

SISTEMAS ROBOTIZADOS DE INSPEÇÃO INTERNA DE DUTOS

Marisol Elias de Barros Plácido

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Fernando Cesar Lizarralde, D.Sc.

Prof. Ramon Romankevicius Costa, D.Sc.

Prof. Liu Hsu, Docteur d'Etat

Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha, D.Sc.

Profa. Marly Guimarães Fernandes Costa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2005

PLÁCIDO, MARISOL ELIAS DE BARROS

Sistemas Robotizados de Inspeção Interna
de Dutos [Rio de Janeiro] 2005

Xiv, 130 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Sistemas robotizados
2. Inspeção interna de dutos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus filhos João Luíz e Iasmin, com carinho.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus e a seu filho Jesus Cristo pela oportunidade, dos quais eu tirei forças nos momentos de maiores dificuldades.

À minha avozinha querida Diozolina, que esta junto de Deus, pelo amor e exemplo de vida.

Aos meus pais, Oscar e Ivonete, por toda a ajuda que me ofereceram, pelas palavras de incentivo nos momentos de dificuldades e principalmente por tudo o que fizeram e ainda fazem por mim e pela minha família.

Ao meu querido, Cristóvão Júnior, pelo amor, companheirismo, paciência, compreensão e apoio financeiro.

Aos meus lindos e amados filhos, João Luíz e Iasmin, pelos momentos de carinho e descontração, pois são a minha razão de viver.

Aos meus tios, Paulo e Glória, pela acolhida, pelo amor, pela palavra amiga e incentivo.

Aos meus primos, João Paulo, Jorge Henrique e ao meu tio Tião, pelos momentos de alegria e descontração.

Ao meu orientador, professor Fernando Lizarralde, pela paciência, compreensão e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Ramon Costa, pela coordenação do curso e pela paciência, pois esteve sempre disponível nos momentos de dúvidas e ajuda.

À SUFRAMA, pela iniciativa pioneira de formar e qualificar para a sociedade, profissionais nas diferentes áreas da Engenharia Elétrica.

À Prof. Marly Costa, pela coordenação do Mestrado na UFAM, que soube conduzir da melhor maneira as responsabilidades a ela conferida.

Aos colegas do laboratório de controle pela atenção e ajuda.

Aos meus amigos de curso, que contribuíram para realização deste trabalho e pela força.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SISTEMAS ROBOTIZADOS DE INSPEÇÃO INTERNA DE DUTOS

Marisol Elias de Barros Plácido

Outubro/2005

Orientadores: Fernando Cesar Lizarralde, D.Sc.

Ramon Romankevicius Costa, D.Sc.

Programa: Engenharia Elétrica

Redes de tubulações fazem parte da infraestrutura básica de cidades e indústrias. A operação das redes de tubulações dependem, em parte, da realização de uma manutenção adequada. Para garantir o correto funcionamento do sistema é necessário a realização de inspeções das condições internas das tubulações. Muitas vezes a inspeção pode ser realizada somente mediante a utilização de sistemas robotizados. Nesta dissertação foi realizado um levantamento dos principais sistemas robotizados de inspeção interna de dutos, sendo evidenciadas e descritas as suas características mais relevantes, tais como sistemas de sensoriamento, tipo de alimentação, tração e sistemas de controle. Com isto pretende-se auxiliar na especificação, no projeto e no desenvolvimento de um sistema robotizado de inspeção interna de dutos. Várias soluções robotizadas já existentes são analisadas e discutidas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ROBOTIC SYSTEM FOR PIPELINES INTERNAL INSPECTION

Marisol Elias de Barros Plácido

October/2005

Advisors: Fernando Cesar Lizarralde, D.Sc.

Ramon Romankevicius Costa, D.Sc.

Department: Electrical Engineering

Pipelines are part of the basic infrastructure of cities and industries. The pipeline operation depends, in part, of the accomplishment of an adequate maintenance. To guarantee the correct functioning of the system, inspections of the pipes internal conditions are necessary. In several cases, inspections can only be carried using robotics systems. In this dissertation, a survey of the most relevant robotics systems for pipeline internal inspection of ducts is presented, where the more relevant characteristics, such as measuring systems, power source, traction and control systems, are described. This work intends to assist in the specification, design and development of a robotic system for pipeline internal inspection. Some existing robotic solutions are also analyzed and discussed.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Metodologia	3
1.3 Visão geral do sistema	4
1.4 Classificação dos sistemas robotizados de inspeção de dutos	6
1.5 Organização da dissertação	8
2 Principais definições sobre tubulações	9
2.1 Introdução	9
2.2 Acessórios das tubulações	11
2.3 Aplicações das tubulações industriais	11
2.4 Tubulações e suas limitações	12
2.4.1 Limitação geométrica das tubulações	13
2.4.2 Projeto de um módulo de robôs de inspeção de acordo com configuração da tubulação	14
2.4.3 Força de contato na parede da tubulação	15
2.5 Conclusão	16
3 Módulo de instrumentação	17
3.1 Introdução	17
3.2 Sensoriamento	18
3.3 Caracterização dos sensores	18
3.4 Classificação dos sensores	21
3.5 Critérios para especificação dos sensores	24
3.6 Sensores de proximidade	26
3.6.1 Sensores ópticos	26
3.6.2 Sensores ultrassônicos	28
3.6.3 Sensores magnéticos de proximidade	32
3.6.4 Sensores indutivos	34
3.6.5 Sensores capacitivos	37
3.7 Sensores de posição	39
3.7.1 Potenciômetros de precisão	39

3.7.2	Encoders ópticos	40
3.8	Sensor de visão	43
3.9	Sensores comerciais	46
3.10	Conclusão	50
4	Módulos de tração utilizados em dutos	51
4.1	Introdução	51
4.2	Tipos de sistemas de tração para sistemas de inspeção interna de dutos	52
4.2.1	Tração baseada na pressão do fluido (PIG)	52
4.2.2	Tração baseada na utilização de hastes para gerar a propulsão .	54
4.2.3	Tração baseada em mecanismos de locomoção sobre seu corpo .	54
4.2.3.1	Tipo com rodas	54
4.2.3.2	Tipo <i>crawler</i> (esteira/trator)	54
4.2.3.3	Tipo com pernas	55
4.2.3.4	Tipo <i>inchworm</i> / lagarta	55
4.2.3.5	Sistemas mistos	56
4.3	Limitações	62
4.4	Módulos de tração disponíveis	62
4.5	Conclusão	65
5	Módulo de alimentação	67
5.1	Introdução	67
5.2	Alimentação via cabos	67
5.3	Alimentação feita sem a utilização de cabos	68
5.3.1	Pilhas	68
5.3.2	Baterias recarregáveis	68
5.3.3	Pilhas à combustível	70
5.4	Sistemas de alimentação comerciais	70
5.5	Conclusão	73
6	Sistema de controle	74
6.1	Introdução	74
6.2	Controle de movimento	77
6.3	Gerenciamento de comunicação	77
6.4	Microcontroladores	78
6.4.1	Definições importantes sobre microcontroladores	78
6.4.2	Famílias de microcontroladores	79
6.5	Interface com o operador	81
6.6	Conclusão	85
7	Exemplos de SRIIDs	86
7.1	Introdução	86
7.2	Robôs série Theuses	87
7.2.1	Sistema robótico THES I	89
7.2.2	Sistema robótico THES II	91
7.2.3	Sistema robótico THES III	94
7.3	Robôs série HELI-PIPE	96
7.3.1	Sistema robótico D-170	96

7.3.2	Sistema robótico D-40	97
7.3.3	Sistema robótico D-70/1	97
7.3.4	Sistema robótico D-70/2	98
7.4	Sistema robotizado pilotável para inspeção interna de redes urbanas de tubulação de gás	100
7.5	Robô para micro inspeção de dutos de uma polegada	106
7.6	Sistema robótico GIRINO	111
7.6.1	Princípio de locomoção do sistema GIRINO	111
7.6.2	Instrumentação do sistema GIRINO	112
7.6.3	Testes operacionais do sistema GIRINO	113
7.7	Conclusão	114
8	Estudo de caso - Inspeção interna em dutos de transporte óleo	116
8.1	Introdução	116
8.2	Identificação do problema	117
8.3	Limitações	118
8.4	Possíveis soluções	118
8.5	Escolha da instrumentação	119
8.6	Escolha da tração	120
8.7	Escolha do tipo de alimentação	121
8.8	Escolha do sistema de controle	123
8.9	Observações	124
9	Conclusão e trabalhos futuros	125
9.1	Propostas para trabalhos futuros	127
	Referências Bibliográficas	128

Lista de Figuras

1.1	Representação em blocos de um SRIID.	4
1.2	SRIID (Choi & Ryew 2002).	6
1.3	Classificação dos sistemas robotizados de inspeção interna de dutos (Roh & Choi 2005).	7
2.1	Segmento na região de cotovelo em uma tubulação (Choi & Ryew 2002).	14
3.1	Diagrama de um sensor/transdutor	19
3.2	Princípio da triangulação para detecção de distâncias	27
3.3	Sensores ópticos por reflexão ou difusão (OMRON)	27
3.4	Arranjo básico de uma medida ultrassônica	30
3.5	Princípio de funcionamento de um sensor ultrassônico	31
3.6	Sensores fim de curso- interruptores (OMRON)	33
3.7	Interruptor baseado no efeito <i>hall</i>	34
3.8	Utilização de um sensor indutivo para detectar metais	35
3.9	Imagem e diagrama de um sensor de proximidade indutivo	35
3.10	Diagrama de um sensor capacitivo e exemplo (OMRON)	37
3.11	Estrutura de controle de um sistema robotizado móvel	39
3.12	<i>Encoder</i> óptico incremental	42
3.13	<i>Encoder</i> absoluto	42
3.14	Representação esquemática de um sistema de visão	45
4.1	Mecanismos de locomoção dentro de uma tubulação (Hirose et al. 1999)	52
4.2	PIG desenvolvido pelo CENPES/RJ (Okamoto et al. 1999)	53
4.3	Exemplo de locomoção <i>inchworm</i> ou “lagarta” (Takahashi et al. 1993)	56
4.4	Unidade de segmento de um sistema <i>inchworm</i> ou “lagarta” (Takahashi et al. 1993)	57
4.5	Diagrama esquemático de locomoção helicoidal (Kagawa et al. 1999)	57
4.6	Relação do ângulo de inclinação das rodas em locomoção helicoidal	58
4.7	Vista de uma unidade de locomoção helicoidal (Hayashi, Iwatsuki & Iwashina 1995)	60
4.8	Forças contra a parede e constante elástica da mola (Choi & Ryew 2002)	60
6.1	Exemplo de uma estrutura de controle (Choi & Ryew 2002)	75
6.2	Sistemas de controle básico para sistemas robotizados de inspeção de dutos	76

6.3	Interface gráfica do usuário (GUI), (Choi & Ryew 2002)	82
6.4	Locomoção de um sistema robótico em região curva de uma tubulação (Choi & Ryew 2002)	83
6.5	Locomoção de um sistema robótico em uma região ramo de uma tubulação (Choi & Ryew 2002)	83
6.6	Pilotagem de um sistema robótico em uma região ramo de uma tubulação (Choi & Ryew 2002)	84
7.1	Sistemas robóticos do tipo convencional e “ <i>Whole Stem Drive</i> ” (Hirose et al. 1999)	89
7.2	Esquema do sistema robótico THES I (Hirose et al. 1999)	90
7.3	Foto do sistema robótico THES I (Hirose et al. 1999)	90
7.4	Exemplo da técnica “CTV” em sistemas robóticos de inspeção interna de dutos (Hirose et al. 1999)	91
7.5	Vista da unidade dirigível do sistema robótico THES II (Hirose et al. 1999)	92
7.6	Sistema robótico THES II inserido dentro de uma tubulação (Hirose et al. 1999)	93
7.7	Mecanismo de direção do sistema robótico THES II (Hirose et al. 1999)	93
7.8	Vista do sistema robótico THES III (CCV) (Hirose et al. 1999)	94
7.9	Foto do sistema robótico THES III (Hirose et al. 1999)	95
7.10	Arquitetura de dois corpos do sistema robótico D-170 (Horodince et al. 2002)	97
7.11	Arquitetura de três corpos para pequenos diâmetros do sistema robótico D-40 (Horodince et al. 2002)	98
7.12	Arquitetura do sistema robótico D-70/1 (Horodince et al. 2002)	98
7.13	Arquitetura do sistema robótico D-70/2 (Horodince et al. 2002)	99
7.14	Constituição do sistema robótico pilotável (Choi & Ryew 2002)	101
7.15	Veículo dirigível do sistema robotizado pilotável (Choi & Ryew 2002) .	104
7.16	Mecanismo de pernas com rodas do sistema robótico pilotável (Choi & Ryew 2002)	104
7.17	Detalhes do mecanismo de pilotagem do sistema robótico (Choi & Ryew 2002)	105
7.18	Configuração do micro sistema robotizado de inspeção (Suzumori et al. 1999)	107
7.19	Foto do micro sistema robotizado carregando um pequeno objeto dentro de um tubo de uma polegada (Suzumori et al. 1999)	107
7.20	Mecanismo de tração do micro sistema robotizado (Suzumori et al. 1999)	108
7.21	Micro motor eletromagnético (Suzumori et al. 1999)	109
7.22	Micro câmera CCD (Suzumori et al. 1999)	110
7.23	Esquema do sistema robotizado GIRINO (Reis 2001)	111
7.24	Locomoção do sistema robotizado GIRINO (Reis 2001)	112
8.1	Obstrução em rede de tubulação devido à parafina	116
8.2	Diagrama de desenvolvimento de um SRIID	117

Lista de Tabelas

2.1	Classificação das tubulações de acordo com sua finalidade.	11
3.1	Especificações importantes de um sensor	22
3.2	Materiais que compõem um sensor	23
3.3	Meios de detecção utilizados em um sensor	23
3.4	Fenômenos da conversão aplicados em sensoriamento	23
3.5	Campos onde são aplicados sensoriamentos	23
3.6	Norma internacional de utilização de sensores segundo o grau de proteção	25
3.7	Norma internacional de utilização de sensores segundo a classe de proteção	25
3.8	Características de sensores ópticos	29
3.9	Características de um sensor ultrassônico	32
3.10	Características de sensores magnéticos	34
3.11	Características de sensores indutivos	36
3.12	Características de sensores indutivos, série padrão	36
3.13	Valores de constantes dielétricas	38
3.14	Características de sensores capacitivos	38
3.15	Características de sensores de posição, tipo <i>encoders</i>	43
3.16	Sensores comerciais I	47
3.17	Sensores comerciais II	48
3.18	Sensores comerciais III	49
4.1	Módulos de tração à rodas com movimentos helicoidais	63
4.2	Módulos de PIGs	64
5.1	Vantagens e desvantagens das baterias de Níquel-Hidreto metálico em relação as baterias de Níquel Cádmio.	69
5.2	Quadro comparativo entre as baterias recarregáveis de Ni/Cd, NiMH e Li-íon	70
5.3	Pilhas/ baterias não recarregáveis de Li, SOCL ₂ /Li e Zn/AgO	71
5.4	Pilhas/ baterias recarregáveis de Ni/Cd, NiMH e Li-íon	72
7.1	Levantamento de sistemas robóticos de inspeção I	87
7.2	Levantamento de sistemas robóticos de inspeção II	88
7.3	Levantamento de sistemas robóticos de inspeção III	88
8.1	Instrumentação apropriada para o caso de estudo exemplificado	120

8.2	Tipos de alimentação por módulos	123
8.3	Possível configuração de um SRIID	124

Capítulo 1

Introdução

Recentemente a utilização de redes de tubulações tornou-se um elemento fundamental para a infra-estrutura urbana, sendo utilizadas com várias funções das quais podem ser citadas: distribuição de gás natural, oleodutos, redes de esgoto e refrigeração. Considerando o fato que algumas destas redes de tubulações estão em meio de difícil acesso, enterradas no solo, podem surgir danos na parede da tubulação, ocasionados devido a umidade do solo. Pode também ser verificado rachaduras existentes nas soldas além de outros danos ocasionados por fatores tais como obras da construção civil (Choi & Ryew 2002). Surge daí a necessidade de haver uma manutenção preventiva e inspeção destas redes de tubulações.

Para se realizar uma inspeção no interior de um duto, leva-se em consideração uma série de necessidades a serem superadas, tais como: um equipamento que possua a capacidade para percorrer livremente o interior da tubulação, e também uma série de situações das quais podem ser citadas:

1. Algumas tubulações estão situadas em locais de difícil acesso como por exemplo sob o solo;
2. Algumas redes possuem sua configuração altamente complicada, possuindo muitas juntas soldadas, além de um conjunto de cotovelos, ramos, válvulas e trajetórias verticais;
3. Superfícies altamente restritas, devido ao acúmulo de materiais que passam a

servir de obstáculos;

4. Existe também uma grande variação de diâmetros dentro de uma rede, que pode impossibilitar o percurso do equipamento dentro da tubulação (Choi & Ryew 2002).

Atualmente existem vários tipos de sistemas robóticos atuando em inspeção de dutos, mas estes não competem com êxito nas situações acima. Por exemplo, alguns destes sistemas robóticos possuem um sistema de tração a rodas, compostas de molas e elos, que são pressionadas contra as paredes da tubulação, alguns destes sistemas podem ser aproximados a uma estrutura em formato de tesoura possuindo três rodas, uma na junta e outras no final dos dois membros (Neubaeuer 1994), mais especificamente, o tipo de robô que se utiliza deste sistema é chamado *MOGRER* (Okada & Sanemori 1987) e já é utilizado comercialmente. Existem também sistemas móveis com rodas magnéticas e sistemas de inspeção articulados, com três graus de liberdade, além dos sistemas que podem ser utilizados na construção civil (Weston 2000). Um outro tipo de sistema robótico de inspeção que pode ser citado é o chamado *GIRINO* (Reis 2001) desenvolvido pelo CENPES/Petrobrás. Este foi criado a partir da necessidade de uma inspeção contínua em dutos submarinos devido a entupimentos ocasionados por parafina. Devido às baixas temperaturas do oceano, a parafina existente no petróleo se cristaliza e acumula-se na parede da tubulação. Com o tempo, a massa pode bloquear o fluxo de óleo. O movimento deste sistema robotizado, “GIRINO”, é baseado nos anfíbios, sendo acionado por sistemas hidráulicos, este pode se deslocar independente do sentido do fluido. Existem também nesta área os sistemas de inspeção conhecidos como *PIG*, que se locomovem passivamente no interior de uma tubulação, sendo impulsionados pela pressão do fluido transportado na mesma. Estes sistemas basicamente são constituídos por: discos de borracha espalhados ao longo do corpo do robô, com o objetivo de gerar a propulsão; sensores, transdutores e baterias. Esse tipo de sistema inspeção não será considerado neste trabalho.

A aplicação de sistemas robotizados de inspeção interna de dutos deve obedecer algumas condições, tais como:

- o robô deve possuir uma grande flexibilidade, dependendo da configuração da tubulação;

- em determinadas situações deve possuir a capacidade de ser pilotado;
- deve ser capaz de arrastar os seus cabos, e se for o caso, realizar trajetórias verticais, tendo para isto força de tração suficiente (Choi & Ryew 2002);
- deve possuir capacidade de sensoriamento e visão.

Nesta dissertação será utilizada a abreviação SRIID para, Sistemas Robotizados de Inspeção Interna de Dutos.

1.1 Objetivos

O presente trabalho é de cunho tecnológico e possui os seguintes objetivos:

1. Reunir e classificar os sistemas robotizados existentes de acordo com suas aplicações e características;
2. Especificar alguns dos parâmetros importantes em robôs de inspeção de dutos, bem como uma listagem destes equipamentos e seus fornecedores;
3. Mostrar um exemplo de aplicação de sistemas robotizados de inspeção interna de dutos;
4. Facilitar a busca, o desenvolvimento ou a escolha de um sistema robotizado de inspeção de acordo com as restrições físicas, características do meio e o objetivo da inspeção;
5. Mostrar um estudo de caso, para um sistema robotizado de inspeção interna de dutos, em uma aplicação específica.

1.2 Metodologia

A metodologia empregada foi a seguinte:

- Foi realizado um levantamento atual dos sistemas robotizados existentes na área de inspeção interna de dutos;
- Foi realizada uma classificação destes sistemas robóticos conforme sua aplicação e funcionamento;
- Foram especificados alguns parâmetros importantes para o desenvolvimento de um sistema robotizado de inspeção interna de dutos;
- Foi realizado um levantamento de dispositivos, tais como sensores, sistemas de tração, alimentação, controladores e seus respectivos fabricantes.

1.3 Visão geral do sistema

O estudo de sistemas robotizados capazes de realizar inspeção interna em dutos surgiu da necessidade de haver constantes inspeções e manutenção preventiva em redes de tubulações importantes à infra-estrutura urbana e à indústria, onde não existe a possibilidade de se realizar uma inspeção com a presença humana.

Geralmente estes sistemas robotizados de inspeção são divididos em módulos, de acordo com a sua aplicação, conforme pode ser visto no diagrama em blocos mostrado na figura 1.1.

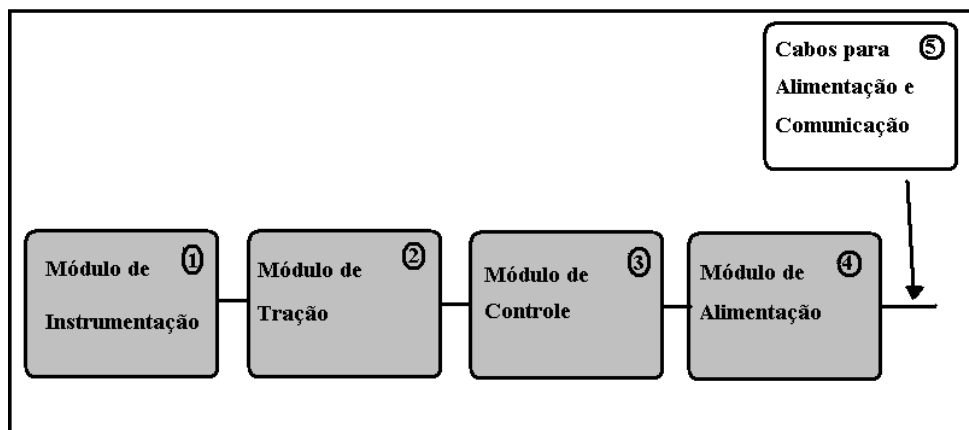


FIGURA 1.1: Representação em blocos de um SRIID.

Na figura 1.1 os módulos podem ser classificados como:

1. *Módulo de instrumentação*: é neste módulo que estão localizados elementos tais como sensores, câmeras e, em alguns casos específicos atuadores;
2. *Módulo de tração*: é a parte do sistema responsável pela locomoção no interior do duto. Pode ser do tipo com rodas, com pernas, esteira (*Crawler*) (Bruce, William, Tsuzuki, Buiochi & Camerini 1993) e *inchworm*, baseado no movimento natural de animais rastejantes (Takahashi, Hayashi, Iwatsuki, Suzumori & Ohki 1993). É neste módulo que está localizado o driver do motor do robô. Um sistema robotizado de inspeção pode possuir mais módulo de tração, dependendo da necessidade particular de cada projeto, ou seja, em tubulações de configuração simples, verticais ou horizontais, um único módulo de tração seria o suficiente, mas em configurações mais complexas pode haver a necessidade de mais de um módulo de tração;
3. *Módulo de controle*: é a parte responsável pelo controle de alimentação e de comunicação(ou gerenciamento de comunicação entre o módulo de instrumentação e uma estação terrestre, feito remotamente ou através de cabos). É responsável também pelo controle de movimento do robô, onde será capaz de realizar decisões tais como: realizar o percurso para frente ou para trás;
4. *Módulo de alimentação*: é o módulo responsável pela autonomia do robô, no que se refere a alimentação do mesmo. Pode ser um módulo opcional se houver alimentação através de cabos;
5. Cabos de alimentação e comunicação.

