (5.3)$

d) como $1/T = a$, onde a é a constante que caracteriza o sistema, (5.4)

$$\text{pode-se reescrever a Eq. (5.3) como } C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + a};$$

e) e finalmente aplicando a transformada inversa de Laplace na (5.5)

$$\text{Equação (5.4), tem-se } c(t) = 1 - e^{-at}, \text{ para } t \geq 0.$$

A Equação (5.5) possui o gráfico ilustrado na Fig. (5.5)

Pode-se observar também a presença das variáveis A e B , onde A é o valor referente à 63,2% do valor de resposta em regime estacionário, que é obtido com uma constante de tempo $(1/T)$, e B é o valor de 86,5% da resposta obtido com duas constantes de tempo $(2/T)$.

Observando o gráfico da Fig. (5.5), pode-se observar que a constante a pode ser extraída de diversas formas, conforme os valores percentuais da resposta em relação à razão $1/T$, porém os mais

adotados para extraí-lo são o T_r e o T_s , que foram obtidos com o auxílio do MQR no software MATLAB.

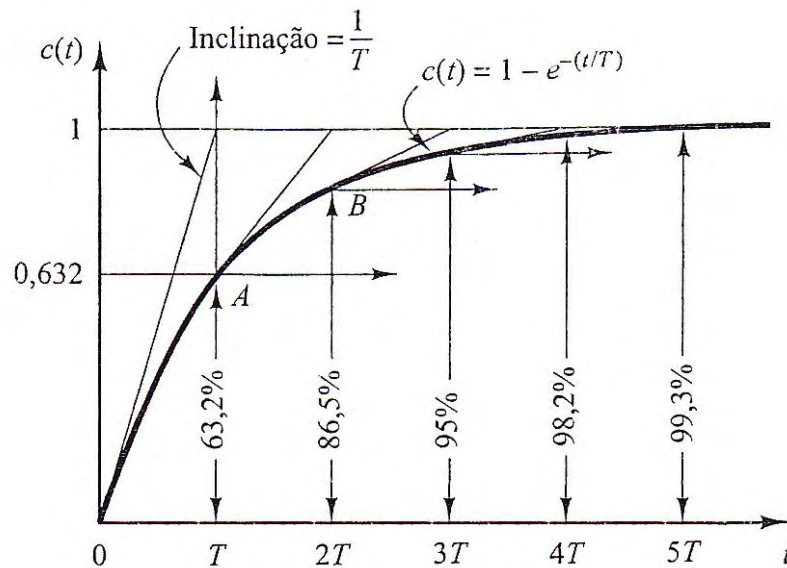


Figura 5.5 – Gráfico de resposta ao degrau unitário de um sistema de primeira ordem, fonte: Ogatha, 2003.

OBS: As tabelas com os pontos gerados pelo MQR e utilizadas para obtenção dos valores a seguir estão no Anexo VI.

Segundo Nise (2002), o valor de $1/T$ pode ser obtido no gráfico da Fig. (5.5) como o valor de tempo referente ao sistema obter 63,2% do valor de resposta no regime estacionário. O T_s é o tempo de estabelecimento, que significa que o valor da resposta se torna estável (valor final), ou seja, quando a amplitude da resposta fica em torno do valor final, considerando uma margem de erro de 2% para mais ou para menos.

$$T = \frac{1}{a} \quad (5.6)$$

O valor do T_s pode ser obtido através da Eq. (5.7), do qual pode-se também extrair o valor da constante característica do sistema a , no qual será a razão entre uma constante de valor 4 e o tempo necessário para que o sistema atinja o regime permanente.

$$T_s = \frac{4}{a} \quad (5.7)$$

Sendo assim, chega-se aos valores utilizados na Tab. (5.2), onde pode-se extrair os valores de T_r e T_s para obter uma aproximação do valor de a para cada acionamento de motor CC utilizado no sistema desenvolvido. Para obter o valor do T_r , deve-se determinar o intervalo de tempo levado pelo

sistema para obter 10% e 90% do valor da resposta no regime permanente (amplitude final). O T_s é o valor do tempo necessário para o sistema atinja o regime permanente, com uma tolerância de 2% do valor final, para mais ou para menos.

Tabela 5.2 – Valores de a calculados a partir de T e T_s das curvas geradas.