A figura 1.2 mostra um sistema robotizado de inspeção interna de dutos, SRIID, que é utilizado em tubulações de configuração complexa (tubulações que possuem trajetórias verticais, horizontais, e que possuem bastante ramificações). Este sistema possui alimentação e comunicação de dados via cabos, além de possuir dois módulos de instrumentação, no qual é utilizado um sensor de visão CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) e dois módulos de tração (Choi & Ryew 2002).

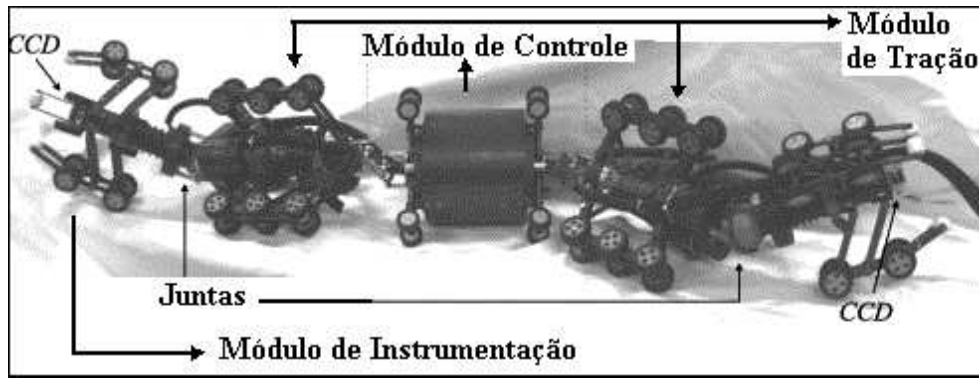


FIGURA 1.2: SRIID (Choi & Ryew 2002).

1.4 Classificação dos sistemas robotizados de inspeção de dutos

Os sistemas robotizados de inspeção interna de dutos desenvolvidos até os dias atuais podem ser classificados segundo o seu tipo de tração (Roh & Choi 2005), conforme pode ser observado na figura 1.3.

1. Como pode ser visto na figura 1.3(a), o tipo *PIG* é um dos sistemas robotizados de inspeção interna mais conhecidos. É dirigido pela pressão passiva do fluido dentro das redes de tubulação. Este tipo é geralmente mais empregado em inspeção de redes de tubulações com diâmetros relativamente grandes (Okamoto, Adamowski, Tsuzuki, Buiochi & Camerini 1999);
2. O tipo com rodas ilustrado na figura 1.3(b) é o mais comumente utilizado;
3. O tipo ilustrado na Figura 1.3(c) mostra um sistemas robotizado com tração tipo *crawler* (ou esteira) (Bruce et al. 1993);
4. O tipo ilustrado na Figura 1.3(d) exerce uma pressão na parede da tubulação, para ter a vantagem de realizar trajetórias verticais. É um mecanismo flexível, permitindo realizar trajetórias em tubulações com variações de diâmetros (Choi & Ryew 2002);

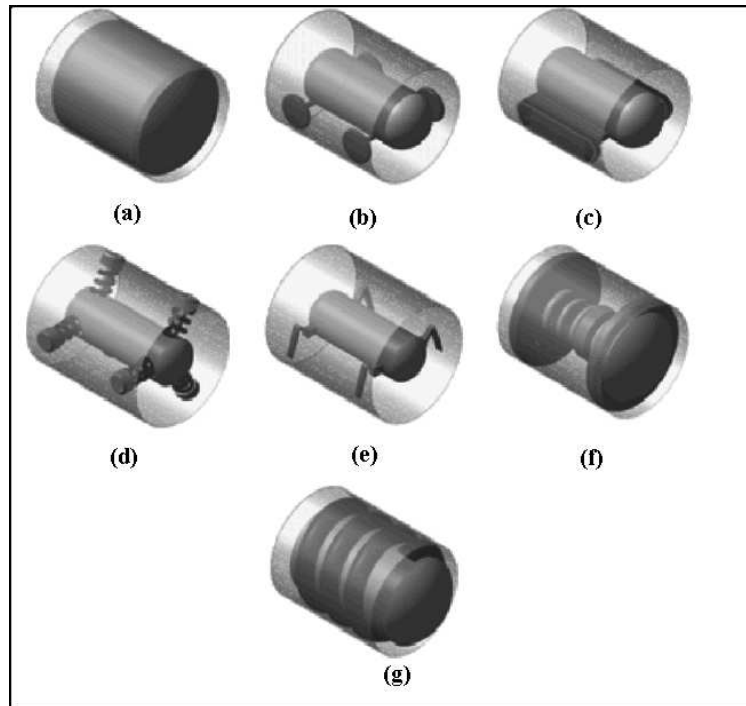


FIGURA 1.3: Classificação dos sistemas robotizados de inspeção interna de dutos (Roh & Choi 2005).

5. Como mostrado na figura 1.3(e), este tipo possui os pés articulados e pode produzir movimentos altamente sofisticados;
6. O tipo da figura 1.3(f) é o chamado *inchworm*, que é empregado geralmente para os encanamentos com diâmetros pequenos (Takahashi et al. 1993);
7. O tipo helicoidal, ilustrado na figura 1.3(g) realiza um movimento de mesmo nome dentro da tubulação enquanto avança no interior da rede de tubulação (Hirose, Ohno, Mitsui & Suyama 1999),(Horodinca, Doroftei, Mignon & Preumont 2002).

A maioria dos sistemas robotizados de inspeção interna de dutos empregam um mecanismo de locomoção derivado de um dos tipos básicos de movimento anteriormente mencionados, ou até mesmo suas combinações (Roh & Choi 2005).

1.5 Organização da dissertação

O restante desta dissertação está dividida em 8 capítulos, um breve resumo é apresentado a seguir:

O capítulo 2 aborda as principais definições utilizadas em tubulações, além de mostrar algumas limitações existentes nas tubulações, tais como, suas restrições físicas e condições de funcionamento.

O capítulo 3 aborda o módulo de instrumentação de um SRIID. O módulo de instrumentação é utilizado para tarefas de navegação e monitoramento, sendo responsável pela realização de medições no interior da rede de tubulação. No final deste capítulo serão fornecidas em tabelas uma série de dispositivos sensores relacionados a este módulo.

O capítulo 4 aborda o módulo de tração de um SRIID. Este módulo é o responsável pela locomoção do sistema no interior do duto. No final deste capítulo serão fornecidas alguns dispositivos de tração que podem ser utilizados em SRIID.

O capítulo 5 aborda o módulo de alimentação de um SRIID. Este módulo é o responsável pelo funcionamento dos dispositivos do módulo de instrumentação, dos dispositivos do módulo de controle e pelo funcionamento do módulo de tração.

O capítulo 6 aborda o módulo de controle de um SRIID. Este é responsável pelo controle de movimento do sistema robotizado e pelo gerenciamento de comunicação do sistema robotizado com uma estação terrestre.

O Capítulo 7 aborda uma série de SRIIDs, ressaltando as suas aplicações e algumas de suas características.

O capítulo 8 apresenta um estudo de caso, exemplificando a utilização de um SRIID em um caso prático.

O capítulo 9 apresenta a conclusão geral deste trabalho.

Capítulo 2

Principais definições sobre tubulações

2.1 Introdução

Tubos são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de gases e fluidos. A maioria dos tubos são de seção circular, como cilindros ocos, sendo que existe alguns de seção retangular, como, por exemplo, os dutos de ar condicionado. Existe uma grande maioria destes que funciona como “conduto forçado”, ou seja, sem superfície livre, com o fluido tomando toda área de seção transversal, uma exceção são as tubulações de esgoto e canais de água (Telles & Barros 1993).

Chama-se de “tubulação” um conjunto de tubos e seus diversos acessórios.

A grande importância e necessidade da existência dos tubos, provém principalmente do fato que o ponto de geração ou de armazenagem dos fluidos está, em geral, distante do seu ponto de utilização.

Usam-se tubos para o transporte de todos os fluidos conhecidos, líquidos ou gasosos, assim como para materiais pastosos e para fluidos com sólidos em suspensão, em toda faixa de variação de pressão e temperatura: desde o vácuo absoluto até cerca de $6000\text{Kg}/\text{cm}^2$, e desde próximo do zero absoluto até as temperaturas dos metais em fusão.

A importância dos tubos na indústria é muito grande, sendo um dos componentes

industriais de uso mais generalizado. O valor da tubulação representa em média 50 a 70% do valor de todos os equipamentos de uma indústria de processamento, e 15 a 20% do custo total da instalação.

Normalmente são chamados de tubos (ou vulgarmente canos) apenas os condutos rígidos, mas é importante salientar a existência de “tubos flexíveis”. Na nomenclatura americana os tubos são conhecidos como *Pipe* ou *Tube*, sendo que entre estes dois termos não existe uma distinção muito rígida. De forma geral o termo *pipe* é usado para os tubos cuja função é propriamente conduzir fluidos, enquanto que o termo *tube* é utilizado para os tubos destinados primordialmente a outras funções, tais como, trocas de calor, conduzir sinais e até mesmo os que funcionam como vigas ou elementos estruturais, dentre outros.

Pela “Comisión Pan-Americana de Normas Técnicas” (COPANT) recomenda-se que se denomine de “Tubo para condução” o tubo destinado ao transporte de fluído, e que se chame simplesmente “tubo” o que se destina a qualquer outra finalidade (Telles & Barros 1993).

2.2 Acessórios das tubulações

Pode-se verificar na tabela 2.1 a seguinte classificação, de acordo com as finalidades e tipos dos principais acessórios de tubulações.

TABELA 2.1: Classificação das tubulações de acordo com sua finalidade.

Finalidade	Tipos
1. Fazer mudanças de direção em tubos	Curvas de raio longo; de raio curto; de 22 e 1/2, 45°, 90° e 180° de redução, Joelhos, Joelhos de redução.
2. Fazer derivações em tubos	Tês normais de 90° e de 45° Peças em Y, Cruzetas, Cruzetas de redução, Selas, Colares, Anéis de reforço.
3. Variações de diâmetro em tubos	Reduções concêntricas, Reduções excêntricas, Reduções bucha.
4. Fazer ligações de tubos entre si	Luvas, Uniões, Flanges, Virolas.
5. Fechamento da extremidade de tubos	Tampões, Bujões, Flanges cegos e válvulas.

2.3 Aplicações das tubulações industriais

Existe uma grande variedade de casos de aplicações de tubulações. Sem pretender dar uma classificação que abranja todos os casos, pode-se classificar as tubulações industriais nas seguintes classes principais, conforme seu emprego (Telles & Barros 1993).

Definições:

- Tubulações de processo: são tubulações cujo fluido constitui a finalidade básica da indústria, nas indústrias cuja atividade é o processamento, a armazenagem ou a distribuição de fluidos. Como por exemplo: as tubulações de óleo em refinarias, terminais e instalações de armazenagens ou distribuição de produtos de petróleo,

tubulações de vapor em centrais termelétricas, tubulações de produtos químicos em indústrias químicas, etc;

- Tubulações de utilidades: são tubulações de fluidos auxiliares na indústria. Mas podem também servir não somente à indústria propriamente dita, como em sistemas de refrigeração, aquecimento ou vapor para acionamento de máquinas, como também a outras finalidades normais ou eventuais, tais como: manutenção, limpeza, combate a incêndio, etc. Costumam constituir tubulações de utilidades as redes de água doce, água salgada, vapor condensado e ar comprimido, nas indústrias em geral;
- Tubulações de instrumentação/hidráulicas: são tubulações para a transmissão de sinais pneumáticos ou hidráulicos para válvulas de controle e instrumentos automáticos e também pequenas tubulações, de fluidos diversos, para os instrumentos automáticos. Este tipo de tubulação não é destinado a transporte de fluidos;
- Tubulações de drenagens: são redes encarregadas de coletar e conduzir ao destino conveniente os diversos efluentes fluidos de uma instalação industrial;
- Tubulações de transporte: são os troncos empregados para o transporte de líquidos e de gases a longas distâncias, fora de instalações industriais. Estão inclusas nessa classe as adutoras de água, tubulações de transporte de óleo e gases (oleodutos e gasodutos) e os coletores de drenagem;
- Tubulações de distribuição: são redes ramificadas fora de instalações industriais; podem ser de distribuição propriamente dita (água, vapor, etc.) quando o fluxo se dá em direção às extremidades dos ramais, e de coleta (drenagem, esgotos, etc.) quando o fluxo se dá em direção às linhas-tronco.

2.4 Tubulações e suas limitações

O uso de tubulações vem crescendo rapidamente desde quando o uso do gás natural tornou-se uma importante fonte de energia. Geralmente, as tubulações de gás

contêm gases inflamáveis de alta pressão, que podem ocasionar grandes acidentes, em caso de vazamentos. Sendo a maioria das redes de tubulação alocadas sob a terra, a sua manutenção após a construção transforma-se em um dos problemas principais das indústrias do gás. Uma rede de tubulação completa é formada por redes principais (ou tubulações de transporte) e por redes distribuidoras (tubulações de distribuição).

As tubulações principais/ transporte, fornecem gás, água ou óleo de uma localidade base até as cidades maiores. Estas tubulações possuem configuração bastante simples e fáceis de prestar serviços de manutenção, já existindo, então, alguns sistemas de inspeção para estas tubulações. Por outro lado, ainda é um desafio criar algum método adequado para se realizar inspeção para as redes de distribuição, que são geralmente de diâmetro pequeno e de configuração mais complexas (Choi, Ryew & Sunghwi 1999).

2.4.1 Limitação geométrica das tubulações

Uma configuração típica de redes de tubulações é constituída principalmente de dutos verticais, cotovelos, ramificações, redutores, válvulas, além da própria superfície de contato interna da tubulação. A maioria dos sistemas robotizados de inspeção interna de dutos realiza facilmente trajetórias no interior dos dutos, escalando e descendo trechos com inclinação de até 30° . Percorrer dutos verticais é a parte mais difícil, e poucos robôs executam este tipo de tarefa.

Algumas tubulações possuem configurações que oferecem limitações geométricas. Por esse motivo um robô de inspeção de duto deve ser projetado também levando-se em conta essas restrições. Assim, pode-se garantir uma boa execução do movimento do robô dentro da tubulação, sem correr o risco de o robô ficar preso em cotovelos, ou curvas, na tubulação.

De fato, uma curva (cotovelo) regular de uma tubulação apresenta menos que o inverso de 1,5 vezes o seu diâmetro ($D/1,5$). Desta forma cada segmento do robô deve estar dentro deste padrão para realizar uma trajetória em regiões do cotovelo sem correr o risco do robô ficar preso.

2.4.2 Projeto de um módulo de robôs de inspeção de acordo com configuração da tubulação

No projeto de um módulo de um robô de inspeção de dutos, vamos considerar um cotovelo de ângulo reto, o módulo deve ser projetado, inicialmente, como um segmento cilíndrico, conforme pode ser visualizado na figura 2.1. Então, o robô como um todo, pode ser considerado como sendo vários segmentos cilíndricos unidos, de onde pode-se derivar relações envolvendo o diâmetro da tubulação, curvatura, e o tamanho do segmento. Conforme pode ser observado na figura 2.1, o pior momento é quando o segmento cilíndrico está posicionado com uma inclinação de 45° . Neste caso pode-se ter duas situações: (a) a largura do segmento w é relativamente menor que a altura h e ambas as extremidades do segmento estão localizadas nas partes retas do cotovelo. (b) ambas as extremidades do segmento estão localizadas na parte curva do cotovelo. Dependendo da situação, podem ser derivadas equações restritas para o projeto das dimensões de um segmento robótico (Choi & Ryew 2002).

Para a situação (a) a largura w pode ser derivada como se segue

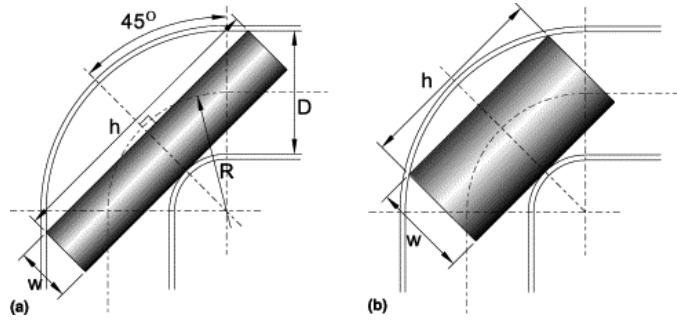


FIGURA 2.1: Segmento na região de cotovelo em uma tubulação (Choi & Ryew 2002).

$$0 < w \leq (R + D/2) \sin \pi/4 - (R - D/2) \quad (2.1)$$

onde D é o diâmetro da tubulação e R representa o raio da curvatura. Desta forma o comprimento máximo, h , que o segmento pode ter, é dado por

$$h = 2\sqrt{2}\{D/2 + R - (R - D/2 + w) \cos \pi/4\} \quad (2.2)$$

Para a situação (b), ambas as extremidades estão localizadas na parte curva do cotovelo da tubulação. Desta forma o comprimento da largura w é dado por

$$\{(R + D/2) \sin \pi/4 - (R - D/2)\} < w < D \quad (2.3)$$

e o máximo valor de h torna-se,

$$h = 2\sqrt{(D/2 + R)^2 - (R - D/2 + w)^2} \quad (2.4)$$

As equações (2.2) e (2.4) representam as restrições básicas que podem ser encontradas em regiões de cotovelos e são utilizadas para o dimensionamento de corpos de robôs de inspeção interna de dutos.

2.4.3 Força de contato na parede da tubulação

Uma característica importante em projetos de inspeção interna de dutos é como obter força de tração suficiente para o robô de inspeção puxar ao longo de sua trajetória seus cabos, bem como seu próprio peso, especialmente em trajetórias verticais.

Em trajetórias verticais é desejável controlar a força de pressão das rodas na parede e assegurar forças de tração suficiente para manter o robô, pois forças excessivas podem consumir energia e danificar o mecanismo, e a falta desta, pode deixar o robô escorregar (Choi et al. 1999).

Com o intuito de resolver este problema, utilizam-se de uma técnica denominada “CVT ” ou “Transmissão continuamente variável” (Hirose et al. 1999), conforme pode ser verificado no capítulo 4, na figura 4.4. Esta técnica faz com que, quanto maior for a carga do sistema robotizado, maior será o seu raio e maior será a força de contato na parede da tubulação. Como resultado o sistema robotizado obterá uma menor velocidade de deslocamento mas atingirá uma maior força de contato, aumentando a possibilidade de não ocorrer algum imprevisto decorrente deste tipo de situação.

2.5 Conclusão

Em projetos de sistemas robotizados de inspeção de dutos, dados relativos à rede de tubulação ao qual este será empregado, são bastante úteis. Como foi verificado, dependendo da rede de tubulação, a realização de uma inspeção interna pode ser uma tarefa fácil ou bastante difícil. Este fato está diretamente relacionado: ao material que é transportado dentro da tubulação (pois considerando isto, o projeto do módulo de tração será feito de modo a se obter tração o suficiente para o robô não deslizar em trajetórias verticais); a configuração da tubulação, simples ou complexa; e ao projeto dos módulos do robô, pois como visto na seção 2.3.2 as dimensões de cada módulo do robô são relacionadas às medidas de raio, diâmetro e curvaturas nas tubulações. Um SRIID projetado segundo as características da tubulação ao qual serão aplicados possuem mais chances de realizar a inspeção com menor probabilidade de o robô ficar preso dentro da tubulação ou escorregar em trajetórias verticais.

Capítulo 3

Módulo de instrumentação

3.1 Introdução

Conforme mostrado no capítulo introdutório deste trabalho, um sistema robotizado de inspeção de dutos pode ser dividido em módulos, tais como: módulo de instrumentação; módulo de tração; módulo de alimentação e sistema de controle.

Logo, em se tratando de desenvolvimento de sistemas similares, estas características devem ser levadas em consideração. Este capítulo será dedicado ao módulo de instrumentação de um SRIID. Serão mostrados alguns equipamentos e suas principais características.

O módulo de instrumentação é utilizado para tarefas de navegação e monitoramento, sendo responsável pela realização de medições no interior da rede de tubulação. É neste módulo que ficam localizados elementos tais como sensores, câmeras e, em alguns casos específicos, atuadores. Os dados provenientes deste módulo são utilizados para uma locomoção correta do robô no interior da tubulação, com a finalidade de monitorar o interior da mesma e assim evitar acidentes com o robô.

3.2 Sensoriamento

A utilização de sensores em robôs de inspeção interna de dutos é importante devido à necessidade de se obter informações, como:

- Dados de localização do robô na tubulação, por exemplo, distância percorrida e profundidade;
- Detecção de obstáculos ou obstruções no interior do duto;
- Monitoramento do ambiente em questão.

Para isto, é importante que um sistema robotizado de inspeção possua ao menos um sensor atuante, tais como, sensores de obstáculos, sensores de proximidade guiados por infravermelho ou ultra-som e encoders, que pode ser ligado às rodas do sistema robotizado.

Nas seções próximas, diferentes tipos de sensores serão enumerados de acordo com suas funções e princípio de funcionamento, estando em destaque suas principais características e aplicações.

3.3 Caracterização dos sensores

Um sensor pode ser definido como um transdutor que altera a sua característica física interna devido a um fenômeno físico externo. Este muda seu comportamento sob a ação de uma grandeza física, podendo fornecer direta ou indiretamente um sinal que indica esta grandeza, converte uma quantidade física em um sinal elétrico (Dally, Riley & McConnell 1993). Quando opera diretamente, sob a mesma fonte de energia, é chamado de transdutor.

Um sensor, ver figura 3.1, recebe um sinal ou um estímulo e responde com um sinal elétrico, que pode ser correlacionado com o estímulo. Existe um princípio ativo para converter uma determinada quantidade, propriedade ou estado, em uma outra, passível de tratamento elétrico (Pires 2004).

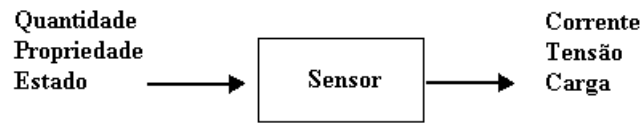


FIGURA 3.1: Diagrama de um sensor/transdutor

O sinal de entrada pode ser uma quantidade, uma propriedade ou um estado, que o sensor converte em uma quantidade elétrica (carga, tensão ou corrente) e que pode ser amplificada e modificada por circuitos eletrônicos de aquisição e controle.

O processo de medição utiliza sensores acoplados a sistemas de aquisição. Esses sistemas convertem o sinal do sensor num formato digital tratável por um computador, o qual pode gerar, de acordo com o programa de controle adaptado, os sinais para os dispositivos que atuam no processo, no sentido de fazer com que este siga um determinado comportamento (Pires 2004).

Um diagrama de sistema de aquisição e controle genérico pode ser representado por vários tipos de sensores, onde se incluem circuitos de condicionamento de sinais, multiplexadores, conversores analógicos- digitais e digitais- analógicos, circuitos de ganho e de potência para atuadores e periféricos.

Um sensor pode ser encarado como uma “caixa preta ” em que nos interessa somente a relação entre a entrada e a saída. A função que descreve a saída (Y) com relação a entrada (X) denomina-se *função de transferência* (F). De uma maneira geral a função de transferência reflete o comportamento ideal do sensor, no entanto, os sensores devido a sua construção, materiais usados, imperfeições, etc., tem um comportamento real que se afasta do ideal. Por essa razão é preciso conhecer esses desvios, usando um conjunto de características que os descrevem com precisão, dos quais os mais conhecidos são:

Gama (Input Full Scale)

A gama é o domínio de valores que podem ser convertidos pelo sensor. É representada por um valor máximo e por um valor mínimo, os quais representam os valores extremos que, aplicados à entrada do sensor, não produzem erros inaceitáveis. Para

sensores com gamas elevadas utiliza-se o conceito de decibel (dB) para representá-lo, visto que permite obter números mais compactos.

Para valores de potência: $1\text{dB}=10*\log(P2/P1)$.

Para valores de força, tensão ou corrente: $1\text{ dB}=20*\log(S2/S1)$.

Assim, o gama pode ser representado por:

$$\text{Gama} = [X_{min}, X_{max}]$$

$$\text{Gama} = [10\log X_{min}, 10\log X_{max}] \text{ ou } [20\log X_{min}, 20\log X_{max}]$$

Se o valor no mínimo for zero, então não se representa e diz somente que gama é N dB, onde N representa o valor em decibéis do quociente para o valor X_{max} .

Fundo de escala (Output Full Scale)

O fundo de escala (FS) é a diferença algébrica entre os valores de saída do sensor para o valor máximo de gama, e para o valor mínimo de gama, respectivamente. Assim:

$$\text{FS} = [X_{max} * \text{Fr}(X_{max}) - X_{min} * \text{Fr}(X_{min})]$$

Pode-se notar que é necessário incluir todos os desvios da função de transferência ideal, isto é, Fr é a função de transferência real do sensor. Ou seja, é a diferença entre os valores obtidos na saída do sensor, quando se coloca à entrada o valor mínimo e o valor máximo da gama de entrada, respectivamente (Pires 2004).

Sensibilidade

É a relação entre a variação da saída e a variação da entrada:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

Exatidão (Accuracy)

Esta é uma característica importante e que, normalmente, é apresentada como inexatidão (*inaccuracy*). A inexatidão não é mais do que a diferença entre um valor qualquer obtido pelo sensor e o respectivo valor, verdadeiro ou ideal. O valor de inexatidão tem de ser verdadeiro para todo gama, embora, em alguns tipos de sensores, o fabricante apresente a inexatidão para vários intervalos de gama.

A inexatidão de um sensor resulta de muitos efeitos que se conjugam: variações devido à construção, histerese, zona morta, calibração e repetibilidade. Assim, o mesmo

sensor pode apresentar valores diferentes para a mesma entrada, tudo dependendo da forma e das condições em que é feita a medida. Consequentemente, a inexatidão não comporta um máximo e um mínimo, isto é, para uma determinada medida é apresentada um gama de inexatidão ou erro, no interior do qual está o verdadeiro valor da medida. Assim, uma medida só faz sentido quando apresentada com o respectivo gama de inexatidão. A inexatidão pode ainda ser apresentada como uma porcentagem do gama do sensor ou em termos do sinal de entrada (Pires 2004).

3.4 Classificação dos sensores

A escala de classificação de sensores varia da mais simples a mais complexa. Dependendo da proposta, diferentes critérios de classificação podem ser selecionados. Todos os sensores podem ser de dois tipos: **passivos** e **ativos**. Um sensor *passivo* não necessita de qualquer fonte de energia adicional e garante diretamente um sinal elétrico em resposta a um estímulo externo; isto é, a energia do estímulo de entrada é convertida pelo sensor no sinal de saída, como exemplo tem se, os Sensores de temperatura (*Thermocouples*), Fotodiodos e sensores Piezoelétricos. A maioria dos sensores passivos são sensores diretos como foi definido. Os sensores *ativos* necessitam de força externa para sua operação, chamada sinal de excitação. Este sinal é modificado pelo sensor produzindo um sinal de saída. Sensores ativos são comumente chamados de paramétricos porque suas propriedades mudam em resposta a um efeito externo e estas propriedades podem ser, subseqüentemente, convertidas em sinais elétricos (Fraden 2003). Isto pode indicar que o parâmetro de um sensor modula o sinal da excitação e que esta modulação carrega a informação do valor medido. Por exemplo, um termistor é um resistor sensível a temperatura, ele não gera qualquer sinal elétrico, mas passando-se uma corrente elétrica através dele sua resistência pode ser medida pela detecção da variação da voltagem através do termistor. Estas variações estão relacionadas diretamente à temperatura através de uma função geralmente conhecida.

Os sensores também podem ser classificados como **absolutos** ou **relativos**. Um sensor *absoluto* detecta um estímulo referente a uma escala física absoluta, que é independente das condições de medida, enquanto um sensor relativo produz um sinal que

é relacionado a alguns casos especiais. Um termistor também é um exemplo de sensor absoluto, sua resistência elétrica é diretamente relacionada à temperatura em escala absoluta em Kelvin. Outro sensor de temperatura, muito popular, é o *thermocouple*, sendo este um sensor relativo, ele produz uma voltagem elétrica que é função do gradiente da temperatura através das ligações do *thermocouple*. Assim, o sinal de saída de um *thermocouple* pode não ser relacionado a qualquer temperatura em particular, sem ter referência a uma linha de base conhecida. Um outro exemplo de sensores absolutos e relativos é um sensor de pressão. Um sensor de pressão absoluto produz um sinal referente a um vácuo, um zero absoluto em relação a escala de pressão. Um sensor de pressão relativo produz um sinal que diz respeito a uma relacionada linha de dados, não sendo pressão zero (por exemplo, a pressão atmosférica) (Fraden 2003).

Um sensor pode ser também classificado como **analógico** ou **digital**. Um sensor analógico produz continuamente uma grande faixa de variação. No caso de uma fotocélula, por exemplo, essa faixa de variação vai de 1 k Ω para a situação brilhante até 300k Ω para a situação de escuro total. Já no caso de um sensor digital, tem se dois estados, o 0 e o 1. No caso de um sensor de toque, esses valores representam a chave pressionada ou não.

Outra forma de se classificar um sensor é considerando todas as suas propriedades, como o que ele mede (estímulo), as suas especificações, qual fenômeno físico ele é sensível, quais mecanismos de conversão ele utiliza, qual é o material que ele é constituído e qual é o seu campo de aplicação. As tabelas 3.1 até 3.5, mostram um esquema de classificação bastante amplo e representativo (White 1991).

TABELA 3.1: Especificações importantes de um sensor

Sensibilidade	Escala de estímulo
Estabilidade (curto e longo prazo)	Resolução
Exatidão	Seletividade
Velocidade de Resposta	Condições ambientais
Características de Sobrecarga	Linearidade
Histerese	Banda inoperante
Vida Útil	Formato da saída
Custo, Tamanho e Massa	Outros

TABELA 3.2: Materiais que compõem um sensor

Inorgânico	Orgânico
Condutor	Isolante
Semicondutor	Líquido, gás ou plasma
Substância Biológica	Outros

TABELA 3.3: Meios de detecção utilizados em um sensor

<p> Biológico Químico Elétrico, Magnético ou Ondas Eletromagnéticas Temperatura, Calor Deslocamento Mecânico Radiação, radioatividade Outros </p>

TABELA 3.4: Fenômenos da conversão aplicados em sensoriamento

Físicos	Químicos
Termo Elétrico	Transformação Química
Foto Elétrico	Transformação Física
Foto Magnético	Processo Eletroquímico
Magnético Elétrico	Espectroscópio
Eletro Magnético	Outros
Termo Elástico	Biológico
Eletro Elástico	Transformação Biológica
Termo Magnético	Transformação Física
Termo Óptico	Efeito no Organismo de Teste
Foto Elástico	Espectroscópio
Outros	Outros

TABELA 3.5: Campos onde são aplicados sensoriamentos

<p> Agricultura Engenharia Civil, Construção Distribuição, Comércio e Finanças Energia, Força Saúde e Medicina Manufatura Militar Medida Científica Transportação </p>	<p> Automotivo Dispositivos Domésticos Ambiente, Meteorologia, Segurança Informação e Telecomunicação Marinha Recreação e Jogos Espaço Outros </p>
--	---

3.5 Critérios para especificação dos sensores

Variáveis de Medida

Os sinais são informações que podem representar valores ou uma variação de uma grandeza física, e podem ser classificados de acordo com nossas necessidades:

- Analógico: assumindo um valor compreendido em uma escala;
- Digital: assumindo um valor finito em uma determinada escala;
- Binário: Assumindo dois valores na escala, 0 ou 1.

No controle de processos discretos, os sensores são utilizados para controlar variáveis lógicas ou Booleanas. Para este tipo de situação os tipos de sensores mais empregados são os de proximidade, usados geralmente, para detectar objetos. Podendo ser mecânicos, ópticos, indutivos e capacitivos (Rosário 2005).

No controle de processos contínuos, existem diferentes tipos de sensores, capazes de medir as principais variáveis de controle, das quais podem ser destacadas: as medidas de deslocamento, velocidade, pressão, vazão e temperatura (sinais analógicos ou digitais).

A aplicação de sensores em processos automatizados deve ser baseada no grau e na classe de proteção estabelecida em normas de proteção internacional, conforme pode ser visto nas tabelas 3.6 e 3.7. São indicadas por duas letras, IP, de “International Protection”, estas duas letras são acrescidas de dois dígitos os quais definem o grau e a classe de proteção respectivamente (Rosário 2005).

A percepção sensorial visa a possibilidade da detecção da localização do sistema robótico e a detecção de um possível obstáculo, já a visão, é utilizada para detecção de objetos além de auxiliar ao operador na escolha de uma determinada trajetória a ser seguida pelo robô. Os tipos de sensores a serem explorados neste trabalho, são:

- Proximidade: ópticos, ultrassônicos, magnéticos, indutivos e capacitivos;
- Posição;
- Sensores de deslocamento linear;
- Sensores de visão.

TABELA 3.6: Norma internacional de utilização de sensores segundo o grau de proteção

Primeiro Dígito	Grau de Proteção
0	Proteção não especificada
1	Proteção contra a penetração de corpos sólidos com diâmetro maior que 50 mm. Sem proteção contra acesso intencional, como o de uma mão, mas proteção contra o contato com um objeto de área grande
2	Proteção contra a penetração de corpos sólidos com diâmetro maior que 12 mm. Proteção contra o contato de um dedo ou objeto similar.
3	Proteção contra a penetração de corpos sólidos com diâmetro maior que 2.5 mm. Proteção contra ferramentas e fios com diâmetro maior que 2.5 mm.
4	Proteção contra a penetração de corpos sólidos com diâmetro maior que 1 mm. Proteção contra ferramentas e fios com diâmetro maior que 1 mm.
5	Proteção contra depósitos de pó sendo, não há prevenção total contra a penetração, mas este não consegue penetrar em quantidade suficiente para impedir a operação. Proteção completa contra contato
6	Proteção contra a penetração de pó. Proteção completa contra contato.

TABELA 3.7: Norma internacional de utilização de sensores segundo a classe de proteção

Segundo Dígito	Classe de Proteção
0	Proteção não especificada
1	Proteção contra água gotejando verticalmente. Queda de água não deve causar efeitos nocivos.
2	Proteção contra água gotejando verticalmente. Queda de água com o equipamento em um ângulo de inclinação de até 150 graus da sua posição normal não deve causar efeitos nocivos.
3	Proteção contra água gotejando em um ângulo de até 60 graus da vertical. Spray de água não deve causar efeitos nocivos.
4	Proteção contra esguicho de água vindo de qualquer direção. Esguicho de água não deve causar efeitos nocivos.
5	Proteção contra jatos de água vindos de qualquer direção. Jatos de água não devem causar efeitos nocivos.
6	Proteção contra jatos fortes de água. A água não deve penetrar no equipamento em quantidades nocivas.
7	Proteção contra água quando o equipamento esta imerso em água sob determinadas condições de pressão e temperatura. A água não deve penetrar em quantidades nocivas.
8	O equipamento é adequado para submersão permanente sob as condições descritas pelo fabricante.

3.6 Sensores de proximidade

Os sensores de proximidade são comumente utilizados em casos onde há necessidade de se detectar a presença ou a ausência de um objeto. Podem ser do tipo chave de fim de curso, capacitivos, indutivos, ópticos, magnéticos e ultrassônicos. Neste trabalho será limitado somente os tipos de sensores que podem ser utilizados em sistemas de inspeção interna de dutos, dos quais serão citados os ópticos, ultrassônicos, magnéticos, indutivos e capacitivos (Rosário 2005).

3.6.1 Sensores ópticos

Este tipo de sensor é formado por um emissor e um receptor de luz, onde a parte emissora do sensor pode ser um LED (Diodo Emissor de Luz). O receptor é um elemento fotossensível, como um fototransistor, um fotodiodo, ou resistores variáveis pela luz.

O princípio de funcionamento deste tipo de sensor é baseado em um circuito oscilador que gera uma onda que é convertida em luz pelo emissor. Um objeto quando próximo de um sensor óptico faz com que a luz se reflita do emissor para o receptor. Esta variação é detectada por um circuito eletrônico e este então emite o sinal que será utilizado para a inspeção e controle.

Um bom exemplo é um *Detector Sensível à Posição*, **PSD** próprio para detectar precisamente posições. Geralmente, módulos de medição de posição são do tipo ativo, e são compostos por um diodo emissor de luz (LED) e um foto detector PSD. A posição de um objeto é determinada pela aplicação do princípio da triangulação.

Sensores baseados no princípio da triangulação funcionam da seguinte maneira, a figura 3.2 mostra que próximo ao LED infravermelho, através de uma lente é produzido um feixe, cujo ângulo é menor que $< 2^\circ$, este possui uma largura de pulso de 0.7ms. O feixe atinge o objeto e, refletido, retorna para o detector. A luz de baixa intensidade recebida é focada sobre a superfície do PSD. O PSD então gera o sinal de saída, as correntes I_A e I_B , que proporcionais a distância x de um ponto de luz sobre a superfície, na posição central. A intensidade do feixe recebido depende extremamente

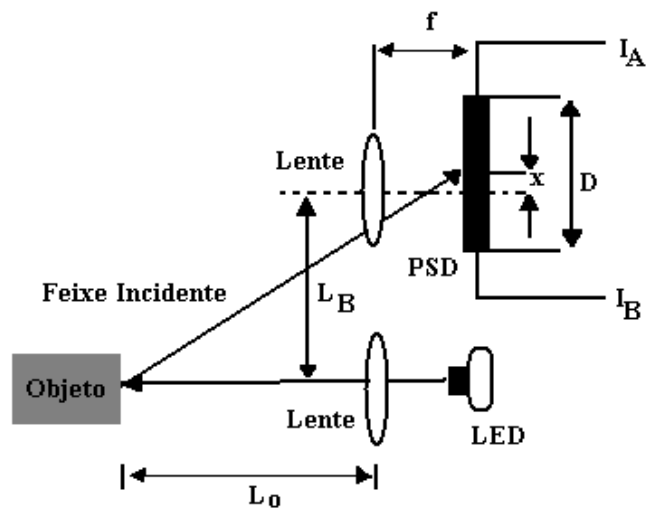


FIGURA 3.2: Princípio da triangulação para detecção de distâncias

das propriedades reflexivas do objeto. A intensidade da luz incidente sobre o PSD possui um grande grau de variação, contudo, a exatidão da medida depende muito pouco da intensidade da luz recebida. A figura 3.3, mostra uma imagem de um sensor de posição óptica do fabricante OMRON sensor.

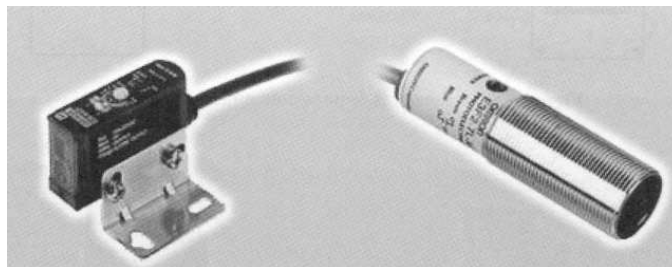


FIGURA 3.3: Sensores ópticos por reflexão ou difusão (OMRON)

Com exceção dos objetos transparentes ou escuros (pois estes funcionam por reflexão), este tipo de sensor é capaz de identificar grande parte dos objetos. Possuem três formas de um sensor óptico operar:

1. Por *Reflexão*: Quando a luz é refletida no objeto o sensor é acionado;
2. Por *Barreira*: o objeto bloqueia a passagem de luz, e a saída do sensor é comutada;

3. Por modo *Emissor-Receptor*: O emissor e o receptor são montados separadamente e quando a passagem de um raio de luz de um para o outro é interrompida por um objeto situado entre os dois, a saída do sensor é comutada gerando assim o sinal que é enviado ao circuito eletrônico de comando.

- As principais características dos sensores de proximidades ópticos são:
 - Não necessitam de contato mecânico para o sensoramento;
 - Não possuem partes móveis;
 - Possuem pequenas dimensões;
 - São insensíveis à vibrações e choques;
 - Oferecem muitas possibilidades de configuração;
 - Podem ser blindados para o caso de uso em ambientes de alta luminosidade;
 - Possuem chaveamento seguro;
 - Normalmente exigem limpeza e isolamento de poeira;
 - Possuem vários modelos: alimentação 12-30VDC, 24-240VAC;
 - Tensão de saída: TTL 5V.

- Aplicações dos sensores ópticos:

Este tipo de sensor, dentre outras aplicações, pode ser utilizado em sistemas robóticos móveis de inspeção, como detector de colisões. Não é muito apropriado para o uso em ambientes que existam muitas partículas em suspensão ou poeira, pois não apresentam proteção contra a mesma (Rosário 2005).

A tabela 3.8 informa algumas das características de um sensor óptico da micro-epsilon:

3.6.2 Sensores ultrassônicos

O princípio de funcionamento de um sensor ultrassônico é bastante simples e funciona da seguinte maneira: um sinal sonoro é emitido em determinada direção, as ondas

TABELA 3.8: Características de sensores ópticos

Princípio	triangulação	
Alcance	5, 10, 20	mm
Resolução	0.005	%FS
Linearidade	0.03	%FS
Saída analógica	$\pm 5/0...10$	Vdc
Saída digital	serial Rs485	
Temperatura de funcionamento	5 a 40	°C
Alimentação	± 12 a 24,5	Vdc

caminham até encontrar um obstáculo, o qual as refletem, quando os sensores recebem este eco de sinal, medem o tempo que foi gasto entre a emissão e o retorno. Sabendo-se que as ondas ultrassônicas são ondas acústicas mecânicas que cobrem uma escala de frequência bem além das potencialidades da audição humana (i. e. faixa de 20 kHz), sensores deste tipo funcionam a partir da emissão deste tipo de onda em alta frequência, cujo o tempo de propagação é diretamente proporcional à distância do obstáculo a ser identificado (Rosário 2005).

Os sensores ultrassônicos são constituídos de cristais, como o quartzo, que possuem características como o efeito *piezoelétrico*, ou seja, quando é aplicada uma força de tração ou compressão no cristal, aparece uma tensão proporcional à força aplicada. Por outro lado, quando se aplica uma tensão no cristal ele se comprime ou se expande naturalmente, assim como, se for aplicada uma tensão alternada ele vibrará na mesma frequência da tensão aplicada.

Desta forma o sensor aplica uma tensão alternada em alta frequência neste cristal, fazendo que o mesmo vibre e emita um som em alta frequência, a partir daí o circuito do sensor passa a ler a tensão no cristal para receber o eco do sinal que foi emitido.

Um arranjo básico de um sensor ultrassônico pode ser visualizado na figura 3.4. A distância L_0 do objeto pode ser calculada de posse ao valor da velocidade média da onda ultrassônica, v , e através do ângulo Θ :

$$L_0 = \frac{vt \cos \Theta}{2} \quad (3.1)$$

onde t é o tempo que a onda ultrassônica leva para atingir o objeto e voltar para o receptor. Se o transmissor e o receptor estão posicionados próximos um do outro

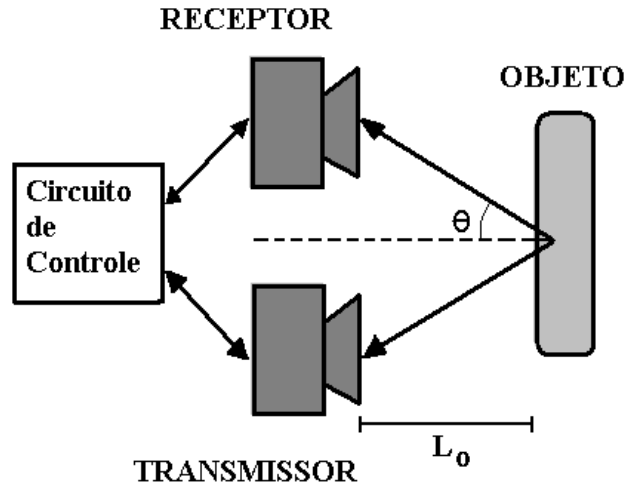


FIGURA 3.4: Arranjo básico de uma medida ultrassônica

conforme comparado com a distância ao objeto, então pode se fazer $\cos \Theta \cong 1$. O princípio de funcionamento de um sensor ultrassônico pode ser visto na figura 3.5.

Considerando $\cos \Theta \cong 1$, e sabendo-se que a velocidade do som (v) é dada por:

$$v = \sqrt[2]{\gamma * R * T} \quad (3.2)$$

onde:

γ = Razão de um aquecimento específico;

R = Constante do meio;

T = Temperatura em graus Kelvin.

Por exemplo, em condições normais de pressão e a uma temperatura de 20 °C a velocidade do som é de $v = 340$ m/s. Então pode ser verificado, que a velocidade do som sofre influência da constante do meio onde o som é aplicado e da temperatura de operação (Sigwart & Nourbakhsh 2004).

Como já foi dito anteriormente, os sensores a ultrassom, são constituídos de materiais *piezoelétricos*, ou seja, materiais em que ocorrem cargas elétricas em resposta à forças mecânicas e vice versa (Fraden 2003). Estes materiais são polarizados via uma manipulação da sua temperatura e exposição a um campo magnético, ou seja, este procedimento ocorre da seguinte forma:

1. O material *piezoelétrico* é aquecido para promover uma agitação de suas cargas elétricas;
2. Em seguida é exposto a um campo magnético para organizar as cargas elétricas ao longo da sua direção;
3. Após isto remove-se o material do campo magnético, e assim termina o processo de polarização de um material *piezoelétrico*.

Com isto, pode se verificar que existe um coeficiente no material *piezoelétricos* que é sensível à variações de temperatura. Para alguns materiais *piezoelétricos* como o quartzo este coeficiente declina a uma taxa de $-0,016 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. Para outros materiais, tais como a cerâmica, este coeficiente pode decair em temperaturas abaixo de 40°C , e em temperaturas mais elevadas, este coeficiente poderá aumenta.

Os materiais mais comuns em construção de sensores *piezoelétricos* à ultrassom é a cerâmica, ou seja, o funcionamento deste tipo de sensores podem ser muito influenciado se este for exposto à uma temperatura acima da especificada pelo fabricante.