	$a = 1 / T$	$a = 4 / T_s$
Motor 1 Horário	$a = 1 / 0,14 \Rightarrow$ $a = 7,14$	$a = 4 / 0,36 \Rightarrow$ $a = 10,95$
Motor 1 Anti-horário	$a = 1 / 0,14 \Rightarrow$ $a = 7,14$	$a = 4 / 0,32 \Rightarrow$ $a = 12,5$
Motor 2 Horário	$a = 1 / 0,20 \Rightarrow$ $a = 5,00$	$a = 4 / 0,63 \Rightarrow$ $a = 6,35$
Motor 2 Anti-horário	$a = 1 / 0,22 \Rightarrow$ $a = 4,54$	$a = 4 / 0,63 \Rightarrow$ $a = 6,35$

Assim, pode-se incitar que o valor de a é uma média dos valores da Tab. (5.2), o que leva a Tab. (5.3). Faltando apenas corrigir o valor final da resposta do sistema ao degrau unitário para uma entrada de $24V_{cc}$.

Afim de se obter o valor final de resposta do sistema, pode-se aplicar o valor de uma constante k para a Eq. (5.1), obtendo assim a Eq. (5.8), que desta forma estará se aplicando uma correção para os valores de entrada e do controlador, corrigindo o valor final, admitindo o sistema como um sistema de “caixa preta”, Nise (2002). Sendo assim, obtêm-se os valores de k demonstrados na Tab. (5.5).

Tabela 5.3 – Valores de a para o sistema.

	Valor médio de a
Motor 1 Horário	$a = 9,05$
Motor 1 Anti-horário	$a = 9,82$
Motor 2 Horário	$a = 5,67$
Motor 2 Anti-horário	$a = 5,44$

A partir da Tabela (5.3), o modelo matemático do sistema para uma entrada ao degrau unitário seria o ilustrado na Tab. (5.4).

Tabela 5.4 – Modelamento matemático do sistema ao degrau unitário.

	Motor 1 Horário	Motor 1 Anti-Horário	Motor 2 Horário	Motor 2 Anti-Horário
Sistema	$\frac{1}{s + 9,05}$	$\frac{1}{s + 9,82}$	$\frac{1}{s + 5,67}$	$\frac{1}{s + 5,44}$

Aplicando-se uma constante k em cada modelo matemático para que atinja o valor de resposta no regime estacionário correspondente, tem-se que a Eq. (5.1) irá se transformar na Eq. (5.8).

$$C(s) = k \cdot \left(\frac{1}{s + a} \right) \Rightarrow C(s) = \frac{k}{s + a} \quad (5.8)$$

Tabela 5.5 – Valores de k para um sistema de primeira ordem do tipo “caixa preta”.

	Valor de k
Motor 1 Horário	$k = 188,24$
Motor 1 Anti-horário	$k = 208,18$
Motor 2 Horário	$k = 230,77$
Motor 2 Anti-horário	$k = 217,05$

Desta forma, o modelo matemático do sistema desenvolvido é demonstrado na Tab. (5.6):

Tabela 5.6 – Modelamento matemático do sistema.

	Motor 1 Horário	Motor 1 Anti-Horário	Motor 2 Horário	Motor 2 Anti-Horário
Sistema	$\frac{188,24}{s + 9,05}$	$\frac{208,18}{s + 9,82}$	$\frac{230,77}{s + 5,67}$	$\frac{217,05}{s + 5,44}$

Com o modelo matemático do sistema, Tab. (5.6), pode-se determinar os valores de posicionamento de uma forma mais abrangente, ou seja, caso o sistema passe a ser utilizado para realizar a inspeção em um duto situado em campo, para acompanhamento do processo de corrosão, será possível determinar a espessura do duto em cada posição, além da localização de uma possível descontinuidade.

Comparando os gráficos do sistema com o modelo matemático, pode-se observar a similaridade entre eles para o motor 1, responsável pelo movimento axial do sistema, nas Fig. (5.6) e (5.7).