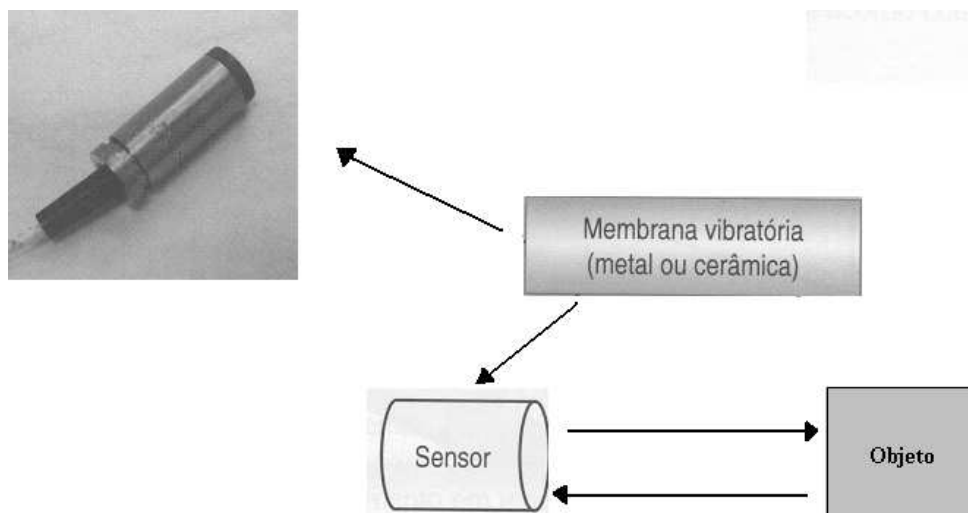


FIGURA 3.5: Princípio de funcionamento de um sensor ultrassônico

- As principais características dos sensores ultrassônicos são:
 - São geralmente utilizados como sensores de proximidade;

- Utilizam pulsos sonoros para sensoriamento;
 - Medem a amplitude e o tempo do deslocamento do pulso sonoro de um obstáculo até o receptor em determinado meio;
 - Trabalham na faixa de frequência entre 40 KHz e 2 MHz, podendo fornecer diretamente uma grande faixa de informações;
 - Podem ser utilizados em ambientes impregnados de umidade e poeira.
 - Existem sensores ultrassônicos digitais e analógicos que emitem sinais de acordo com a distância do objeto.
- Aplicações dos sensores ultrassônicos:

Em sistemas robotizados de inspeção interna de dutos, os sensores ultrassônicos de proximidade, podem ser utilizados amplamente como detectores de obstáculos, pois são capazes de detectar qualquer tipo de material, sejam eles sólidos ou líquidos.

A tabela 3.9, a seguir, informa as características de sensores ultrassônicos da Contrinex e da Sick:

TABELA 3.9: Características de um sensor ultrassônico

Alcance	0 a 8000	mm
Temperatura de operação	-10 a 70	°C
Alimentação	10 a 30	Vdc
Proteção	65/67	IP
Dimensão	L= 20 a 138,5	mm
Acurácia	$\leq 2\%$	

3.6.3 Sensores magnéticos de proximidade

Sensores magnéticos de proximidade incluem os *sensores de fim de curso* e os sensores por *efeito hall* (Everett 1995). Este tipo de sensor é composto por um contato feito de materiais magnéticos que são acionados na presença de um campo magnético, por exemplo um ímã permanente. Seu princípio de funcionamento é bastante simples:

quando um ímã se aproxima do sensor, o campo magnético atrai as chapas de metal, fazendo com que os contatos elétricos se fechem (Rosário 2005).

- **Sensores fim de curso**

Este tipo de sensor é mais comum em aplicações industriais, e são também chamados de sensores de presença com contato e interruptores. A figura 3.6, a seguir, mostra um exemplo real.



FIGURA 3.6: Sensores fim de curso- interruptores (OMRON)

São bastante comuns, devido ao seu preço relativamente reduzido, e por serem simples de se construir. No entanto, apresentam sérios problemas operacionais relacionados com efeitos de oscilações na saída (o que significa detectar eventos não verdadeiros), ocasionados por contato interno deficiente ou oscilação momentânea deste contato (resultantes do contato mecânico e da natureza elétrica do mesmo).

- Sensores efeito *hall*

Estes sensores baseiam-se no efeito *Hall*, ver figura 3.7, para realizarem a detecção de algum objeto. Este tipo de sensor funciona por contato com o objeto.

A saída é feita por intermédio de um transistor, montado de forma a funcionar ao corte ou à saturação, isto é, como um interruptor. Em muitas situações, o coletor do transistor não é polarizado internamente permitindo que o usuário o faça com a alimentação que pretender: é um sensor com saída em coletor aberto.

- As principais características dos sensores magnético de proximidade são:
 - É composto por contatos feito de materiais magnéticos;

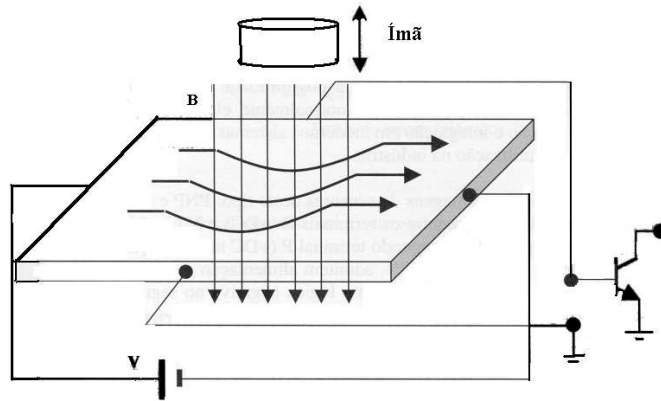


FIGURA 3.7: Interruptor baseado no efeito *hall*

- Custos reduzidos;
- Aplicações dos sensores magnético de proximidade:

Este tipo de sensor pode ser utilizado para se detectar obstáculos por contato físico. A tabela 3.10, a seguir, informa as características de sensores magnéticos da Sick:

TABELA 3.10: Características de sensores magnéticos

Alcance	60 a 70	mm
Temperatura de operação	-25 a 75	°C
Alimentação	5 a 30	Vdc
Proteção	67	IP
Dimensão	50x50x50 10,3x16x28	mm^3

3.6.4 Sensores indutivos

Um sensor indutivo, ver figuras 3.8 e 3.9, possui seu princípio de funcionamento parecido com o princípio de funcionamento de um indutor, sendo seu material dielétrico o ar, cuja sua constante é igual a 1. É constituído por um indutor de núcleo aberto, ou seja com entreferro. Com o núcleo aberto o campo magnético passará pelo ar e por conseguinte sua intensidade é menor. Quando um objeto metálico se aproxima

do núcleo do indutor, o campo magnético passa pela peça, e sua intensidade aumenta (Rosário 2005).

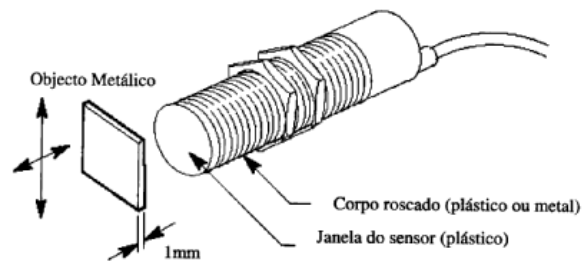


FIGURA 3.8: Utilização de um sensor indutivo para detectar metais

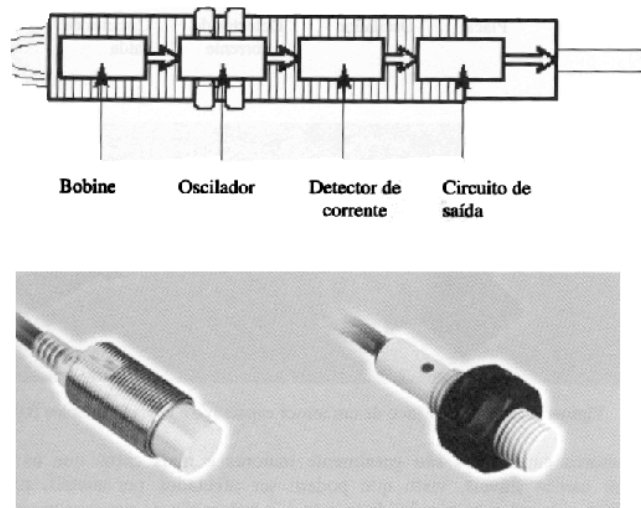


FIGURA 3.9: Imagem e diagrama de um sensor de proximidade indutivo

São mais populares devido ao fato de serem relativamente mais baratos e de menores dimensões. Baseiam-se na mudança de impedância do sensor na presença de objetos metálicos. Quando se coloca um metal condutor dentro da área de ação do sensor aparecem correntes no material metálico, que alteram o campo magnético gerado, o que se traduz em uma variação de impedância no sensor. Isto significa que a corrente no interior do sensor varia, sendo detectada por um detector de corrente existente no interior do mesmo, o qual controla o transistor que produz a saída.

- As principais características dos sensores indutivos são:

- Não necessitam de contato físico para detectarem algum objeto;
 - São mais baratos e possuem menores dimensões;
 - São utilizados para detectar objetos metálicos, de aço, cobre, alumínio e bronze;
- Aplicações dos sensores indutivos:

Em sistemas de inspeção de dutos os sensores de proximidade indutivos, apesar de apresentarem dimensões reduzidas, não podem ser amplamente utilizados para detectar obstruções ou obstáculos, visto que são mais apropriados para detectar materiais metálicos.

As tabelas 3.11 e 3.12, a seguir, informam as características de micro sensores indutivos da Contrinex e da Sick, série micro e padrão:

TABELA 3.11: Características de sensores indutivos

Alcance	0,6 a 1,5	mm
Temperatura de operação	-25 a 70	°C
Alimentação	7,7 a 30	Vdc
Proteção	67	IP
Dimensão	L= 16 a 38	mm

TABELA 3.12: Características de sensores indutivos, série padrão

Alcance	2 a 15	mm
Temperatura de operação	-25 a 70	°C
Alimentação	10 a 30	Vdc
Proteção	67	IP
Dimensão	L= 50 a 76	mm
	40x40x118	mm^3

3.6.5 Sensores capacitivos

Este tipo de sensor possui seu princípio de funcionamento semelhante ao princípio de funcionamento de um capacitor, ou seja, a capacidade de armazenar cargas elétricas. De forma semelhante ao sensor indutivo, o material dielétrico do sensor capacitivo é o ar, cuja a sua constante dielétrica é igual a 1, sendo assim, sua capacitância é naturalmente muito baixa. Este sensor, quando se aproxima de algum material que possua sua constante dielétrica maior que 1, resulta em um aumento de capacitância, devido fato de o campo magnético gerado pela atração entre as cargas passar por este objeto. A tabela 3.13, a seguir, mostra a constante dielétrica de alguns materiais. O circuito de controle deste sensor, então, detecta esta variação e processa a presença de um objeto. Pode funcionar a corrente contínua ou alternada (Rosário 2005), na figura 3.10 pode ser verificado o seu diagrama.

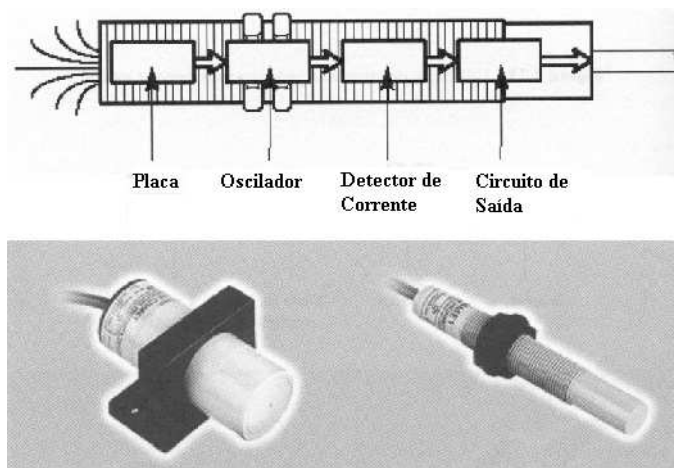


FIGURA 3.10: Diagrama de um sensor capacitivo e exemplo (OMRON)

Ou seja, este sensor possui um circuito oscilador baseado em um circuito RC, e quando a capacitância varia, então a frequência de oscilação também varia. Então um circuito eletrônico percebe esta variação e ativa a saída do sensor.

- As principais características dos sensores capacitivos são:
 - Não necessitam de contato físico para detectarem algum objeto;
 - Geralmente são mais caros se comparado a outros sensores de proximidade;

TABELA 3.13: Valores de constantes dielétricas

Material	Constante dielétrica (E)
Ar, vácuo	1
Madeira	2 a 7
Celulose	3
Álcool	25,8
Água	80
Mica	6
Mármore	8
Papel	2,3
Parafina	2,2
Petróleo	2,2
Polietileno	2,3
Polipropileno	2,3
Areia de quartzo	4,5
Vidro	5
Porcelana	4,4

– Suas medições pode ser afetadas por metais ou outras peças situadas em sua proximidade;

- Aplicações dos sensores capacitivos:

Geralmente este tipo de sensor é utilizado para detectar a presença de corpos não magnéticos, cuja constante dielétrica seja maior que 1. Podendo ser aplicado em sistemas de inspeção interna de dutos para verificar obstruções em redes de tubulações ocasionadas por vários tipos de materiais (ver tabela 3.13).

A tabela 3.14, a seguir, informa as características de sensores capacitivo da Sie-sensors e da Sick sensors:

TABELA 3.14: Características de sensores capacitivos

Alcance	0 a 25	mm
Temperatura de operação	-10 a 80	°C
Alimentação	10 a 40	Vdc
	20 a 250	Vac
Proteção	64/65/66/67/68	IP
Dimensão	L= 25 a 91,5	mm

3.7 Sensores de posição

Medidas de posição e velocidade são com frequência requeridas em sistemas de controle realimentados de posição e velocidade. Estes tipos de sensores podem ser classificados em dois tipos, os para medidas de posição (potenciômetros, LVDT e encoders) e os para medidas de velocidade (Tacômetros) (Rosário 2005). Neste trabalho serão mostrados somente os de posição, visto que possuem mais utilidades em sistemas de inspeção de dutos.

Na figura 3.11 pode ser observada um exemplo de estrutura de controle de posição de um sistema robotizado móvel.

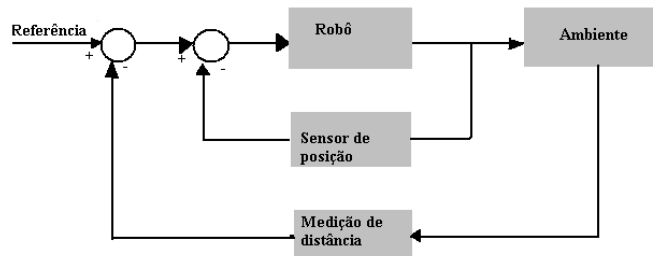


FIGURA 3.11: Estrutura de controle de um sistema robotizado móvel

3.7.1 Potenciômetros de precisão

Um potenciômetro é um sensor analógico que trabalha como um divisor de tensão, pode ser do tipo rotativo ou linear.

Um potenciômetro de precisão difere dos outros pelo fato de possuir uma maior faixa de variação de resistência, ou seja, possui uma variação angular de muitas voltas, e também pelo fato de possuir uma maior precisão. Este dispositivo transforma uma variável mecânica, linear ou rotacional, em uma tensão elétrica (Rosário 2005).

Os principais tipos de potenciômetros são:

- Wirewound: Composto por um contato que desliza ao longo de um rolo de arame nicromo. Possui como vantagem o seu baixo custo, e como desvantagem possíveis falhas de leitura e a excessiva sensibilidade à variações de temperatura;

- Cermet: Composto por um contato que desliza sobre uma trilha de cerâmica condutiva; é mais vantajoso, se comparado ao Wirewound;
- Filme de Plástico: apresenta alta resolução, longa vida e boa estabilidade de temperatura.

As principais características de um potenciômetro são:

- Fornecem sinal analógico para controle;
- Fornecem uma informação de posição absoluta;
- Apresentam baixo custo;
- Podem apresentar alterações de temperatura e variação no uso;
- Não podem ser utilizados em ambientes com umidade e poeira.
- Aplicações:

Este tipo de sensor de posição devido a existência da sua restrição de uso em ambientes úmidos e com a presença de poeiras, não possuem uma aplicação ampla (Rosário 2005).

3.7.2 Encoders ópticos

O *encoder* é um transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos digitais elétricos. Estes pulsos gerados podem ser usados para determinar velocidade, taxa de aceleração, distância, rotação, posição ou direção. Suas principais aplicações são: em eixos de robôs; controle de velocidade e posicionamento de motores elétricos; posicionamento de antenas, telescópios e radares; medição de grandezas de forma direta ou indireta (Rosário 2005).

O sistema de leitura é baseado em um disco (*encoder* rotativo), formado por janelas radiais transparentes e opacas alternadas. Este é iluminado perpendicularmente por uma fonte de luz infravermelha, quando então, as imagens das janelas transparentes são projetadas no receptor. O receptor converte essas janelas de luz em pulsos elétricos. Os *encoders* podem ser divididos em *encoders* incrementais e absolutos.

- *Encoder* incremental;

Os sinais de saída de um *encoder* óptico incremental são constituídos de um trem de pulsos, gerados a partir de LEDs provenientes de dois sensores defasados de 90° colocados em um disco óptico, o que permite o aumento da resolução e a determinação da direção. Ao mesmo tempo outro sensor detecta uma marca disposta no disco óptico, possibilitando assim a obtenção de um pulso de inexactidão, utilizado como ponto de inicialização do sistema (Rosário 2005).

O *encoder* incremental fornece normalmente dois pulsos quadrados defasados em 90° , que são chamados usualmente de canal A e canal B. A leitura de somente um canal fornece apenas a velocidade, enquanto que a leitura dos dois canais fornece também o sentido do movimento. Um outro sinal chamado de Z ou zero também está disponível e ele dá a posição absoluta “zero” do *encoder*. Este sinal é um pulso quadrado em que a fase e a largura são as mesmas do canal A.

A resolução do *encoder* incremental é dada por pulsos/ revolução (chamado de PPR), isto é, o *encoder* gera uma certa quantidade de pulsos elétricos por uma revolução dele próprio (no caso de um *encoder* rotativo). Para determinar a resolução basta dividir o número de pulsos por 360° , por exemplo, um *encoder* fornecendo 1024 pulsos/ revolução, geraria um pulso elétrico a cada $0,35^\circ$ mecânicos.

A precisão do *encoder* incremental depende de fatores mecânicos, elétricos e ambientais, que são: erros na escala das janelas do disco, excentricidade do disco, excentricidade das janelas, erro introduzido na leitura eletrônica dos sinais, temperatura de operação e nos próprios componentes transmissores e receptores de luz.

A partir de um tratamento lógico (normalmente realizado por meio de circuitos integrados dedicados para a discriminação do sentido e a contagem da rotação), podem ser obtidas a posição absoluta do sistema robotizado.

O processamento das informações provenientes de um *encoder* óptico incremental requer a implantação de um circuito eletrônico digital de tratamento e monitoramento do sinal de inexactidão, disponível no mercado com algoritmos de controle

programáveis externamente. Na figura 3.12 pode-se observar a estrutura de um *encoder* óptico incremental.

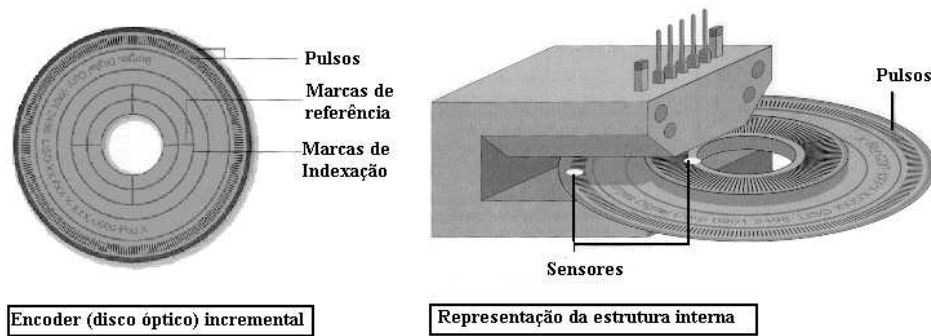


FIGURA 3.12: *Encoder* óptico incremental

- *Encoder* absoluto;

O princípio de funcionamento de um *encoder* absoluto, visto na figura 3.13, é de um *encoder* incremental são bastante similares, isto é, ambos utilizam o princípio das janelas transparentes e opacas, com estas interrompendo um feixe de luz e transformando pulsos luminosos em pulsos elétricos.

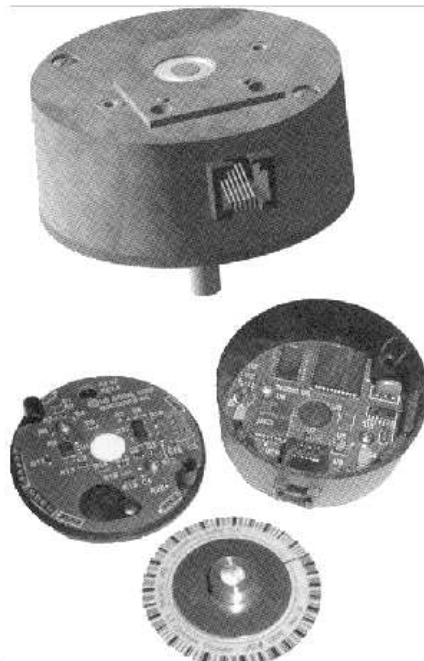


FIGURA 3.13: *Encoder* absoluto

A diferença entre o incremental e o absoluto é que posição do *encoder* incremental é dada por pulsos a partir do pulso zero, enquanto a posição do *encoder* absoluto é determinada pela leitura de um código e este é único para cada posição do seu curso; conseqüentemente os *encoders* absolutos não perdem a real posição no caso de uma eventual interrupção da tensão de alimentação. Quando for re-estabelecida a alimentação ao sistema, a posição é atualizada e disponibilizada para o mesmo (graças ao código gravado no disco do *encoder*), e com isso, não se precisa ir até a posição zero do *encoder* para saber a sua localização como é o caso do incremental. Em outras palavras, não existe a necessidade de uma inicialização de posição (Rosário 2005). Com o objetivo de se evitar problemas de medidas incorretas (medidas consecutivas) utiliza-se como código de saída o código binário Gray (Sciavicco & Siciliano 2000).

– Aplicações:

Os sensores de posição tipo *encoders* são comumente utilizados em sistemas de inspeção internas de dutos, com a finalidade de se obter dados de posicionamento do sistema robótico dentro da rede de tubulação.

A tabela 3.15, a seguir, informa as características de sensores de posição, tipo *encoders*, absoluto e incremental da Sick:

TABELA 3.15: Características de sensores de posição, tipo *encoders*

Temperatura de operação	-25 a 85	°C
Alimentação	4,5 a 32	Vdc
	20 a 250	Vac
Proteção	65	IP
Dimensão	D=60	mm

3.8 Sensor de visão

A tarefa de uma câmera como sensor de visão é medir a intensidade de luz refletida por um objeto. Para isto, elementos fotossensíveis (chamados *pixels*) são utilizados, estes são capazes de transformar a energia da luz em energia elétrica. Diferentes tipos

de sensores são disponíveis dependendo do princípio físico utilizado para realizar esta transformação de energia. Os dispositivos mais amplamente utilizados são os sensores CCD e o CMOS, que são baseados no efeito fotoelétrico dos semicondutores (Sciavico & Siciliano 2000).

- CCD

Um sensor CCD (Dispositivo de carga acoplada) é constituído por um dispositivo retangular composto de *pixels*. Devido ao efeito fotoelétrico, quando um fóton bater na superfície fotoelétrica cria um determinado número de elétrons livres, de modo que cada elemento acumula uma carga dependo do tempo integral de incidência de iluminação sobre o elemento foto sensível. Esta carga é então passada por um mecanismo de transporte para a saída do amplificador, e neste mesmo tempo o pixel é descarregado. O sinal elétrico deve ser processado produzindo, assim, sinal de vídeo real (Sciavico & Siciliano 2000).

- CMOS

Um sensor CMOS (Metal complementar de óxido semicondutor) é constituído por um dispositivo retangular de fotodiodos. A junção de cada fotodiodo é pré-carregada sendo descarregada quando em contato com os fótons. Um amplificador integrado em cada pixel pode transformar esta carga em voltagem ou em nível de corrente (Sciavico & Siciliano 2000).

- Câmera

Conforme pode ser visto na figura 3.14 a câmera é um dispositivo complexo, é composta por vários dispositivos tais como um sensor fotossensível, um shutter (lente obturadora), uma lente e um pré processador analógico eletrônico. A informação visual é tipicamente elaborada por um processador digital, e desta forma o princípio de medida é para transformar a intensidade da luz de cada ponto da imagem em um valor numérico (Sciavico & Siciliano 2000).

- Aplicações:

Um sistema de visão para um SRIID, basicamente, pode ser constituído por:

- Sistema de iluminação;

- Câmera CCD;
- Computador para aquisição e processamento.

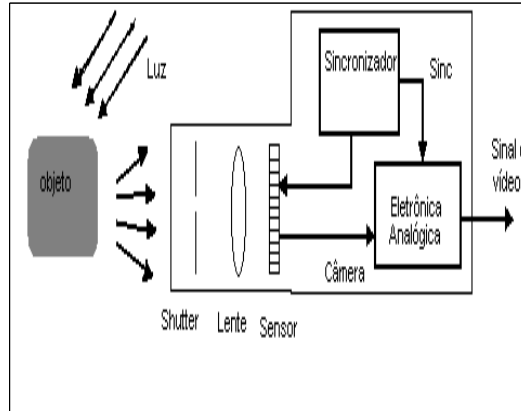


FIGURA 3.14: Representação esquemática de um sistema de visão

O sistema de iluminação permite iluminar o objeto e fazer com que os elementos fotossensíveis detectem o mesmo. A câmera CCD (Dispositivo de carga acoplada) utiliza uma matriz de condensadores que são carregados pela luz incidente. A quantidade de carga é proporcional à luz recebida, formando assim uma matriz de intensidades, que são convertidas e armazenadas na memória da câmera formando assim uma imagem. Os elementos sensores são “limpos” ou descarregados a uma determinada frequência, o que permite obter imagens sucessivas e detectar movimentos.

Em sistemas robóticos de inspeção de dutos, este procedimento permite a identificação de objetos, barreiras, obstruções, corrosões entre outros, podendo fornecer sua localização e geometria.

3.9 Sensores comerciais

As tabelas 3.16, 3.17 e 3.18, mostradas a seguir disponibilizam uma seleção de sensores que podem ser utilizados em sistemas robóticos de inspeção de dutos, sendo discriminados nesta algumas de suas características, tais como: Alcance de operação; Faixa de alcance do sensor; Temperatura de operação; Suprimento de voltagem (AC/DC); Suprimento de corrente quando em não uso (*off state*); Temperatura interna; Peso; Fator de proteção; Acurácia e dimensões. Além disso também serão destacados seus princípios de funcionamento, bem como sua variedade de modelos e os seus respectivos fabricantes.

TABELA 3.16: Sensores comerciais I

Características Principais		Alcance da Operação	Fabricante	Serie Modelo	Faixa de alcance (mm)	Temp de oper(° C)	Tensão de alimentação(VDC/ VAC)	Suprim de Corrente No-Load	Temp intern(° C)	Peso(g)	Fator de Proteção	acurácia	Dim (mm)	
Proximidade	infravermelho	-	Sharp	GP2	200-1500	-10-60	4.5-7 VDC	3 μ A	- 20-70	-	-	-	-	
	Ultrasônico	-	Contrinex	M-18, M-30	0-6000	-	12-30 VDC	20-60 mA	-	30-50	IP 65, 67	-	-	
Proximidade	Ultrasônico	-	SICK	UM-30	30-8000	-20-70	12-30 VDC	-	-	210-380	IP 65	\leq 2 %	L=127,5-138,5	
		-	SICK	UM-18	30-350	-20-70	10-30 VDC	-	-	-	IP 65, 67	\leq 2 %	L=20	
	Capacitivo	-	SIE Sensor	SK1- DC	1.5-25	- 10-70	10-35 VDC	10-15 mA	-	-	-	IP 64/65/66/67/68	-	-
		-	SICK	CM-18	8-12	-25-80	10-40 VDC	-	-	-	-	IP 67	-	L=46,5-91,5
		-	SICK	CM-30	16-25	-25-80	10-40 VDC/20-250 VAC	-	-	-	-	IP 67	-	L=63,6-91
		-	SICK	CQ-35	0-25	-25-75	10-40 VDC	-	-	-	-	IP 67	-	L=25-69,5
	Micro-Indutivos	-	Sie Sensor	SK1- AC e AC/DC	0.1-25	-30-70	20-252VAC/ 20-300VDC	\leq 2,5/ < 1,5 mA	-	-	-	IP 67/66/68/64	-	-
		longa	Contrinex	300: ϕ 3, M4/ 400: ϕ 4, M5/ 420: ϕ 6.5, ϕ 8, M8	0.6-1.5	- 25-70	7.7-30 VDC	-	-	-	-	IP 67	-	-
		-	SICK	IM4, IM5, IH3 IH4, IH6	1-2	- 25-70	10-30 VDC	-	-	-	-	IP67	-	L=22-38
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	IP67	-	L=16-38

* Temp. de oper: Temperatura de operação.

* Suprim: Suprimento.

* Temp. intern: Temperatura interna.

* Dim: Dimensões.

* L: Comprimento.

TABELA 3.17: Sensores comerciais II

Características Principais	Alcance da Operação	Fabricante	Serie Modelo	Faixa de alcance (mm)	Temp de oper (° C)	Tensão de alimentação (VDC/ VAC)	Suprim de Corrente No-Load	Temp intern (° C)	Peso (g)	Fator de Proteção	acurácia	Dim (mm)
Proximidade	-	SICK	IM12, IM18, IM30	2-15	- 25-70	10-30VDC	-	-	-	IP67	-	L=50-76
			IQ40									
Posição/distância	-	SICK	MM e MQ	60-70	-25-75	5-25VDC	-	-	-	67	-	50x50x50
			DS-60	200-20000	- 25-50	18-30VDC	-	-25-75	-	IP67	-	38x104x87
			DS-500	0.2-30000	- 40-50	10-30VDC	-	-25-75	-	IP65	-	110x50x151
			DT-2	50-300	- 10-45	18-30VDC	-	-25-75	-	IP67	-	15x49x41,5
			WTA-24	100-3000	- 10-55	12-30VDC	-	-25-75	-	IP67	1.5-11.5perc	27x88x65
			DT-60	200-5300	- 25-55	11-30VDC	-	-25-75	-	IP67	+/- 10mm	38x104x87
			DL-60	0.3-24000	- 25-55	11-30VDC	-	-25-75	-	IP67	+/- 15mm	38x104x87
			DT-200	100-2000	- 10-45	18-30VDC	-	-25-75	-	IP67	+/- 5mm	54x105x138
			DT-500	0.2-30000	- 40-50	10-30VDC	-	-25-75	-	IP65	+/- 3mm	110x50x151

* Temp. de oper: Temperatura de operação.

* Suprim: Suprimento.

* Temp. intern: Temperatura interna.

* Dim: Dimensões.

* L: Comprimento.

TABELA 3.18: Sensores comerciais III

Características Principais		Alcance da oper.	Fabricante	Serie Modelo	Faixa de alcance (mm)	Temp de oper(° C)	Tensão de alimentação(Vdc/Vdc)	Suprim de Corr. No-Load	Temp intern(° C)	Peso (g)	Fator de Proteção	acurácia	Dim (mm)
Detectores de Dist	Eletro-opticos	-	SICK	DME-2000	0.1-130mm/100-2.047 mm	- 10-45	18-30VDC	-	-25-75	-	IP65	+/- 5mm	54x105x138
		-	SICK	DME-3000	100mm-500m	- 10-45	10-30VDC	-	-25-75	-	IP65	+/- 5-30mm	54x105x138
		-	SICK	DMT,DML	0-1100m	0-40	18-30VDC	-	-25-75	-	IP65	+/- 10mm	99,5x99,5x213,5
		-	SICK	DMD	0.5-240mm	- 0-40	18-30VDC	-	-25-75	-	IP65	+/- 0.5-3.2m	70x70x307
		-	SICK	OD,OD HI	0-0,4m	- 10-40	11,4-26,4VDC	-	-20-60	-	IP67	< 80µA	20,4x60x50
Detectores de Dist. Ang.	Magnético	-	Honeywell	HMC1501	+/-45° <0.07° resolução	-40-125	5VCC	1mA	-40-125	-	-	-	5 x 4 x 1.2
		-		HMC1512	+/-90° <0.05° resolução	-	-	-	-	-	-	-	-
Acelerometros		-	Analog Devices	ADXL202	-	-	3-5,25V	0.6-1mA	-	+/- 2	-	-	-
		-	Motorola	MMA1201P	-	-	4.75-5.25V	4-6mA	-	-	+/- 40	-	-
		-	Temic	TAS1000/2000, BHZ02	-	-	4.75-5.25V	<10mA	-	-	50-250	-	-
		-	Colibrys	MS 7000	-	-	2.4-5.5V	170µA	-	-	2-50	-	-
Encoders	Absoluto Incremental	-	SICK	ARS-60	-	-20-85	10-32VDC	-	-	-	65	-	D=60
		-	SICK	DRS-60	-	-20-85	4.5-32VDC	-	-	-	65	-	D=60

* Temp. de oper: Temperatura de operação.

* Suprim: Suprimento.

* Temp. intern: Temperatura interna.

* Dim: Dimensões.

* L: Comprimento.

3.10 Conclusão

Ao final desta seção, pode-se observar que os melhores sensores para detecção de obstáculos ou obstruções, são os sensores de proximidade à ultrassom e os capacitivos, pois ambos detectam objetos compostos por vários materiais. É importante lembrar também as condições de funcionamento restritas pelo fator de proteção e as limitações dos mesmos, dados estes que podem ser visualizados nos manuais disponibilizados pelos fabricantes. Uma ferramenta também bastante importante é a câmera de vídeo. Esta pode ser utilizada juntamente com os sensores auxiliando na tarefa de inspeção visual ou pilotagem do sistema de inspeção.

Com o objetivo de fornecer dados sobre o ambiente ao qual será submetido um SRIID, o sensoriamento torna-se uma ferramenta básica e indispensável. De acordo com a aplicação do sistema robotizado existe uma ampla variedade, no que se refere ao princípio de funcionamento e à sua funcionalidade, de sensores que podem ser utilizados. A escolha deve ser baseada no interesse particular de cada sistema de inspeção.

Algumas questões devem ser analisadas antes da escolha dos sensores que irão compor o sistema robotizado de inspeção, tais como: O que é desejado que o sensor meça; Quais são as possíveis condições ambientais a qual será submetida o sensor; Quais são as características técnicas do sensor e suas dimensões.

A presente seção forneceu uma série de dados sobre os sensores, tais como sua caracterização e conceitos importantes, como especificações e fator de proteção. Em particular para os sensores de proximidade, posição e visão, foram apresentadas algumas de suas características e aplicações direcionadas a robôs de inspeção interna de dutos. Foram também disponibilizados em tabelas uma série de sensores discriminados segundo a essas questões, de acordo com as suas aplicações, características de funcionamento e dados técnicos, visando assim facilitar a escolha de um determinado sensor de acordo com um interesse particular.

Dentre os fabricantes de sensores que foram utilizados como base para este trabalho podem ser destacados: *Sick Sensors* (Sick-Sensor 2005); *Contrinex* (Contrinex 2005); *Sie Sensor* (Sie-Sensors 2005); *Omron sensors* (Omron-Sensors 2005) e *Honeywell* (Honeywell-Sensors 2005).

Capítulo 4

Módulos de tração utilizados em dutos

4.1 Introdução

No processo de desenvolvimento de um projeto de sistemas robotizados de inspeção interna de dutos, primeiramente deve se observar a configuração da rede de tubulação, com objetivo de se verificar se esta é complexa ou não, em seguida deve-se verificar o tipo de fluido na mesma e se o fluido ocupa todo o volume da tubulação (chamado conduto fechado). Com isto serão obtidas algumas informações que servirão de base para uma escolha apropriada do sistema de tração do projeto em questão.

Sistemas robóticos de inspeção interna de dutos necessitam de um mecanismo de locomoção que possibilite realizar um movimento com habilidade no meio ao qual será submetido. Muitas formas podem ser consideradas, ver figura 4.1, para um mecanismo se locomover dentro de uma tubulação, (com exceção dos modelos que necessitam da construção de trilhos) estes geralmente são classificados como (Hirose et al. 1999):

1. Formas que utilizam a pressão do fluido, comumente chamado *PIG* (sigla em inglês de dispositivo para inspeção de dutos);
2. Formas que utilizam uma haste para gerar a propulsão;
3. Formas que utilizam um mecanismo de locomoção para impulsionar o sistema

robotizado.

A escolha da forma mais apropriada do sistema de tração a ser utilizado no robô é um aspecto importante em se tratando de projetos de sistemas robotizados de inspeção interna de dutos.

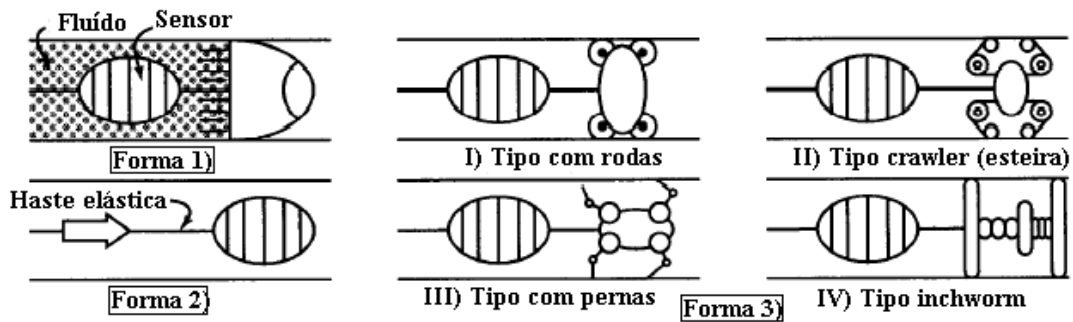


FIGURA 4.1: Mecanismos de locomoção dentro de uma tubulação (Hirose et al. 1999)

4.2 Tipos de sistemas de tração para sistemas de inspeção interna de dutos

4.2.1 Tração baseada na pressão do fluido (PIG)

É uma estrutura bastante simples e econômica, mas possui algumas dificuldades na prática, por exemplo; se a pressão do fluido na tubulação for baixa a propulsão não será eficaz, podendo este parar a qualquer momento em distâncias arbitrárias principalmente em regiões de cotovelo. Podem ser de dois tipos, os Geométricos (que visualizam anomalias geométricas) e os de Corrosão (inspecionam possíveis corrosões). São empregados para a inspeção de encanamentos com diâmetros relativamente grandes e geralmente utilizam sensores e outros instrumentos alimentados por baterias elétricas, estes possuem a finalidade de coletar dados relativos às condições da parte interna das paredes da tubulação enquanto se locomovem pelo interior da mesma, a partir daí podem ser localizadas possíveis falhas ocasionadas por corrosões e /ou fraturas.

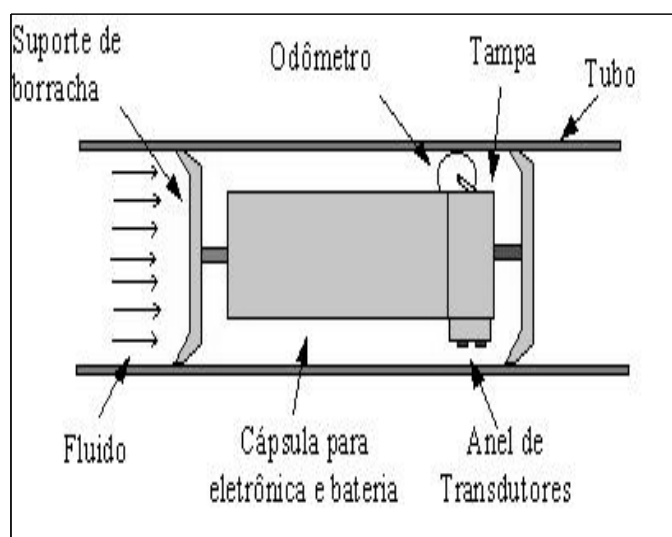


FIGURA 4.2: PIG desenvolvido pelo CENPES/RJ (Okamoto et al. 1999)

Como um exemplo pode se observar na figura 8.1, um dispositivo para inspeção de dutos, que foi desenvolvido pelo centro de pesquisas (CENPES) da Petrobrás no Rio de Janeiro, inserido dentro de uma tubulação. Sua estrutura mecânica é composta por uma cápsula cilíndrica, na qual está situada os circuitos eletrônicos e as baterias, apoiada entre dois suportes constituídos por discos de borracha. Estes suportes possuem a finalidade de manter a cápsula cilíndrica centralizada na tubulação. A pressão do fluido atua diretamente sobre o suporte traseiro fato que resulta na locomoção do sistema pelo interior do duto. Este, possui um odômetro (acionado por uma pequena roda que esta sempre em contato com a parede da tubulação devido a ação de uma mola) cuja finalidade é estimar a distância percorrida pelo PIG no interior do duto. Este fornece um pulso elétrico a cada 100 mm de deslocamento (Okamoto et al. 1999).

Em se tratando de dutos onde não existe a possibilidade de haver uma inspeção interna, isto é, nos dutos em que as ferramentas que existem hoje no mercado não conseguem realizar uma inspeção interna (seja por problemas como condições de geometria ou dificuldades operacionais), existe hoje um dispositivo (desenvolvido pela PipeWay Engenharia) baseado na técnica de fuga de campo magnético (MFL) e é específico para dutos com diversos valores de diâmetro e espessura da parede. A velocidade aproximada desta ferramenta é de 0,4 m/s.

4.2.2 Tração baseada na utilização de hastes para gerar a propulsão

É bastante simples e existem vários exemplos práticos, tais como os endoscópios industriais e de uso medicinal. Em se tratando de uma inspeção dentro de uma tubulação longa e fina e que possui também regiões curvas, a haste deve possuir não somente flexibilidade o suficiente para atravessar este tipo de região, mas também uma certa dureza para transmitir a propulsão ao mesmo tempo.

4.2.3 Tração baseada em mecanismos de locomoção sobre seu corpo

Este tipo é subdividido em: I) Tipo com rodas; II) Tipo *Crawler* (esteira); III) Tipo com pernas; IV) Tipo *inchworm* ou lagarta ; V) Sistemas mistos.

4.2.3.1 Tipo com rodas

Este tipo de sistema é o mais comum, devido a sua grande variedade. Este utiliza-se de um mecanismo e /ou dispositivo que pressionam as rodas contra a parede da tubulação, gerando assim a propulsão necessária para o deslocamento do robô. Este tipo de sistema é vantajoso, se comparado com os outros, pois possui um mecanismo mais simples, além de uma maior potencialidade de minituarização, sendo assim os mais utilizados em projetos de robôs de inspeção de dimensões reduzidas.

4.2.3.2 Tipo *crawler* (esteira/trator)

Este tipo de sistema possui sua tração como a de um trator, ao invés de possuir rodas. No geral, geram forças o suficiente para puxar ou arrastar cabos e também o peso total do veículo, levando-se em conta a velocidade do sistema. São sistemas construídos especialmente para tubulações de 4 polegadas de diâmetro interno (Bruce et al. 1993).

4.2.3.3 Tipo com pernas

A locomoção com pernas é caracterizada por uma série de pontos de contato entre o robô e a superfície interna do duto. Dentre as vantagens deste sistema pode ser citada a sua adaptabilidade ao meio e a capacidade de manobrar em ambientes acidentados, este possui a capacidade de atravessar buracos ou fendas. Dentre as principais desvantagens deste tipo de sistema pode ser citada o seu alto gasto de energia com a sua locomoção e sua complexidade mecânica. Uma perna, a qual pode possuir vários graus de liberdade, deve ser capaz de sustentar parte do peso total do robô, e em alguns casos, ser capaz de levantar ou abaixar o robô, e até mesmo realizar trajetos verticais.

4.2.3.4 Tipo *inchworm*/ lagarta

É um sistema robótico cujo seu tipo de locomoção é similar ao de uma lagarta, geralmente, a sua estrutura possui três graus de liberdade, dando a este uma capacidade de se flexionar, se estender para, a partir daí, se impulsionar e realizar o movimento. Este tipo de sistema pode ser aplicado em tubulações de diâmetro pequenos e em micro robôs de uso endoscópico, é bastante eficaz nas regiões de cotovelos e regiões com formato de “T”. Um exemplo deste tipo de locomoção pode ser visto através da figura 4.3. Este modelo é constituído de cinco segmentos, mas existem modelos similares constituídos apenas de três segmentos (Takahashi et al. 1993).

Em (a) o modelo está preso à tubulação através do primeiro e do último segmento que encontram-se mais estreitos e mais compridos.

Em (b) o quinto segmento passa a ser mais largo e mais longo e simultaneamente o segundo segmento passa a ser estreito e comprido, então o primeiro e segundo segmento agora suportam o modelo.

Em (c) o terceiro segmento torna-se estreito e comprido e simultaneamente o primeiro segmento torna-se largo e longo, logo o segundo e o terceiro segmento suportam o modelo. A partir desse passo o sistema começa a caminhar, devido ao alongamento do primeiro segmento.

Em (d) os segmentos que suportarão o modelo serão o terceiro e o quarto, e o

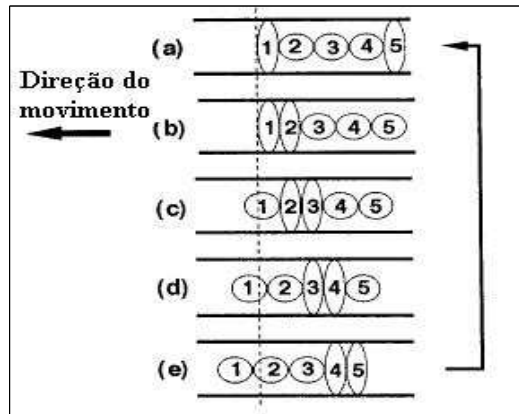


FIGURA 4.3: Exemplo de locomoção *inchworm* ou “lagarta” (Takahashi et al. 1993)

sistema caminhará mais um pouco, devido ao alongamento do segundo segmento e o encolhimento do terceiro.

Em (e) os segmentos que suportarão o modelo serão o quarto e o quinto, e o sistema caminhará devido ao alongamento do terceiro segmento e o encolhimento do quinto.

A partir daí repete-se toda a seqüência de movimento fazendo com que o sistema caminhe. Pode ser verificado que para ocorrer a locomoção neste modelo de 5 segmentos é necessário que haja no mínimo dois pontos de contato com a parede da tubulação.

A figura 4.4 mostra, em particular para este sistema, o desenho da unidade de segmento em duas vistas. Estas unidades são compostas de duas placas de metal conectadas através de um *Micro Atuador Flexível*, abreviado na figura 4.4 em FMA e por quatro junções nas quais existe uma pequena perna, conforme pode visualizado na figura. Este micro atuador flexível pode ser dividido em três câmaras. A variação do seu formato é feita através de um controle de pressão de ar no interior dessas três câmaras (Takahashi et al. 1993). Na prática este tipo de sistema é mais comumente utilizado em sistemas robóticos de inspeção de uso medicinal utilizados em procedimentos de endoscopias (Menciassi, Park, Lee, Gorini, Dario & Park 2002).

4.2.3.5 Sistemas mistos

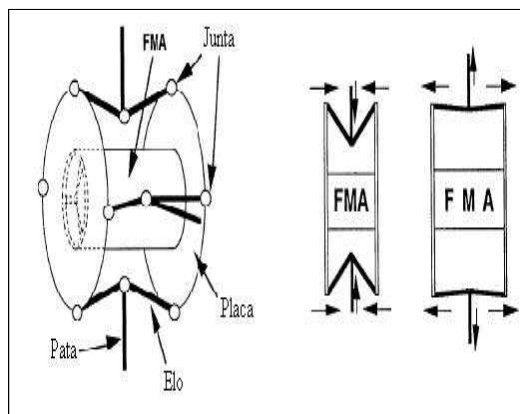


FIGURA 4.4: Unidade de segmento de um sistema *inchworm* ou “lagarta” (Takahashi et al. 1993)

O módulo de tração de um sistema robotizado de inspeção interna de dutos também pode apresentar configurações mistas, ou seja, podem apresentar uma combinação dos sistemas de tração citados anteriormente. Estes podem tanto utilizar pernas com rodas nas extremidades, quanto realizar movimentos helicoidais para gerar propulsão.