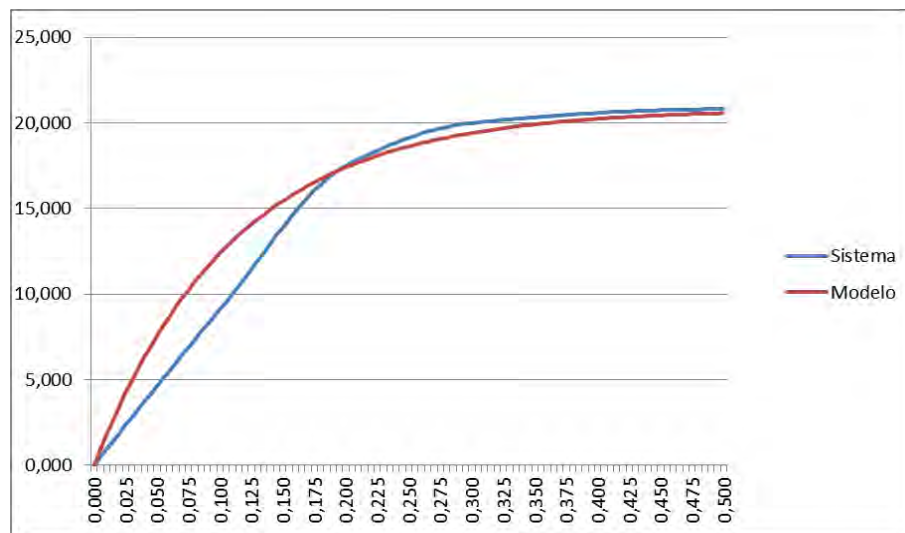


Figura 5.6 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 1, sentido horário.

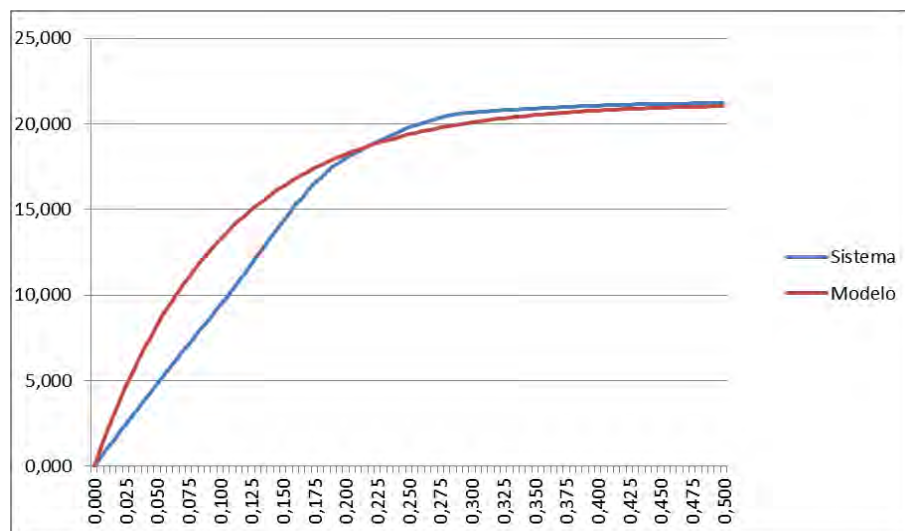


Figura 5.7 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 1, sentido antihorário.

Uma diferença pode ser notada entre os valores do sistema e do modelo matemático para tempos inferiores à 175 milisegundos, o que não compromete o modelamento tanto devido ao valor

desta diferença como pelo fato do sistema ser acionado por tempo superiores à estes. Pois os acionamentos do sistema serão acima de 300 ms, ou seja, tempos superiores aos 175 ms, no qual têm-se uma maior fidelidade entre os valores.

Comparando os gráficos do sistema com o modelo matemático, pode-se observar a similaridade ainda maior entre eles para o motor 2, responsável pelo movimento radial do sistema, nas Fig. (5.8) e (5.9).

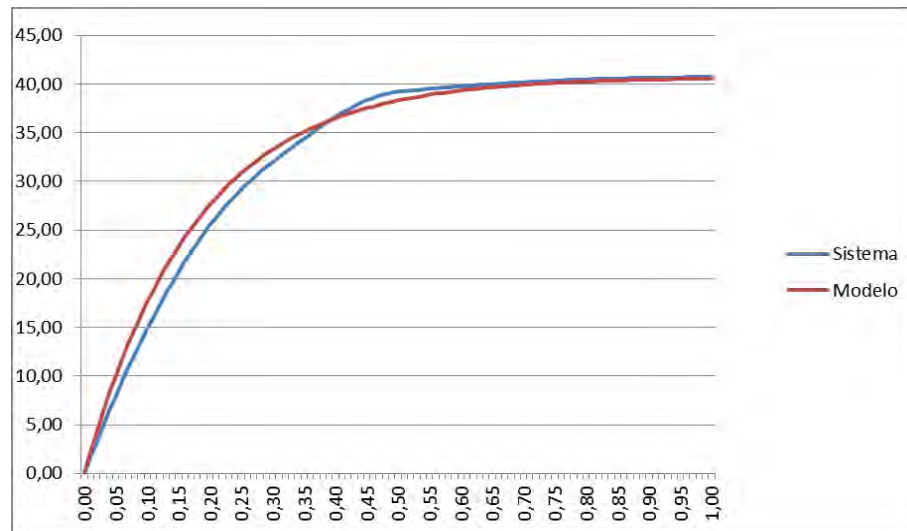


Figura 5.8 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 2, sentido horário.

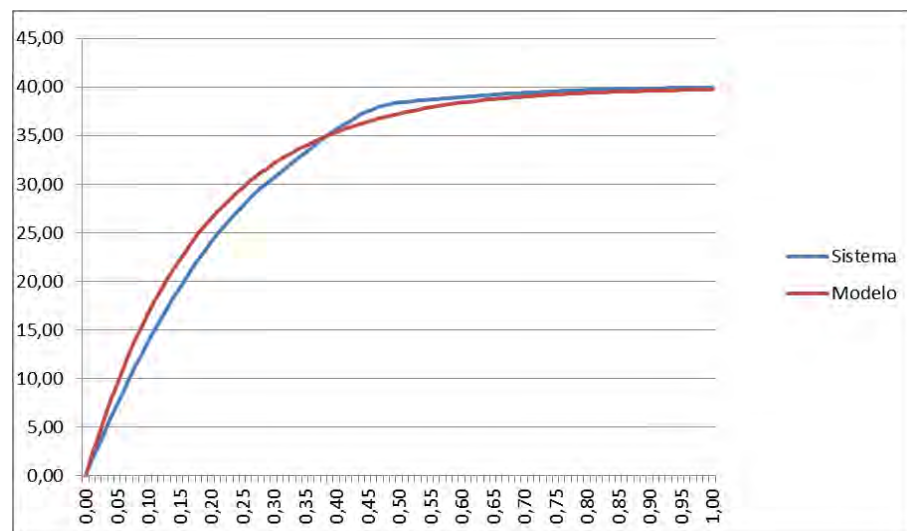


Figura 5.9 – Comparação dos gráficos do sistema e modelo matemático do motor 2, sentido antihorário.

Por enquanto, os valores de tempo e posicionamento adotados para validação dos resultados e testes adicionais continuarão sendo extraídos da tabela do Anexo VI.

O sistema de inspeção desenvolvido atendeu bem às expectativas, sendo capaz de se manter estável em deslocamentos aleatório com tempos pré-determinados.

Assim, serão necessários testes adicionais para verificar a integridade dos dados gerados pelo MQR e validar os resultados obtidos.

5.5. Testes Adicionais

A partir do momento em que o sistema desenvolvido se encontra modelado e com seus valores de posicionamento já estimado, deve-se realizar testes adicionais no intuito de verificar a confiabilidade do sistema quanto ao seu movimento em outras distâncias, como forma de garantir que os pontos gerados pelo MQR são válidos, lembrando que estes pontos estão no Anexo VI.

De acordo com a tabela de dados obtida com o modelamento do sistema (Anexo VI), foi realizada uma interpolação dos dados para a obtenção dos valores de tempo a serem adotados nos temporizadores do CLP para que o conjunto se movimenta para os valores de posição pré-determinados.

Aleatoriamente, foram escolhidos os valores de 8, 10, 15 e 20 mm para posicionamento axial, avançando e recuando, para o posicionamento radial, foram escolhidos os valores de 8, 15, 20 e 40 mm, horário e anti-horário.

Após a programação do CLP para cada situação, foram iniciados os testes. O próprio conjunto de pontos da tabela levantada através do MQR (Anexo VI), não apresentava os valores idênticos aos escolhidos no parágrafo anterior, ou seja, para um movimento axial no sentido de recuo com o tempo de 0,09s, o posicionamento do sistema seria em torno de 8,22 mm em vez dos 8 mm.

Na prática, o sistema se apresentou fiel aos dados da tabela (sem diferenças significativas), pois de acordo com a média dos testes, o sistema se posicionou em torno de 8,14 mm, uma diferença de apenas 0,08 mm. Estes e outros dados dos testes se encontram na Tab. (5.7).

Tabela 5.7 – Valores médios dos posicionamentos axiais utilizando informações do sistema.

POSIÇÃO DESEJADA (mm)	MOTOR 1					
	Tempo (s)	Média Hor (mm)	DP	Tempo (s)	Média AHor (mm)	DP
8,00	0,09	8,14	0,20	0,085	8,01	0,11
10,00	0,11	10,02	0,12	0,11	10,18	0,24
15,00	0,165	15,10	0,18	0,16	15,14	0,20
20,00	0,30	20,05	0,10	0,26	20,02	0,12

O mesmo ocorreu nos testes radiais, de acordo com a tabela do MQR, para um movimento no sentido horário para o tempo de 0,05 s, deveria-se obter o posicionamento do sistema em 7,96 mm, o que notando na Tab. (5.8), que na média dos testes, o sistema se posicionou em torno de 8,08 mm, uma diferença de 0,12 mm.