- Sistema de locomoção helicoidal;

O princípio de locomoção helicoidal, também conhecido como *screw*, funciona da seguinte forma, ver figura 4.5.

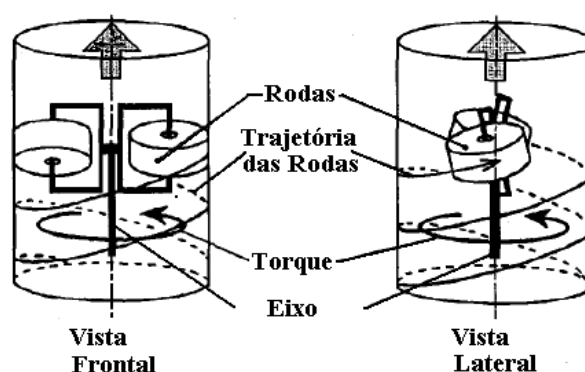


FIGURA 4.5: Diagrama esquemático de locomoção helicoidal (Kagawa et al. 1999)

O cilindro é a parede interna de uma tubulação. As rodas são alocadas no corpo principal do robô, com um ângulo inclinado, e pressionadas contra a parede. Estas

podem girar em torno de seus eixos livremente. Aplicando um torque ao corpo principal do robô, como mostrado na figura 4.5, as rodas se movimentam helicoidalmente no interior da tubulação, deslocando o robô. Se for desejado que o robô retorne, um torque reverso deverá ser aplicado (Kagawa, Hayashi, Iwatsuki & Morikawa 1999).

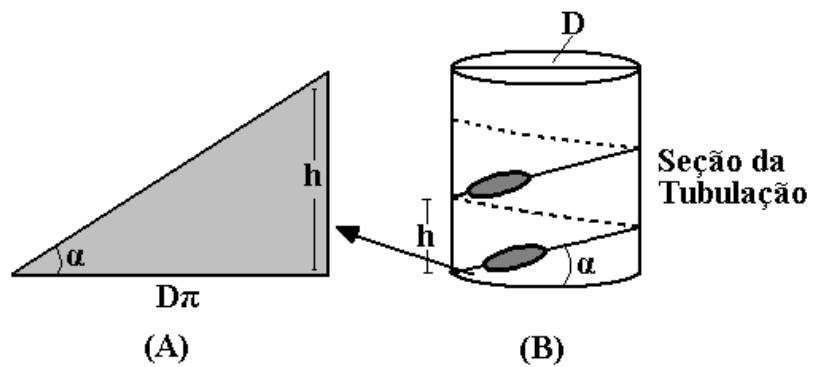


FIGURA 4.6: Relação do ângulo de inclinação das rodas em locomoção helicoidal

Na figura 4.6 pode se verificar que a inclinação, α , pode ser obtida através de um triângulo retângulo disposto em hélice, na superfície de um cilindro. Este ângulo é derivado da relação entre o comprimento do passo de locomoção do robô (h) e do valor do diâmetro (D) da tubulação, conforme pode ser mostrado na figura 4.6 e na equação 4.1.

$$\alpha = \arctan \frac{h}{D\pi} \quad (4.1)$$

A velocidade (V) de um robô que utiliza o sistema helicoidal ou *screw* para se locomover é extraída da relação entre o passo de deslocamento (h) e o período de tempo ocorrido durante uma revolução (T), ver equação 4.2.

$$V = \frac{h}{T} \quad (4.2)$$

A equação 4.3 é conhecida e define o valor do período (T) em relação à velocidade angular (ω).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4.3)$$

Logo o valor da velocidade (V) de deslocamento do robô com relação à velocidade angular (ω) é mostrada na equação 4.4.

$$V = \frac{\omega \cdot h}{2\pi} \quad (4.4)$$

Na figura 4.7 pode se observar uma vista frontal de uma unidade de deslocamento helicoidal. Esta é composta de três rodas, três braços, e de três pequenas molas que empurram as rodas de encontro à parede da tubulação (sendo que somente uma roda, uma mola e um braço, são mostrados na figura 4.7). Um robô pode ser composto por diversas unidades como esta, ligadas em série através de outras molas de dimensões maiores (Hayashi, Iwatsuki & Iwashina 1995).

- Forças contra a parede e constante elástica da mola;

Na figura 4.8 pode ser visualizado as forças resultantes contra a parede da tubulação e a constante elástica de uma mola, em um sistema misto.

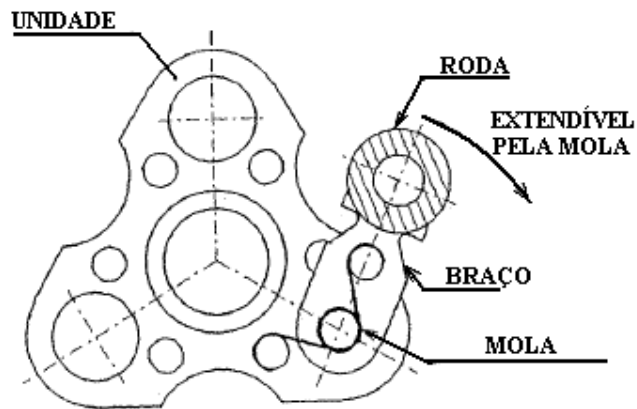


FIGURA 4.7: Vista de uma unidade de locomoção helicoidal (Hayashi, Iwatsuki & Iwashina 1995)

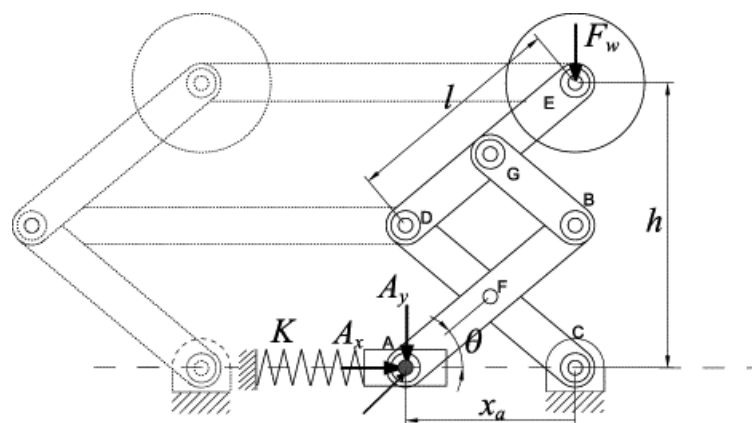


FIGURA 4.8: Forças contra a parede e constante elástica da mola (Choi & Ryew 2002)

Na figura 4.8, pode ser verificada uma base deslizante que permite um dobramento e desdobramento da haste das rodas. Onde, l é o comprimento do elo, Θ é o ângulo da dobradura do elo (medido por um potenciômetro), k é a constante elástica da mola e h representa a distância do centro da roda até a base.

F_w representa a força de reação da parede, A_x e A_y são as forças ativas no elo devido a mola e x_a é o deslocamento da base deslizante. Neste mecanismo as rodas se contraem e se expandem seguindo uma direção radial, esta característica é bastante vantajosa pois forças de distorção indesejáveis não são exercidas sobre o sistema robotizado quando este passa por algum obstáculo.

A partir da figura 4.8 podem ser derivadas algumas equações. Da relação entre h e x_a pode se obter:

$$h = 2x_a \tan \Theta = 2\sqrt{l^2 - x_a^2} \quad (4.5)$$

Quando existe variação no ângulo Θ , as forças radiais atuantes na mola podem ser descritas por:

$$A_x = \frac{2F_y}{\tan \Theta}, A_y = 0. \quad (4.6)$$

Das equações 4.5 e 4.6, pode ser derivada a equação seguinte:

$$A_x = \frac{2F_w x_a}{\sqrt{l^2 - x_a^2}} = 4F_w \frac{\sqrt{l^2 - \frac{h^2}{4}}}{h} \quad (4.7)$$

Agora, diferenciando a equação 4.7 e derivando a constante da mola K em um ponto de operação x_d que satisfaz

$$A_x = K(x_a - x_0), \quad (4.8)$$

onde x_0 denota o deslocamento inicial. Então temos

$$K = \frac{2F_w}{\sqrt{l^2 - x_d^2}} \cdot \frac{l^2}{l^2 - x_d^2} \quad (4.9)$$

$$x_0 = \frac{x_d^3}{l^2} \quad (4.10)$$

A equação 4.9 representa a constante da mola, e a equação 4.10 denota o comprimento inicial da mola. Ambas equações são básicas para o cálculo da força de pressão contra a parede da tubulação.

4.3 Limitações

Em tarefas de inspeção interna de dutos podem ocorrer algumas situações adversas, como o caso em que o sistema robótico fica preso na rede de tubulação devido a uma possível insuficiência de energia no sistema.

Como uma solução pode ser citada a que é utilizada no sistema robotizado de inspeção “GIRINO” (Reis 2001). Este robô possui um sistema de controle capaz de obter uma inversão na sua orientação e direção. Após este procedimento o seu mecanismo libera um mecanismo com rodas livres, facilitando assim o recolhimento do robô, via cabos. Esta é uma das características consideradas importantes neste sistema, visto que ele é utilizado em redes de tubulações submarinas muito extensas.

4.4 Módulos de tração disponíveis

As tabelas 4.1 e 4.2, a seguir, disponibilizam alguns módulos de tração, os que se utilizam de rodas exercendo pressão na parede da tubulação com movimentos helicoidais e os módulos PIGs. Sendo discriminadas algumas de suas características, tais como: fabricantes ou instituto onde foi desenvolvido; modelos; peso; velocidade; forma de alimentação; dimensões; velocidade e outras características não menos importantes.

TABELA 4.1: Módulos de tração à rodas com movimentos helicoidais

Tração	Fabricante	Mod	Diam(mm)	Peso	Vel	Num. modls	Alimen	Autono
Rodas	Laboratório de estruturas ativas Universidade Livre de Bruxelas- ULB	D-170	163 à 173	1300g	8cm/s	2	9 Bat. (AA NiCd 600 mAh)	2 hrs
		D-40	38 à 43	250g	3cm/s	3	9 Bat. (AA NiCd 600 mAh)	2 hrs
		D-70/1	68 à 72	470g	10cm/s	2	9 Bat. (AA NiCd 600 mAh)	2 hrs
		D-70/2	68 à 72	480g	5cm/s	2	9 Bat. (AA NiCd 600 mAh)	2 hrs
Rodas	Hirose e Yoneda Lab. Dept. de Mecânica e Engenharia aeroespacial, Tokyo Instituto de tecnologia	THES I	50	310g	depende da carga	2	Cabos para força e sinais	
		THES II	50	-	depende da carga	2	Cabos para força e sinais	
		THES III	100 à 200	-	depende da carga	2	Cabos para força e sinais	

* Mod: Modelo.

* Vel: Velocidade.

* Num. de Modls: Número de módulos.

* Alim: Alimentação.

* Diam: Diâmetro. * Bat: Baterias.

TABELA 4.2: Módulos de PIGs

Sistema	Fabricante	Tipo	Modelo	Diâmetro Polegada	Comprimento (mm)	Velocidade m/s	Pressão de operação	Temperatura operação	Autonomia	Raio curvatura	Espessura Máxima do tubo
PIG	Pipeway	Geom	PG3200-6,PG3200-8	6-30	1023-2640	0,2-6,0	3-100 Kgf/cm2	0-60 ° C	30-60h	3.0D	-
			PG3200-10,PG3200-12								
			PG3200-14,PG3200-16								
			PG3200-18,PG3200-20								
			PG3200-24,PG3200-26								
			PG3200-30								
PIG	Pipeway	Corr	XPR3000-6,XPR3000-8	6-36	2160-3930	0,5-4,0	20-150 Kgf/cm2	0-60 ° C	60h	3.0D	12,7mm
			XPR3000-10, XPR3000-12, XPR3000-14								
			XPR3000-16, XPR3000-18, XPR3000-20								
			XPR3000-24, XPR3000-26, XPR3000-30								
			XPR3000-36								

A constituição física destes sistemas podem ser visualizadas no capítulo 7, deste trabalho, da seguinte forma: As figuras 7.2 e 7.3 representam o sistema Thes I; a figura 7.6 representa o sistema Thes II; a figura 7.9 representa o Thes III; a figura 7.10 representa o sistema D- 170; a figura 7.11 representa o sistema D- 40; a figura 7.12 representa o sistema D- 70/1; a figura 7.13 representa o sistema D- 70/2.

4.5 Conclusão

Dentre os sistemas de tração que podem ser utilizados em inspeção interna de dutos mostrados anteriormente, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Em situação de “condutos fechados” a solução poderia ser a utilização de um sistema de inspeção que utiliza a própria pressão do fluido.
- Em redes de tubulações onde fluem materiais oleosos é necessária a aplicação de sistemas de tração capazes de realizar a sua locomoção exercendo pressão o suficiente para o sistema robotizados não escorregar no interior do duto. Este tipo de locomoção é o “ *Inchworm* ” ou “ lagarta”. Um sistema que utiliza este princípio é o sistema “GIRINO” (Reis 2001). O “GIRINO” é utilizado em redes de tubulações submarinas de petróleo. O sistema, *Inchworm* ” ou “ lagarta”, também pode ser utilizado em sistemas de inspeção endoscópicos.
- A escolha de um sistema de tração com pernas possui a vantagem da adaptabilidade ao meio, ao qual o sistema de inspeção poderá ser submetido, mas é considerado bastante complexo, visto que uma única perna pode possuir vários graus de liberdade além de possuir um alto consumo de energia. Pode ser utilizado tanto em trajetos horizontais quanto verticais.
- Em redes de tubulações consideradas simples (retas e horizontais) não existe a necessidade de se escolher um sistema de tração com mais recursos, tais como os sistemas mistos helicoidais e os que exercem forças de pressão nas paredes das tubulações, estes tipos de sistema de tração devem ser aplicados em projetos

de sistemas robotizados para inspeção de tubulações onde existam trajetórias verticais ou mistas, ou seja, em redes de tubulações mais complexas.

O presente capítulo forneceu em tabelas (4.1 e 4.2) alguns sistemas de tração, sendo que nestas foram discriminadas algumas características importantes tais como: fabricantes ou instituto onde foi desenvolvido; modelos; peso; velocidade; forma de alimentação; dimensões; velocidade dentre outras, com isto espera-se facilitar uma possível escolha de um sistema de tração que poderá ser aplicado a um projeto de sistemas robotizados de inspeção interna de dutos. Dentre os institutos de desenvolvimento e fornecedores que foram utilizados como base para este trabalho podem ser destacados:

- Universidade Livre de Bruxelas-Departamento de engenharia mecânica e robótica (www.ulb.ac.be/scmero/index.html), laboratório de estruturas ativas (Horodina et al. 2002);
- Instituto de Tecnologia Tokyo-Departamento de mecânica e engenharia aeroespacial, Laboratório Hirose e Yoneda (www-robot.mes.titech.ac.jp), (Hirose et al. 1999);
- PipeWay Engenharia, Rio de Janeiro- Brasil (www.pipeway.com).

Capítulo 5

Módulo de alimentação

5.1 Introdução

A energia necessária para a alimentação de um SRIID pode ser obtida de dois modos: através de cabos de força e através de baterias/ pilhas, sendo que pode haver uma combinação entre estes dois modos. Este módulo é responsável por manter a locomoção do sistema robotizado, e também pela alimentação de alguns dispositivos que constituem o sistema robotizado, tais como, sensores, câmeras e micro controladores, podendo para isso, combinar os dois meios de alimentação.

Em alguns sistemas robotizados pode existir a necessidade da existência de um sistema auxiliar de suprimento de força, que poderá vir a ser utilizado em alguma situação de emergência.

5.2 Alimentação via cabos

A escolha do sistema de alimentação depende da aplicação do sistema robotizado de inspeção. Esta alimentação pode ser feita diretamente pela rede de energia local tomando-se o cuidado de se utilizar de fontes de tensão adequadas e conversores Dc/Dc para eliminar qualquer ruído. Em alguns casos, a energia elétrica pode ser produzida na superfície por um gerador elétrico, e ser transmitida basicamente por cabos, que

devem ser apropriadamente dimensionados. O projetista deve, por um lado estimar a trajetória, por conseguinte o diâmetro do cabo para limitar os esforços, e por outro lado dimensionar o cabo em função da potência a ser transmitida e do comprimento da trajetória.

5.3 Alimentação feita sem a utilização de cabos

Neste caso a fonte de energia é embarcada. A escolha apropriada deve responder à algumas exigências. As principais referem-se a: Densidade de energia; Capacidade nominal da pilha ou bateria; Volume ou Massa; Segurança; Viabilidade ou Custos.

5.3.1 Pilhas

Por definição, não foram desenvolvidas para serem recarregadas, podem ser aplicadas em micro sistemas de inspeção ou em dispositivos existentes nestes sistemas.

As pilhas de Lítio tipo **SOCL2/Li** têm uma densidade de energia na faixa de 500Wh/Kg. Estas possuem uma autonomia de algumas dezenas de horas.

As pilhas de óxido de argêntil, **Zn/AgO** ou **Al /AgO**, possuem um regime de descarga bem elevado e sua densidade de energia varia de 200 à 300Wh/kg.

As pilhas alcalinas clássicas são igualmente utilizáveis. Possuem sua densidade de energia bem inferior, mas apresentam vantagens econômicas para alguns sistemas, podem ser utilizadas em dispositivos que consomem pouca energia.

5.3.2 Baterias recarregáveis

A utilização de baterias recarregáveis correspondem à maioria das aplicações.

O desenvolvimento recente de acumuladores à elevada temperatura (HT) tais como: Lítio/Sulfurados de Ferro e de Alumínio (100Wh/kg), Sulfato de Sódio, Cloreto de Sódio e Níquel, são eficazes em percursos curtos, apesar das restrições de manutenção e de segurança impostas por estas tecnologias.

Operacionalmente as tecnologias que se utilizam de Chumbo Ácido e Níquel/Cádmio atingem densidades de energia de 25 a 50Wh/kg, e possuem um número de ciclos de carga e recarga elevado. A principal desvantagem destas tecnologias é a questão do peso, em particular o caso do Chumbo. Podem ser utilizadas em robôs de inspeção para trajetos mais longos e demorados. Uma solução para a questão da massa da fonte de energia é utilizar baterias recarregáveis de Zinco/prata, estas podem atingir 120 Wh/kg, a desvantagem é que estas baterias possuem um alto custo e curta duração de vida.

Um outra tecnologia alternativa, que poderá vir a substituir as baterias à Ni/Cd e à Chumbo-Ácido, são as baterias de Níquel- Hidreto metálico (NiMH). Este tipo de tecnologia, além de apresentarem características operacionais similares às de Ni/Cd, possuem a vantagem de não possuir metais pesados tóxicos na sua composição, e de possuírem maior densidade de energia. Além disso, são consideradas ecologicamente mais corretas, pois podem reduzir os problemas associados com o seu futuro descarte (Ambrosio & Ticianelli 2001). Existem ainda um outro tipo de baterias recarregáveis como opção à utilização das baterias de Ni/Cd, são as de íons de Lítio (Li-ion). As vantagens e limitações das baterias seladas de níquel- hidreto metálico em relação às de níquel- cádmio estão resumidas nas tabela 5.1 e uma outra comparação incluindo as Li-ion pode ser verificada na tabela 5.2.

TABELA 5.1: Vantagens e desvantagens das baterias de Níquel-Hidreto metálico em relação as baterias de Níquel Cádmio.

Vantagens	Desvantagens
Capacidade de armazenamento de carga maior que as baterias de Ni/cd. Não ha necessidade de manutenção. Isenta de cádmio; problemas ambientais bastante reduzidos. Rápida capacidade de recarga. Ciclo de vida longo Vida longa em qualquer estado de carga	Desempenho de descarga não é tão bom quanto as baterias de Ni/Cd. Retenção de carga pobre pois sofre um processo de auto descarga de aproximadamente 2 % ao dia.

TABELA 5.2: Quadro comparativo entre as baterias recarregáveis de Ni/Cd, NiMH e Li-íon

Características	Ni/Cd	NiMH	Li-íon
Densidade de Energia (Wh/Kg)	40 a 60	60 a 80	100
Ciclo de vida	1500	500	500 a 1000
Tempo de carga (horas)	1	2 a 4	8 a 15
Tolerância a sobre carga	moderada	baixa	muito baixa
Custo típico (U_{ss})*	50	70	100

* Preço em Uss com referência nos Estados Unidos em maio/98.

5.3.3 Pilhas à combustível

O sistema eletroquímico de pilhas tipo à combustível representam uma alternativa ainda não realmente operacional. Distingue-se das pilhas de baixa temperatura (Pilhas Alcalinas) e das pilhas à elevada temperatura (Pilha à Óxido sólido, de Ácido Fosfórico. Em todo o caso o sistema é baseado na utilização de:

- Combustíveis (Hidrogênio- líquido comprimido e armazenado sobre hidruros, Álcoois e Hidrocarbonetos);
- Comburentes (Oxigênio Criogénico comprimido, água oxigenada).

Os principais problemas de dimensionamento de uma pilha à combustível sobre um sistema de inspeção referem-se ao controle dos procedimentos de troca dos combustíveis, e ao seu armazenamento sob pressão.

5.4 Sistemas de alimentação comerciais

As tabelas 5.3 e 5.4 fornecem alguns fabricantes de baterias e algumas de suas características, tais como capacidade em ampér hora, peso ou volume, temperatura de operação, série ou modelos, dentre outras. A tabela 5.3 em particular, fornece dados sobre baterias ou pilhas não recarregáveis a base de **Li**, **SOCl₂/Li**, **Zn/AgO** ou **AL/AgO** comuns, de alta capacidade e de altas temperaturas. A tabela 5.4, em particular, fornece dados sobre as baterias recarregáveis a base de **Ni/Cd**, **NiMH** e **Li-íon**, normais, de alta capacidade e de altas temperaturas. Essas baterias podem

ser utilizadas para alimentação do módulo de tração, dispositivos de comunicação e sensoriamento, maiores detalhes podem ser verificados nos *data sheets* disponibilizados pelos fabricantes.