Tabela 5.8 – Valores médios dos posicionamentos radiais utilizando informações do sistema.

POSIÇÃO DESEJADA (mm)	MOTOR 2					
	Tempo (s)	Média Hor (mm)	DP	Tempo (s)	Média AHor (mm)	DP
8,00	0,05	8,08	0,14	0,055	7,96	0,12
15,00	0,10	15,03	0,11	0,11	15,06	0,10
20,00	0,145	20,08	0,13	0,16	20,18	0,06
40,00	0,65	40,06	0,08	0,97	40,16	0,08

Apesar dos dados se mostrarem consistentes e de uma boa eficiência para um sistema em malha aberta, neste momento é importante realizar alguns cálculos para afirmar qual a incerteza expandida do sistema, e assim obter com um bom nível de segurança, qual a probabilidade de que o sistema se posicione corretamente conforme o levantamento realizado.

5.6. Cálculo da Incerteza

A partir das medições efetuadas foi possível realizar um estudo da incerteza do movimento do conjunto aplicando o Coeficiente de *Student*, onde através de aplicações matemáticas com os dados já obtidos, estima-se o grau de incerteza expandida.

Adotando as seguintes fórmulas:

- Erro => $E = I - VVC$, onde I = medição e VVC = valor “real”
- Média => $Média = (\sum I) / n$, onde n = número de medições realizadas
- Tendência => $Td = \bar{I} - VVC$
- Erro aleatório => $Ea = I - \bar{I}$

Segundo Júnior (2008), a partir de um conjunto de “n” medições repetidas, a incerteza padrão pode ser estimada pela Eq. (5.9):

$$u(I) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (5.9)$$

n = 30 medições

v = n - 1 => 30 - 1 => v = 29 graus de liberdade

Cálculo da incerteza expandida:

Aplicando o coeficiente de *Student* (t), tem-se:

a) Para v=29 com 95%, t = 2,0456

Tabela 5.9 – Valores de incerteza expandida no posicionamento axial do sistema.

POSIÇÃO DESEJADA (mm)	MOTOR 1							
	Média Hor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t	Média AHor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t
8,00	8,14	0,14	0,24	0,50	0,085	8,01	0,11	0,23
10,00	10,02	0,02	0,12	0,26	0,11	10,18	0,31	0,63
15,00	15,10	0,10	0,21	0,42	0,16	15,14	0,24	0,50
20,00	20,05	0,05	0,11	0,23	0,26	20,02	0,12	0,26

Tabela 5.10 – Valores de incerteza expandida no posicionamento radial do sistema.

POSIÇÃO DESEJADA (mm)	MOTOR 2							
	Média Hor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t	Média AHor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t
8,00	8,08	0,08	0,16	0,33	7,96	-0,04	0,12	0,26
15,00	15,03	0,03	0,11	0,23	15,06	0,06	0,12	0,24
20,00	20,08	0,08	0,16	0,32	20,18	0,18	0,20	0,41
40,00	40,06	0,06	0,11	0,22	40,16	0,16	0,19	0,39

b) Para $v=29$ com 99%, $t = 2,7574$

Tabela 5.11 – Valores de incerteza expandida no posicionamento axial do sistema.

POSIÇÃO DESEJADA (mm)	MOTOR 1							
	Média Hor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t	Média AHor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t
8,00	8,14	0,14	0,24	0,68	0,085	8,01	0,11	0,30
10,00	10,02	0,02	0,12	0,34	0,11	10,18	0,31	0,85
15,00	15,10	0,10	0,21	0,57	0,16	15,14	0,24	0,68
20,00	20,05	0,05	0,11	0,30	0,26	20,02	0,12	0,34

Tabela 5.12 – Valores de incerteza expandida no posicionamento radial do sistema.

POSIÇÃO DESEJADA (mm)	MOTOR 2							
	Média Hor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t	Média AHor (mm)	Tendência (mm)	u(I)	u(I)*t
8,00	8,08	0,08	0,16	0,45	7,96	-0,04	0,12	0,34
15,00	15,03	0,03	0,11	0,30	15,06	0,06	0,12	0,32
20,00	20,08	0,08	0,16	0,43	20,18	0,18	0,20	0,55
40,00	40,06	0,06	0,11	0,29	40,16	0,16	0,19	0,52

Como pode-se observar nas Tab. (5.9), (5.10), (5.11) e (5.12), o maior valor de incerteza é de 0,85 mm, que se encontra para a estimativa de que em 99% das vezes que o conjunto se deslocar axialmente 10 mm no sentido avanço, este poderá ter efetivamente se deslocado entre 9,15 e 10,85 mm. O segundo valor mais alto de incerteza ainda se mostrou bastante satisfatório, na ordem de 0,68mm para 99%. Para 95% de probabilidade o maior valor foi de 0,63 mm, e o segundo maior valor foi de 0,50 mm.

Sendo assim, o cálculo da incerteza expandida reforça a boa estabilidade do sistema, mesmo sendo em malha aberta, pois qualquer reparo que se faça necessário em caso de trincas ou qualquer outra imperfeição será sempre refeita uma leitura manualmente (procedimento normal nestes casos) e o eventual reparo realizará uma retirada de material bastante superior à incerteza de qualquer leitura efetuada – pois a menor ferramenta mede 3,175 mm, logo, cerca de 4 vezes, pois $4 \cdot 0,85 = 3,40$ mm.

Este sistema foi inicialmente idealizado para se movimentar indeterminadamente pelo duto, porém com as limitações existentes, determinou-se que o seu movimento se limitaria apenas a fazer

inspeções em regiões soldadas. Sendo assim, se faz necessário estipular os valores das distâncias referentes à estas juntas, pois o comprimento axial que o sistema deve se deslocar deverá ser compatível com a espessura do duto soldado e suas respectiva Zona Termicamente Afetada (ZTA).

5.5. Determinação da Região de Testes

O comprimento de uma região soldada é estabelecido pela Zona Termicamente Afetada (ZTA) da solda. A ZTA é o resultado do processo de soldagem e após alguns estudos à respeito, principalmente, em processos de soldagem por eletrodo revestido em dutos de petróleo e gás, a informação obtida é que o bisel (chanfro para penetração do eletrodo e garantia de fusão do material em toda a espessura) confeccionado para a soldagem de um duto de 12,7 mm de espessura, é em torno de 15 mm.

Segundo a ESAB (2003), para processos de soldagem elétrica com eletrodo revestido, a ZTA pode afetar uma região um pouco maior que 2 (duas) vezes a largura da solda, que neste caso, é algo em torno de 36 mm, conforme ilustra a Fig. (5.10). As ZTAs para outras espessuras de duto são ilustradas nas Fig. (5.11) e (5.12).

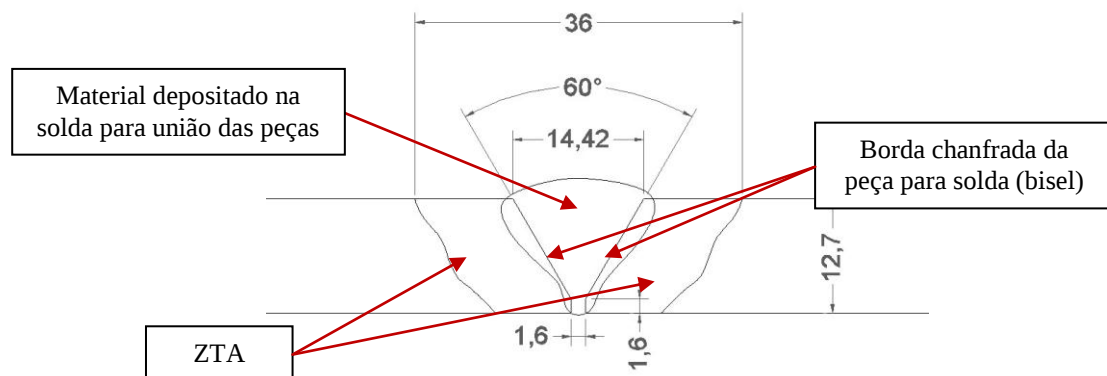


Figura 5.10 – ZTA para o processo de soldagem elétrica por eletrodo revestido ($1/2'' = 12,7$ mm).

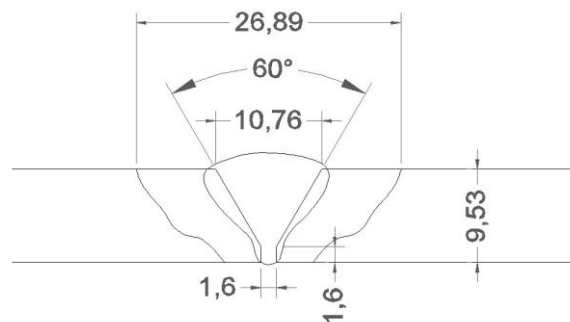


Figura 5.11 – ZTA para o processo de soldagem elétrica por eletrodo revestido ($3/8'' = 9,53$ mm).