TABELA 5.3: Pilhas/ baterias não recarregáveis de Li, SOCL₂/Li e Zn/AgO

Fabricante	Características / Modelos	Capacidade nominal(Ah)	Volt nominal	Peso (g)	Temperatura operacional
BiPower USA SOCL ₂ /Li	Prismáticas	0,4 a 19	3,6	8 a 24	-55 a 85°C
	Wafer ou Cilíndricas Altas temperaturas (HT)	1,6 a 10,5	3,6	8 a 24	-20 a 150°C
Tadiran Li	Para operações a longo prazo e standby longo.	0,4 a 40	3,6	5,7 a 193	-55 a 85°C
	Para operações com prazos extremamente longos.	0,4 a 19	3,6	5,78 a 92,5	-55 a 85°C
	Altas temperaturas (HT).	24 a 50	3,7 a 3,75	50 a 200	-20 a 150°C
Saftbatteries Zn/AgO	Modelo RA3	40 a 120	1,45	625 a 1404	-55 a 85°C

TABELA 5.4: Pilhas/ baterias recarregáveis de Ni/Cd, NiMH e Li-íon

Fabricantes	Características /Modelos	Capacidade nominal(Ah)	Volt nominal	Peso (g)	Temperatura operacional	Ciclos anos
Gm battery Ni/Cd	Alta, média baixa capacidade Mod: GN,GNZ,GNG, GNC	20 a 1000		1220 a 53000	-40 a 50°C	10 a 20
Gp Batteries	Altas Temp Série padrão	0,7 a 4,95 0,18 a 2,2	1,2	21 a 120 8 a 46,3	-20 a 70°C -20 a 50°C	
Sanyo Ni/Cd	Standard Alta capacd Alta temp	1,3 a 10 0,6 a 5,4 2 a 1,2	1,2 1,2 1,2	19 a 395 24 a 152 47 a 395		
saftbatteries Ni/Cd	Mod: SBH, SBM,SBL	7,5 a 1540		0,9 a 72		
Gp Batteries NiMH	Alta capacid Altas temp Série padrão Prismatica	0,16 a 13,65 1,25 a 4,05 0,07 a 4,725 0,4 a 1,4	1,2 1,2 1,2 1,2	3,75 a 247 26 a 53 6,5 a 130 10 a 23	-20 a 50°C -20 a 70°C -20 a 50°C -20 a 50°C	
Gp batteries Li-íon	Cilíndrica Prismatica	0,15 a 2,28 0,18 a 1,65	3,7 3,7	5,45 a 44		

5.5 Conclusão

O módulo de alimentação de um SRIID, seja qual for a escolha do projetista, deve ser capaz de efetuar uma alimentação plena ao sistema. Este módulo é responsável pelo funcionamento dos dispositivos do módulo de instrumentação, dos dispositivos do módulo de controle e pelo funcionamento do módulo de tração. É essencial que haja um correto dimensionamento da alimentação para que não ocorra situações de insuficiência de energia ao sistema. Um correto dimensionamento evita de o sistema robotizado falhar nas suas medições de inspeção, deste ficar parado no interior da tubulação e até mesmo evita acidentes, tais como quedas em trajetórias verticais, que poderiam vir a danificar o sistema robotizado e a própria tubulação.

Em sistemas de alimentação à cabos o projetista deve tomar o cuidado para não sobrecarregar o sistema e assim não danificar o mesmo. Pode se realizar a alimentação através da rede de energia, utilizando para isso fontes de alimentação e conversores dc/dc para se eliminar ruídos ou utilizar-se de geradores elétricos, tomando-se os mesmos cuidados.

Em sistemas de alimentação embarcada deve se tomar o mesmo cuidado com o dimensionamento da alimentação. Devem ser observados a densidade de energia da bateria, a sua capacidade nominal, seu ciclo de vida, sua massa, volume ou dimensões e seus custos.

As mais utilizadas são as recarregáveis de Níquel Cádmio e Chumbo ácido, sendo que estas podem ser substituídas pelas de Zinco/Prata, Níquel hidreto metálica e pelas de íons de lítio devido as suas maiores capacidades de armazenamento de carga, seus maiores ciclos de vida, sua leveza e até mesmo por que são mais aceitáveis em termos ambientais.

Dentre os fabricantes de baterias que foram utilizados como base para este trabalho podem ser destacados: Bi Power Corp. (USA-Batteries 2005); Tadiran batteries (Tadiran-Batteries 2005); Saft batteries (Saft-Batteries 2005); GMB batteries (GM-Battery 2005); Gold Peak batteries (GP-Batteries 2005) e Sanyo batteries (Sanyo-Batteries 2005).

Capítulo 6

Sistema de controle

6.1 Introdução

O módulo de controle em um SRIID é responsável pelo:

- Controle de movimento do sistema robotizado;
- Gerenciamento de comunicação do sistema robotizado com uma estação terrestre.

A figura 6.1 mostra, como exemplo, o sistema de controle de um SRIID. Este é dividido em duas partes, a parte robô e a parte operador. Este sistema de controle pode ser constituído, basicamente por um microcontrolador para controlar os movimentos do robô, estando integrado aos circuitos do motor do módulo de tração, além de suportar conversores de sinais e sensores (Choi & Ryew 2002). Geralmente o módulo de controle é integrado a um módulo de comunicação com a função de enviar a uma estação terrestre dados da inspeção provenientes dos sensores/ câmeras, situados em um módulo de instrumentação. O programa implementado no controlador pode ser desenvolvido utilizando-se linguagem C assembly, sendo que o mais importante é a capacidade desse código realizar um controle em tempo real, proporcionando, assim, um maior nível de funcionalidade ao sistema (Choi & Ryew 2002).

A partir daí, pode-se verificar que um sistema de controle básico é formado pela integração de três módulos: o módulo de controle, o módulo de instrumentação e o módulo de comunicação, conforme pode ser visualizado na figura 6.2.

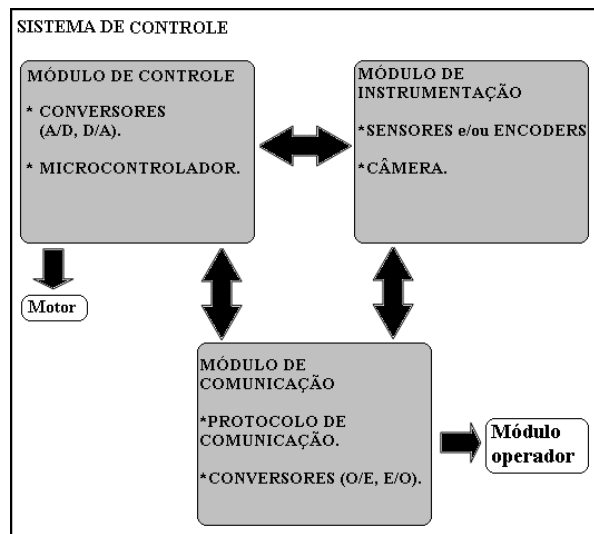


FIGURA 6.2: Sistemas de controle básico para sistemas robotizados de inspeção de dutos

- O *módulo de controle* é constituído basicamente por conversores de sinais (A/D, D/A) e por um microcontrolador. Os conversores de sinais recebem dados provenientes dos sensores e/ou encoders localizados no módulo de instrumentação. Os dados provenientes dos sensores e/ou encoders (detectores de obstáculos, sensores de proximidade e sensores de posição) tem a função de influenciar na decisão da locomoção do robô, por exemplo, exerce função na decisão de o robô continuar sua locomoção para frente, se o robô deve parar ou se deve retornar.
- O *módulo de instrumentação* é constituído basicamente por câmeras, sensores e/ou encoders. Tem a função de enviar dados de sensoriamento para o módulo de controle e enviar imagens de inspeção capturadas pela câmera para o módulo de comunicação.
- O *Módulo de comunicação* é constituído basicamente por uma interface de comunicação e por conversores eletro/ ópticos. A interface de comunicação, que pode ser a Rs232 (inadequado para longas distâncias) e a Rs485 (Próprio para longas distâncias), interage diretamente com um microcontrolador do módulo de controle e com os conversores eletro- ópticos, transmitindo dados provenientes da interface do usuário. Estes conversores recebem dados provenientes da câmera,

os convertem em dados elétricos e os transmitem para interface com o operador. A parte operador, por sua vez, transmite informações para os conversores eletro-ópticos, que as transmite para a interface de comunicação que interagem com o microcontrolador, e assim sucessivamente, controlando o movimento do sistema robotizado, agora através do módulo operador.

6.2 Controle de movimento

O controle de movimento de um sistema robotizado de inspeção de dutos está associado ao controle de funcionamento de seu motor. O motor deve ser controlado por programas computacionais implementado no microcontrolador do sistema de controle, tendo como referência dados enviados dos sensores situados no módulo de instrumentação.

É importante que este programa seja capaz de fazer com que o sistema robotizado realize a sua trajetória de inspeção com a possibilidade de parar ou retornar quando necessário. Por exemplo, em um percurso, se os sensores do sistema robotizado detectar algum obstáculo, o programa implementado no microcontrolador, através desta informação, deve ser capaz de fazer com que o robô pare e retorne, ou ainda, se houver algum caso em que haja a necessidade de uma decisão, o módulo de controle deve acionar a parte operador para que esta decisão seja feita manualmente.

6.3 Gerenciamento de comunicação

A comunicação de um robô de inspeção interna de dutos com uma estação terrestre pode ser feita por um cabo especialmente projetado. Este cabo geralmente é composto por fibras ópticas para sinais de vídeo e transmissão de dados e linhas de forças (em sistemas cuja alimentação não é embarcada).

Em sistemas de inspeção de dutos separados em módulos, o gerenciamento de comunicação deve ser feito baseado na comunicação entre os módulos e na comunicação entre o robô e uma estação terrestre.

A comunicação de dados entre os módulos do sistema robotizado, pode ser feita por barramentos, em curtas distâncias, até aproximadamente 15 metros, via Rs 232. A comunicação entre o robô e uma estação terrestre, para longas distâncias, até aproximadamente 1.5 Km (Romano 2002), pode ser feita via Rs 485, devido a ruídos que podem deturpar os valores medidos pelo módulo de instrumentação.

6.4 Microcontroladores

Como já foi visto, o microcontrolador tem a sua importância pois é nele que é implementado o código de controle de movimento do sistema robotizado e também o gerenciamento da comunicação do robô com a interface do usuário. Este deve ser capaz, a partir de dados provenientes do módulo de instrumentação, ou seja dos sensores e câmeras, de decidir se o sistema robotizado deve parar, prosseguir ou retornar quando estiver realizando um percurso de inspeção.

6.4.1 Definições importantes sobre microcontroladores

- ***Watchdog***

A fluência da execução do programa pelo microcontrolador durante a sua utilização é considerada bastante importante. Suponha que como resultado de qualquer interferência (que ocorra freqüentemente), o microcontrolador para de executar o programa ou, ainda pior, comece a trabalhar incorretamente. Quando isto acontece com um computador, é necessário apenas apertar o botão de reset e continuar o trabalho. Contudo, no caso do microcontrolador não é possível resolver o problema deste modo, porque não existe botão. Para ultrapassar este obstáculo, existe uma estrutura chamada watchdog (cão de guarda). Esta estrutura nada mais é um contador que o programa põe a zero sempre que é executado corretamente. No caso de ocorrer uma interrupção no programa o zero não vai ser escrito e o contador, por si só, encarregar-se-á de fazer o reset do microcontrolador, quando alcançar o seu valor máximo. Isto vai fazer com que o programa

seja executado novamente só que desta vez corretamente. Este é um elemento importante para que qualquer programa seja executado corretamente, sem precisar da intervenção do ser humana.

- **Interrupções**

A interrupção é um mecanismo que o microcontrolador possui e que torna possível responder a alguns acontecimentos no momento em que eles ocorrem, qualquer que seja a tarefa que o microcontrolador esteja executando no momento. Esta é uma parte muito importante, porque fornece a ligação entre um microcontrolador e o mundo real. Geralmente, cada interrupção muda a direção de execução do programa, suspendendo a sua execução, enquanto o microcontrolador executa um subprograma que é a rotina de atendimento de interrupção. Depois de este subprograma ter sido executado, o microcontrolador continua com o programa principal, a partir do local em que o tinha abandonado.

6.4.2 Famílias de microcontroladores

Existem algumas famílias de microcontroladores que podem ser utilizadas em sistemas de controle de sistemas robotizados de inspeção, tais como: a família *Intel*, a família *Pic*, e a família *AVR*.

- Família *Intel*;

A Intel possui três famílias de microcontroladores: A MCS-48 e MCS-51, ambas de 8 bits e a MCS-96 de 16 bits. Cada família possui um núcleo básico (arquitetura e instruções), das quais variam uma ampla variedade de produtos.

MCS-48: 8048, 8748, 8049, 8749, 8035,8039,8050,8040,etc.

MCS-51: 8031, 8051, 8751, 8032, 8052, 8752, 8054, 8754, 8058, 8758, 8351FA, 8051FA, 8751FA, 8051GB, 8751GB, 8051SL-BG, 83152, etc.

MCS-96: 8096, 8098,80196, 83196, 87196, 80198, 83198, 87198, 80193, 83193, 87193, etc.

Aqui será mostrada somente a família MCS-51. Ela não é tão antiga e limitada como a MCS-48 nem tão cara como a MCS-96. Devido a esse fator é atualmente a família de microcontroladores de maior emprego.

Suas Características são:

- Alimentação V_{cc} entre 2,7 a 6 Volts.
- Possuem 5 interrupções: Duas externas, duas dos temporizadores ou contadores e uma da porta serial.
- Possui arquitetura RISC.
- Tem programas e dados em memórias distintas.
- Possui porta serial “ full duplex” para transmitir e receber dados simultaneamente.

- Família *PIC*;

Os microcontroladores PICmicro, da empresa Microchip, são divididos em seis famílias, todas com arquitetura de 8 bits, das quais podem ser citadas: Pic12, Pic14, Pic16.

Suas características são:

- Alimentação V_{cc} entre 2 a 6 Volts;
- Possuem 4 fontes de interrupção;
- Possui arquitetura RISC;
- Memória de programa Flash, de 1024 endereços de palavras de 14 bits, destes, os endereços zero e quatro estão reservados respectivamente para o reset e para o vector de interrupção;
- Baixo consumo.

- Família *AVR*;

AS características dos microcontroladores AVR são:

- Alimentação V_{cc} entre 4 a 6 Volts;

- Possui 8K Bytes de memória Flash programável com duração de, no mínimo, 1.000 ciclos de escrita;
- Fontes de interrupção interna e externa;
- Três modos de economia de energia;
- Possui arquitetura RISC;
- Possui 512 Bytes de EEPROM com duração de 100.000 ciclos de escrita.

6.5 Interface com o operador

O módulo operador é constituído basicamente por conversores eletro- ópticos, um computador pessoal, um joystick e um monitor para acompanhar as imagens capturadas pela câmara. A transmissão de dados de imagens, bem como outros dados importantes para o operador, pode ser feita através de cabos ou remotamente.

A figura 6.3 mostra uma interface que pode ser utilizada em sistemas robotizados de inspeção interna de dutos. Esta interface é conhecida como GUI (Interface Grafica do Usuário), e utiliza o Windows 98 como plataforma e é codificada com Visual C++ (Choi & Ryew 2002). Esta fornece informações sobre o movimento do sistema robotizado, através das imagens capturadas pela câmara do módulo de instrumentação.

A vantagem da inspeção visual em conjunto com a inspeção sensorial é que, em regiões em que ocorre ramos ou braços na tubulação, se torna importante a realização de uma pilotagem, para decidir ou direcionar o sistema robotizado na trajetória desejada.

- Mecanismo de pilotagem

Em situações como essa, pode ser utilizado um mecanismo de pilotagem chamado **DAUJ**, Junta Universal Duplamente Ativa (Ryew & Choi 2001). Este mecanismo habilita uma locomoção tridimensional do robô dentro da tubulação. Tornando possível a escolha de direção em ramos, assemelhando-se a uma junta de dois graus de liberdade em manipulador articulado (Choi & Ryew 2002).

Na situação vista na figura 6.4 a navegação do robô pode ser feita da maneira convencional, com o mecanismo de pilotagem “*OFF*”, pois não existe nenhuma

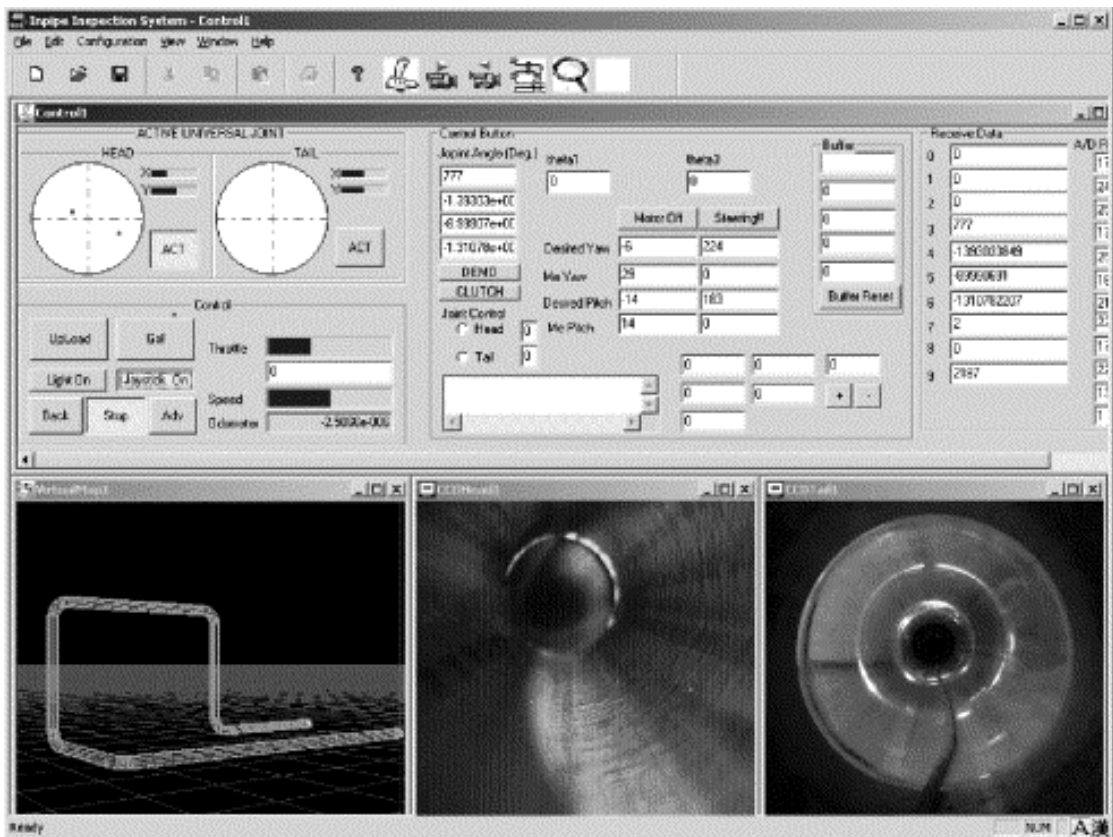


FIGURA 6.3: Interface gráfica do usuário (GUI), (Choi & Ryew 2002)

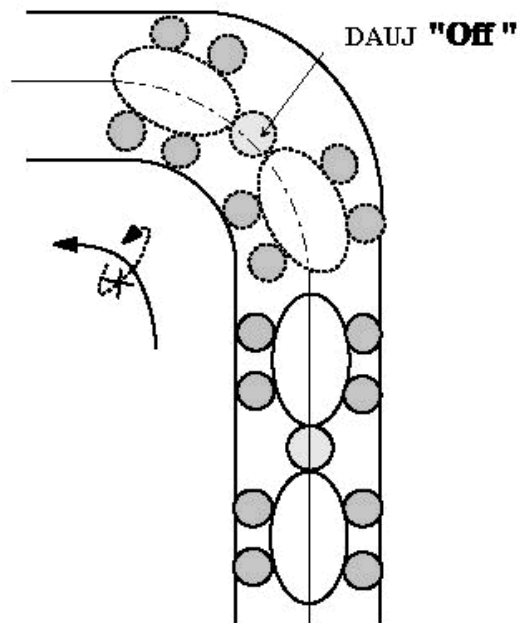


FIGURA 6.4: Locomoção de um sistema robótico em região curva de uma tubulação (Choi & Ryew 2002)

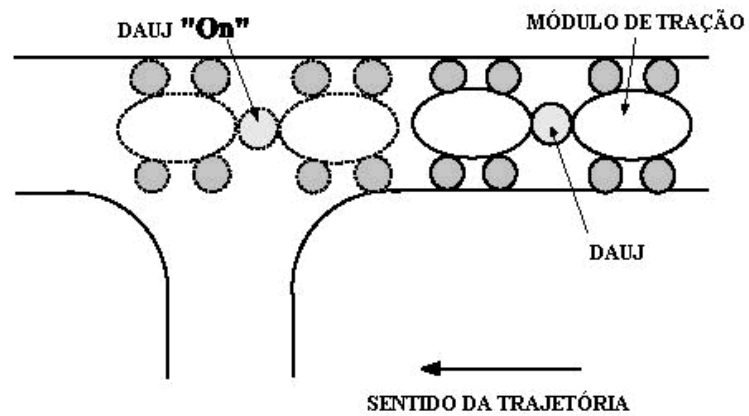


FIGURA 6.5: Locomoção de um sistema robótico em uma região ramo de uma tubulação (Choi & Ryew 2002)

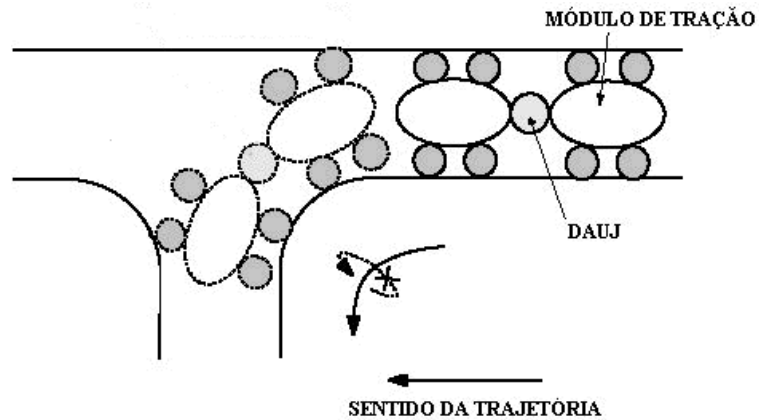


FIGURA 6.6: Pilotagem de um sistema robótico em uma região ramo de uma tubulação (Choi & Ryew 2002)

ramificação, logo não existe nenhuma decisão a ser questionada com relação à trajetória a seguir. Por outro lado, quando o robô navega em uma região na qual existe uma ramificação, conforme a figura 6.5, o módulo de controle deve acionar um controle manual e o robô deverá ser pilotado através da interface com o usuário, para ser decidida a direção a ser tomada. Ou seja, para se realizar o trajeto verificado nas figuras 6.5 e 6.6, o sistema de pilotagem deve manter-se ativo para o sistema robotizado ser pilotado manualmente (Choi & Ryew 2002).

6.6 Conclusão

Conforme visto, o sistema de controle de um robô de inspeção é a parte responsável pelo controle de movimento do sistema robotizado e pelo gerenciamento de dados provenientes do módulo de instrumentação. Este controle de movimento está diretamente relacionado ao controle do motor. O sistema robotizado deve ser capaz de parar, prosseguir e retornar quando for necessário, além de ser capaz de ativar um sistema de pilotagem manual quando houver necessidades de decisões, sendo para isto utilizada uma interface gráfica. Este controle é realizado por códigos implementado no microcontrolador, tendo como variáveis os dados recebidos do módulo de instrumentação. A comunicação entre os módulos do sistema robotizado, pode ser feita por barramentos, via Rs 232 e Rs 485 dependendo da distância entre os módulos.

Dentre os fabricantes/fornecedores de microcontroladores que foram utilizados neste trabalho podem ser destacados: Intel (Intel 2005); Microchip (Microchip 2005) e Atmel (Atmel 2005).

Capítulo 7

Exemplos de SRIIDs

7.1 Introdução

Neste capítulo foi feito um levantamento de alguns sistemas robotizados de inspeção interna de dutos existentes, foram ressaltadas suas características e as situações principais onde estes sistemas são aplicados. A partir deste levantamento, estas características foram discriminadas nas tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 (Hirose et al. 1999).

Dentre as características dos sistemas robotizados de inspeção interna de dutos a serem mostrados a seguir, e as restrições que o meio físico oferece, podem ser citadas as seguintes (Horodincea et al. 2002):

- Diâmetro da tubulação;
- Raios das curvaturas;
- Velocidade de deslocamento;
- Força do motor;
- Número de corpos/ juntas;
- Peso;
- Tração;
- Tipo de tubulação;

- Sensoriamento;
- Controle.