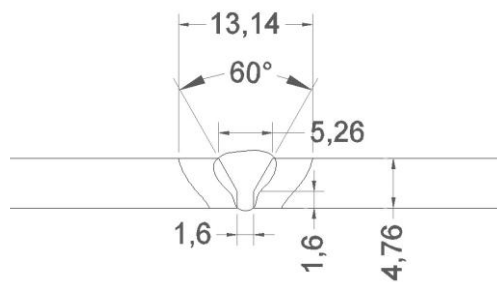


Figura 5.12 – ZTA para o processo de soldagem elétrica por eletrodo revestido ($3/16'' = 4,76$ mm).

A partir destas informações, tem-se que o sistema deve se deslocar apenas distâncias em torno de 13, 27 e 36 mm, ou seja, a distância a ser percorrida axialmente depende diretamente da espessura do duto a ser inspecionado.

O transdutor de ultrassom irá realizar varreduras em torno de 8 mm de largura, logo foi estabelecido um acionamento axial de 6 mm, como medida de segurança. De acordo com a Figura (5.6), para um duto de 12,7 mm de espessura de parede, a ZTA é de 36 mm, e com deslocamentos na ordem de 6 mm, se farão necessários 6 acionamentos, porém serão realizados 9, ou seja, 54 mm, permitindo a verificação do ultrassom inicie cerca de 9 mm antes e termine cerca de 9 mm depois da ZTA, como medida de segurança. O mesmo critério de segurança foi adotado para estipular o valor do movimento radial em 380° , ou seja, 20° acima de uma volta completa (360°).

Esta distância de folga parece pequena, porém é imprescindível lembrar que em se tratando de uma zona termicamente afetada, a região pode sofrer trincas ou outras imperfeições que não estarão estritamente na região da solda, algo em torno de 15 mm. É importante deixar uma folga antes e depois da região soldada (cerca de 21 mm) como segurança na obtenção deste possível defeito. Analogamente, para dutos de 9,53 mm serão 6 acionamentos de 6 mm (36 mm para uma ZTA de 27 mm), e para dutos de 4,76 mm serão 4 acionamentos de 6 mm (24 mm para uma ZTA de 13 mm).

A programação do CLP deverá conter: acionamentos avulsos dos dois motores (horário e antihorário), do tempo referente ao acionamento do motor 1 para um deslocamento axial de 6 mm, além do tempo de acionamento do motor 2 para um deslocamento radial de 380° (horário e antihorário), Tab. (5.13), bem como o número de acionamentos referentes a cada espessura de duto para os ciclos de inspeção.

Tabela 5.13 – Valores aplicados no temporizador do CLP, com seus respectivos desvios-padrão.

DESLOCAMENTO	MOTOR 1	MOTOR 2	
	AntiHorário	Horário	AntiHorário
Acionamentos de 6mm	0,30 s	6,60 s	6,90 s

Após a programação do CLP, deve-se confeccionar a tela do sistema supervisorio para o início dos testes para validação dos resultados, além de configurar o *software* servidor do banco de dados OPC (KEPserverEX) para comunicação entre o CLP e o sistema supervisorio. Assim, foi possível realizar os testes de funcionalidade e repetibilidade do sistema, e finalmente estabelecer a confiabilidade acionando-o pela tela do supervisorio, ilustrada na Fig. (5.13).



Figura 5.13 – Tela de aplicação final do supervisorio, *software* utilizado: Elipse SCADA.

Caso o sistema possa ser reprogramado para medição da espessura de dutos, para acompanhamento do processo de corrosão, basta realizar os acionamentos continuamente, ou seja, sem um número de acionamentos fixos, iniciando o teste com um botão de liga e encerrá-lo com um botão de desliga. Estas modificações devem ser realizadas na programação do CLP, servidor OPC e Supervisorio, sem dificuldade. Estas configurações/programações podem trabalhar concomitantemente com as medições de juntas soldadas, alternando as telas de aplicação do Supervisorio, sendo necessário apenas a criação de 3 telas:

- a) Tela 1 – tela de abertura: para escolha da tela 2 ou tela 3;
- b) Tela 2 – tela de aplicação para inspeção em juntas soldadas;
- c) Tela 3 – tela de aplicação para monitoramento da espessura do duto (corrosão).

5.8. Conclusão

A tolerância quanto ao erro deste sistema poderia ser maior que o apresentado neste trabalho, pois como mencionado anteriormente, por menor que seja a trinca, o instrumento de medição deve ser capaz de captar. Após captado o defeito, o sistema deve ser capaz apenas de informar em que região está localizado este defeito, e caso haja um erro desta posição, o erro deverá ser menor que a quantidade retirada de material para o devido reparo.

Isto é, se ocorre uma trinca de 0,1 mm e a ferramenta de reparo for uma broca de Ø3 mm, o máximo erro do meu sistema no posicionamento da falha deve ser exatamente 3,1 mm, assim a ferramenta irá retirar a falha independente do valor do erro apresentado para a posição da falha, e ao preencher o furo com material de reposição (solda ou outro processo) a trinca terá sido eliminada.

Quanto a exatidão do sistema deve-se atentar aos seguintes fatores:

- a) um melhor posicionamento do equipamento durante a preparação para a varredura, justificando os acionamentos avulsos;
- b) o tamanho da falha normalmente encontrada;
- c) região de varredura e sensibilidade do transdutor de ultrassom;
- d) mesmo que a falha seja muito pequena, para realizar o reparo, um disco de policorte usual tem espessura igual ou superior à 3 mm de espessura (1/8").

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusão

O projeto apresentou uma boa repetitibilidade e exatidão em se tratando de um sistema em malha aberta e a simplicidade dos materiais/equipamentos envolvidos na sua construção, mostrando-se eficaz, adaptável e principalmente prático.

Como citado anteriormente, erros aleatórios na ordem de décimos de milímetro comparados com outros fatores que podem ser no mínimo 4 (quatro) vezes maior, comprova a não necessidade de construir um sistema mais robusto e de exatidão superior ao apresentado, pois irá não somente ser desnecessário como oneroso.

Como princípio de um sistema intercambiável de inspeção de baixo custo, são apresentados na Tab. (6.1) os preços de mercado dos materiais envolvidos na construção do sistema, em valores atuais:

Tabela 6.1 – Orçamento básico realizado no mercado local.

ITENS	Vlr. Unit.	Qde	Vlr. Final
Motor CC 35 rpm	R\$ 40,00	2	R\$ 40,00
Base de Alumínio	R\$ 60,00	1	R\$ 60,00
Nylon Ø150x90 mm	R\$ 300,00	1	R\$ 300,00
Nylon Ø80x90 mm	R\$ 170,00	1	R\$ 170,00
Barra de nylon 25x25x450 mm	R\$ 30,00	1	R\$ 30,00
Relé Principal	R\$ 60,00	4	R\$ 240,00
Resistor 32 Ω	R\$ 5,00	2	R\$ 10,00
CLP Siemens S7-200 (214)	R\$ 1.800,00	1	R\$ 1.800,00

Cabo de Comunicação PPI S7-200	R\$ 1.200,00	1	R\$ 1.200,00
Disjuntor 16A	R\$ 5,00	1	R\$ 5,00
Botoeiras	R\$ 30,00	5	R\$ 150,00
Fonte 24V _{cc}	R\$ 200,00	1	R\$ 200,00
Total:	R\$ 4.205,00		

Somando alguns valores de usinagem, parafusos e outros por menores, o custo pode chegar a aproximadamente R\$ 5.000,00, ainda bastante acessível frente aos dispositivos encontrados no mercado. Isto considerando o CLP adotado, pois caso seja utilizado um microcontrolador do tipo PIC 16F (R\$ 20,00), o custo total do sistema de inspeção será de aproximadamente R\$ 2.000,00 (já incluindo outros componentes eletrônicos necessários para a placa do circuito e outros por menores).

A fase de desenvolvimento do projeto, análises das possíveis soluções e suas implicações diretas e indiretas (curto, médio e longo prazo), demandou um tempo considerável, porém esta fase preliminar considero particularmente como a mais interessante deste trabalho, coletando informações e convertendo-as em conhecimento. Após todo o processo de desenvolvimento, modelamento e testes, ficou ainda mais evidente a importância da base disciplinar sólida, pois apenas assim, foi possível realizar análises mais rápidas de cada situação vivenciada, e as respostas *a priori* confirmaram os resultados obtidos *a posteriori*.

6.2. Sugestão para Trabalhos Futuros

Neste mesma linha, sistema intercambiável para inspeção, pode-se desenvolver:

- uma base de apoio adaptável às tubulações, como cintas de aço ou outro elemento;
- instalação de encoders nas partes móveis para uma exatidão ainda maior dos movimentos do sistema;
- a substituição do CLP por um microcontrolador do tipo PIC 16F ou 18F, diminuindo o tamanho físico e custo da parte elétrica;
- a utilização de transdutores com comunicação serial, conectando-os diretamente à um PC/HandHeld/PalmTop/Smartphone, a fim de minimizar dispositivos e conexões intermediárias.

Para outra linha de pesquisa, pode-se desenvolver um conjunto baseado na parte mecânica para máquinas-ferramenta ou dispositivos anexos (instrumentos de medição ou outros).