TABELA 7.1: Levantamento de sistemas robóticos de inspeção I

Robô	Theuse I	Theuse II	Theuse III
Fabricante	Laboratório Hirose e Yoneda, Dept. de mecânica e eng. aeroespacial Tokyo instituto de tecnologia	Idem ao Theuse I	Idem ao Theuse I
Diâmetro do duto	50 mm	50 mm	100- 200 mm
Peso	310g	-	-
Comprimento	300 mm		
Número de módulos			
Tração	helicoidal, rodas livres	rodas	rodas
Motor	DC	DC	DC
Velocidade	depende da carga	-	-
Raio da curva/trajetória	1/1.5 vezes o diâmetro/cotovelo e retas	Cotovelos e retas	cotovelos e retas
Materia fluente no duto	Gás	Gás	Gás
Potência/alimentação	Cabos e hastes para força e sinais	Idem ao Theuse I	Idem ao Theuse I
Sensor	-	-	-
Computador	remoto	remoto	remoto

7.2 Robôs série Theuses

Os robôs da série Theuses foram desenvolvidos para tubulações de pequenos diâmetros (25mm até 200mm) e com configuração complexas possuindo trajetórias verticais, horizontais e cotovelos. Estes modelos possuem tração por rodas, são alimentados por cabos e são caracterizados, principalmente, por um conceito chamado de “*Whole Stem Drive*” (movimento completo dos cabos), ou simplesmente **WSD**.

O conceito de **WSD** é de grande importância para sistemas robóticos de inspeção que possuem cabos de alimentação ou de transmissão de sinais, e também para tubulações longas e compostas de vários cotovelos. O **WSD** é caracterizado pela não existência de uma concentração das unidades do sistemas robotizado em um único bloco maciço, pelo contrário este sistema é formado por várias unidades dirigíveis sobre um único cabo com uma separação apropriada entre estas unidades. Este conceito leva ao veículo dentro da tubulação uma redução drástica do atrito entre o seu cabo

TABELA 7.2: Levantamento de sistemas robóticos de inspeção II

Robô	D-170	D-40	D-70/1	D-70/2
Fabricante	Dept. de eng. mecânica e robótica, laboratório de estruturas ativas Universidade Livre de Bruxelas	Idem ao D-170	Idem ao D-170	Idem ao D-170
Diâmetro do duto	163-173 mm	38-43 mm	68-72 mm	68-72 mm
Peso	1300g	250g	470g	480g
Número de módulos	2	3	2	2
Tração	rodas/5N	rodas/5N	rodas/5N	rodas/5N
Motor	DC(10W)	DC(3.2W)	DC(6W)	DC(6W)
Velocidade	8cm/s	3cm/s	10cm/s	5cm/s
Raio da curva/trajetória	r>600 mm vertical e horizontal	>110 mm vertical e horizontal	>170 mm vertical e horizontal	>170 mm vertical e horizontal
Material fluente no tubo	Gás	Gás	Gás	Gás
Potência/alimentação	Baterias	baterias	baterias	baterias
Sensor	-	-	-	-
Computador	remoto	remoto	remoto	remoto

TABELA 7.3: Levantamento de sistemas robóticos de inspeção III

Robô	Sistema robotizado pilotável para inspeção interna de redes urbanas de tubulação de gás	Robô para micro inspeção de dutos com 1 polegada	GIRINO
Fabricante	(Choi & Ryew 2002)	(Suzumori, Miyagawa, Kimura & Y.Hasegawa 1999)	(Reis 2001)
Diâmetro do duto	160-240mm	23 mm	Adaptável
Peso	-	16g	
Comp. do robô	-	110mm	1m
Número de módulos	5	1	2
Tração	rodas/40Kg de carga vertical	rodas/ 1N de carga	7,5 ton
Motor	-	Pneumático	-
Velocidade	10m/s horizontal	6mm/s	1 a 2 Km/h
Raio da curva/trajetória	1/1.5D	-	flexível
Material que passa no tubo	Gás	Gás e água	Óleo e gás
Potência/alimentação	cabos e hastes	Cabos	cabos
Sensor	unidade NDT e câmera CCD	câmera CCD	-
Computador	remoto	remoto	remoto

e a parede da tubulação na região do cotovelo evitando, assim, uma possível ruptura, conforme indicado na figura 7.1 . A seguir serão caracterizados os modelos da série Theuses e suas respectivas particularidades.

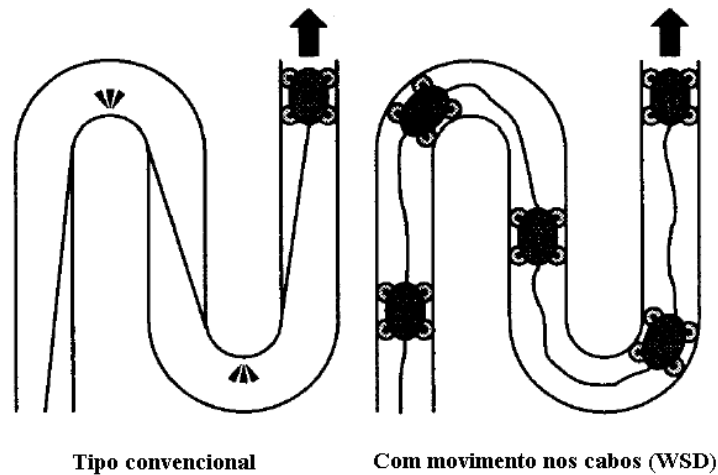


FIGURA 7.1: Sistemas robóticos do tipo convencional e “*Whole Stem Drive*” (Hirose et al. 1999)

7.2.1 Sistema robótico THES I

A estrutura deste sistema robotizado pode ser visualizado na figura 7.2. Este sistema possui um mecanismo que garante uma propulsão eficiente em tubulações de pequenos diâmetro, conforme será visto mais adiante. O mecanismo do Thes I envolve movimentos helicoidais, e possui as seguintes vantagens; I) Minituarização. II) Sensibilidade a carga, “Transmissão continuamente variável” (Continuously variable transmission, **CVT**).

O Sistema robótico THES I, mostrado nas figuras 7.2 e 7.3, é composto de duas unidades ; a unidade A e a unidade B. Em cada unidade é gerado um torque por um minúsculo motor DC. O torque gerado é transferido para os rolos de movimentos helicoidais, diretamente via uma junta universal, um cabo e uma engrenagem planetária. As suas rodas, cujo movimentos são livres, são distribuídas igualmente nos rolos, possuindo um determinado ângulo com relação ao eixo do duto. Estas rodas

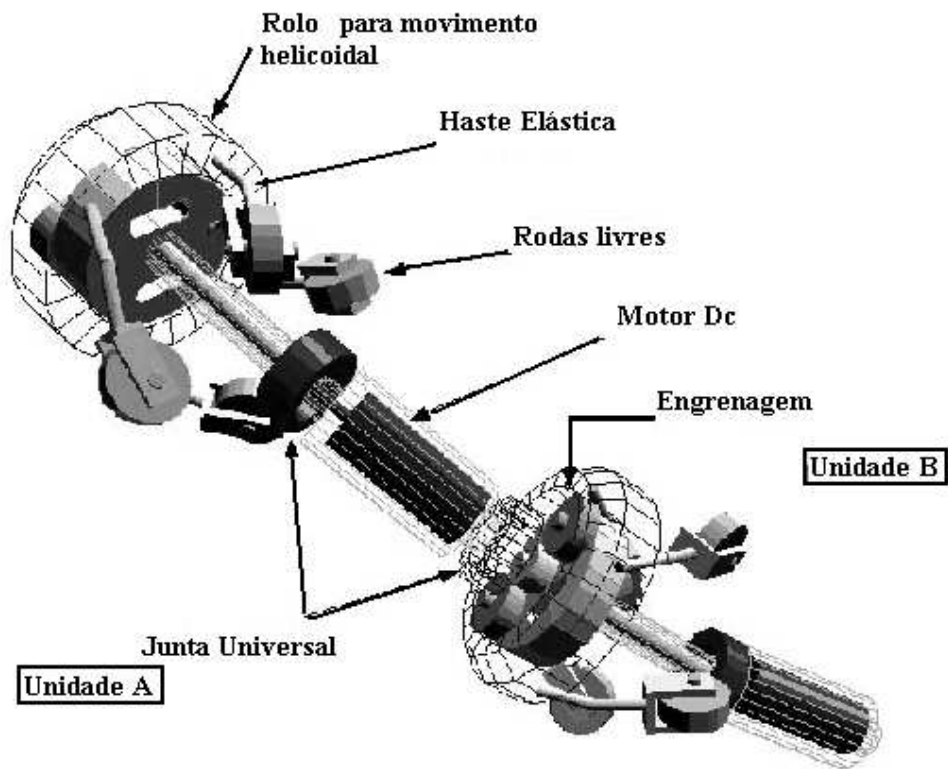


FIGURA 7.2: Esquema do sistema robótico THES I (Hirose et al. 1999)

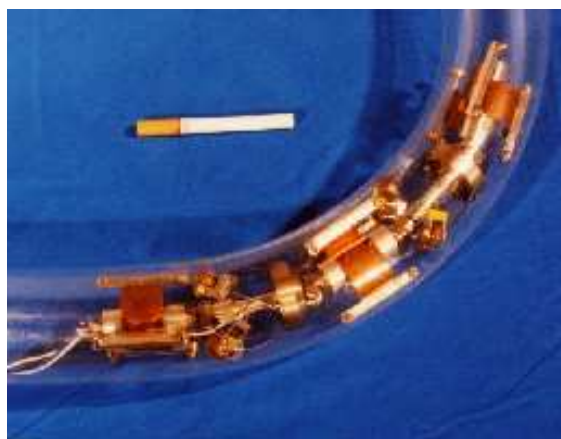


FIGURA 7.3: Foto do sistema robótico THES I (Hirose et al. 1999)

livres são pressionadas contra a parede da tubulação gerando, assim, uma propulsão por movimentos helicoidais.

A técnica de “Transmissão continuamente variável” (CTV) é uma grande vantagem do THES I, pois, em projetos de veículos de inspeção de dutos, o mecanismo de variação automática do raio do veículo dirigível garante, em caso de um aumento de carga ou principalmente em trajetórias verticais, a estabilidade do veículo, superando a gravidade e deformidades da parede da tubulação. Na medida em que há um aumento da carga haverá um aumento do raio do veículo dirigível, como pode ser observado na figura 7.4, ou seja, através do ângulo de deflexão entre as rodas livres, juntamente com as hastes elásticas e o eixo do duto. Por outro lado este aumento do raio do veículo dirigível resulta em um decréscimo de velocidade do mesmo.

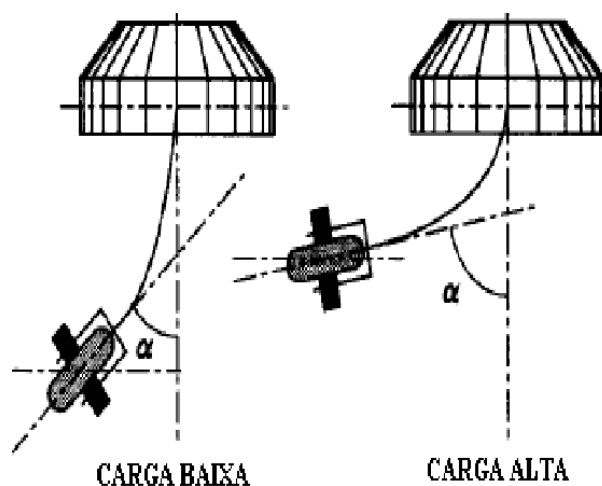


FIGURA 7.4: Exemplo da técnica “CTV” em sistemas robóticos de inspeção interna de dutos (Hirose et al. 1999)

7.2.2 Sistema robótico THES II

O sistema robotizado de inspeção THES II surgiu da necessidade de suprir as falhas das maiorias dos sistemas robotizados de inspeção. A maioria desses sistemas robotizados destes não conseguem realizar, com sucesso, trajetórias nas regiões em formato de cotovelo, pois nestas regiões existem certas deformidades cujas dimensões são bastante significativas.

Cada unidade do sistemas robotizado **THES II**, deve ser a mais curta possível na direção do eixo do duto, de modo que este sistema siga perfeitamente na região do cotovelo e suas rodas devem possuir um diâmetro grande, o suficiente, para superar as deformidades existentes nesta região.

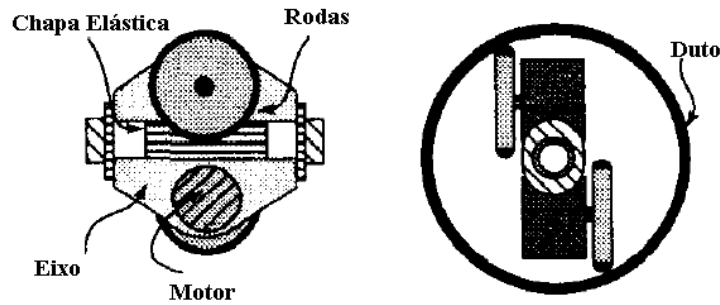


FIGURA 7.5: Vista da unidade dirigível do sistema robótico THES II (Hirose et al. 1999)

O **THES II** é dividido em duas partes de acordo com a sua função, a parte dirigível e a parte de direção. A parte dirigível possui várias unidades conforme a vista na figura 7.5, para compor um sistema de “Transmissão continuamente variável” (CTV). Estas unidades são conectadas umas nas outras através de cabos. Cada unidade dirigível possui dois motores DC, os menores possíveis. Os dois motores possuem uma roda com um grande diâmetro e uma chapa elástica prensada entre eles, com a finalidade de pressionar as rodas contra a parede do duto.

A parte de direção é um mecanismo que direciona o corpo total do sistema robotizado, possui uma forma oval e achatada, conforme pode ser visto nas figuras 7.6 e 7.7. É instalada na extremidade da unidade guiada com um determinado ângulo em relação ao eixo do duto, com isto torna-se certa a sua movimentação nas regiões do cotovelo. Este mecanismo é muito simples e envolve somente um grau de liberdade. Esta característica é de grande importância em projetos de veículos de inspeção interna de dutos com pequenos diâmetro.



FIGURA 7.6: Sistema robótico THES II inserido dentro de uma tubulação (Hirose et al. 1999)

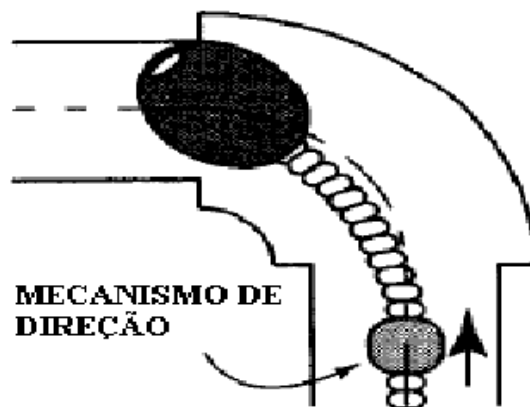


FIGURA 7.7: Mecanismo de direção do sistema robótico THES II (Hirose et al. 1999)

7.2.3 Sistema robótico THES III

É um sistema robótico de inspeção próprio para tubulações de 100 à 200 mm de diâmetro interno. Tubulações de grandes dimensões permitem projetos de robôs de inspeção com uma ampla opção de mecanismos dirigíveis e também permite a possibilidade de se alocar sensores à bordo do robô com a finalidade de promover uma locomoção mais confiável no interior do duto.

O **THES III** utiliza uma tecnologia chamada “ Controle configurado de veículos” ou **CCV** (Control Configured Vehicle), conforme mostrado na figura 7.8. Esta técnica, pode ser bastante significativa no processo de locomoção de sistemas robotizados de inspeção de dutos. É um mecanismo que controla constantemente a postura do veículo no interior da tubulação. Ou seja, possui a finalidade de obter um melhoramento constante da mobilidade do sistema robotizado dentro do ambiente interno do duto. O THES III, mostrado na figura 7.9, possui quatro unidades com rodas que se mantem pressionadas contra a parede da tubulação (Hirose et al. 1999).

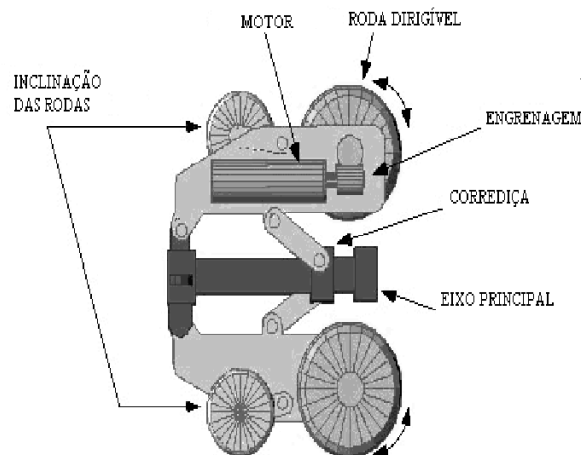


FIGURA 7.8: Vista do sistema robótico THES III (CCV) (Hirose et al. 1999)

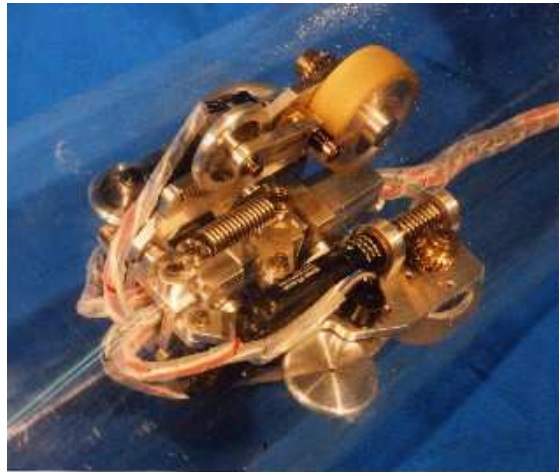


FIGURA 7.9: Foto do sistema robótico THES III (Hirose et al. 1999)

7.3 Robôs série HELI-PIPE

Consiste de quatro tipos de sistemas robotizados de inspeção interna de dutos diferentes: **D-170**; **D-70/1**; **D-70/2**; **D-40**. Estes possuem duas partes articuladas com uma junta universal, o estator e o rotor. O estator é guiado ao longo do duto por um conjunto de rodas que se movimentam paralelo ao eixo do duto, enquanto que o rotor é forçado a seguir um movimento helicoidal, devido ao fato de este ser equipado com rodas inclinadas com pequenos ângulos em relação ao eixo do duto. Um único motor DC é posicionado entre dois corpos para produzir o movimento. Todas as rodas do robô são alocadas sobre uma suspensão com a finalidade de fazer com que o corpo como um todo do sistema robotizado suporte as variações de diâmetro e regiões curvas dos dutos. Os robôs desta série são autônomos, em se tratando de trajetórias mistas, mas sem ramificações, e levam suas próprias baterias além de serem conectadas a uma estação terrestre via rádio.

7.3.1 Sistema robótico D-170

É um robô projetado para inspeção de dutos com diâmetros medindo 170mm, como pode ser visto na figura 7.10. Este robô é rigidamente conectado no eixo do motor e possui três pares de rodas sobre o rotor e três pares de rodas sobre o estator, garantindo assim estabilidade o suficiente. Para que este sistema robotizado realize sua trajetória, em dutos com curvaturas menores (raio maior que 600mm), é necessário que este possua mais graus de liberdade, com isto pode se garantir que o rotor e o estator não fiquem em um mesmo eixo durante a trajetória curva. Isto é realizado graças a uma junta universal provida de uma folga axial ao longo dos dois eixos das duas juntas (Horodincea et al. 2002).

O robô é provido com nove baterias (AA NiCd 600mAh) que são distribuídas ao redor do motor sobre o estator. Alguns testes realizados com este robô mostram que estas baterias garantem uma autonomia na faixa de 2 horas.



FIGURA 7.10: Arquitetura de dois corpos do sistema robótico D-170 (Horodincea et al. 2002)

7.3.2 Sistema robótico D-40

Para o caso de tubulações de diâmetros menores a configuração do robô anterior (D-170) não é possível, para esta situação o sistema robotizado é composto de três corpos separados por duas juntas universais (Horodincea et al. 2002) como pode ser visto na figura 7.11.

O **D-40** é um sistema robotizado projetado para tubulações de 40mm de diâmetro com partes curvas (raio da curvatura maior que 110mm), e os seus três corpos tem as seguintes configurações: o primeiro corpo consiste de um rotor com rodas inclinadas; o segundo inclui o motor e o redutor; o terceiro é formado pelo estator com rodas axiais, suprimento de energia e o telecomunicador.

7.3.3 Sistema robótico D-70/1

Existem dois projetos alternativos para tubulações de 70mm de diâmetro o **D-70/1** e o **D-70/2**. O **D-70/1** é o primeiro protótipo para tubulação curva com estas dimensões de diâmetro e raio de curvatura maior que 170mm. Uma junta universal é



FIGURA 7.11: Arquitetura de três corpos para pequenos diâmetros do sistema robótico D-40 (Horodincea et al. 2002)

alocada entre o estator e o rotor, sendo que para este protótipo o motor e as baterias são montadas sobre o estator, conforme pode ser visto na figura 7.12.



FIGURA 7.12: Arquitetura do sistema robótico D-70/1 (Horodincea et al. 2002)

7.3.4 Sistema robótico D-70/2

O **D-70/2** possui basicamente as mesmas características do D-70/1, a única diferença é que este protótipo possui o motor, as baterias e o elo à radio montados sobre o rotor, conforme a figura 7.13.



FIGURA 7.13: Arquitetura do sistema robótico D-70/2 (Horodincea et al. 2002)

7.4 Sistema robotizado pilotável para inspeção interna de redes urbanas de tubulação de gás

Este SRIID foi desenvolvido com a proposta de ser utilizado como uma plataforma móvel de testes visuais e não destrutivos (**NDT**) em cadeias de tubulações. Este é configurado com uma estrutura articulada, sendo ligado a um cabo (Choi & Ryew 2002). Dois veículos dirigíveis são alocados na frente e na traseira do sistema robotizado, respectivamente. Os módulos passivos, tais como o módulo de controle e outros módulos opcionais, são unidos entre os veículos ativos de tração. Este sistema robótico possui outras características importantes tais como: mecanismo dirigível de pernas com rodas e um mecanismo de direção com controle complacente. Especialmente o mecanismo de direção conhecido como *Junta Universal Duplamente Ativa* (DAUJ) (Ryew & Choi 2001), o qual intrinsecamente, previne uma agitação do robô ao longo da direção na qual este é guiado, permitindo, assim, seu controle complacente. Estas características fazem com que o sistema robotizado mostrado nesta seção tenha uma excelente mobilidade dentro de um ambiente com espaço altamente restrito e ao mesmo tempo superando as configurações complicadas das redes de tubulações.

- **Requerimentos do projeto:**

O presente sistema robotizado foi projetado para inspeção interna de dutos cujo diâmetro é da ordem de 8 polegadas (Choi & Ryew 2002), aproximadamente 20 cm, sabendo-se que as dimensões de um SRIID são fatores críticos no que diz respeito à capacidade de realizar manobras em cadeias de tubulações complexas e que exigem uma alta flexibilidade do sistema robotizado.

Baseado nas configurações das tubulações, os requerimentos para o projeto deste sistema robotizado são:

1. O sistema deve ser capaz de ser pilotado manualmente quando necessário;
2. As regiões curvas (cotovelos) devem possuir curvaturas menor que o inverso de 1,5 vezes do valor nominal do diâmetro;
3. Tubulações com percursos retos e com diâmetro medindo entre 160-240 mm

4. O sistema de possuir força de tração o suficiente, assumindo ser mais que 40 kg a carga vertical, excluindo o seu próprio peso;
5. O trajeto com um mínimo de 500 m de percurso e velocidade maior que 3m/s em trechos horizontais.

Os requerimentos de (1) a (3) são fundamentais para o locomoção do robô dentro de tubulações. Da mesma forma os requerimentos (4) e (5) descrevem capacidades suplementares que são necessárias para que o robô possa realizar tarefas úteis utilizando ferramentas apropriadas de inspeção, tais como, sensores, câmeras e unidades NDS (Choi & Ryew 2002).

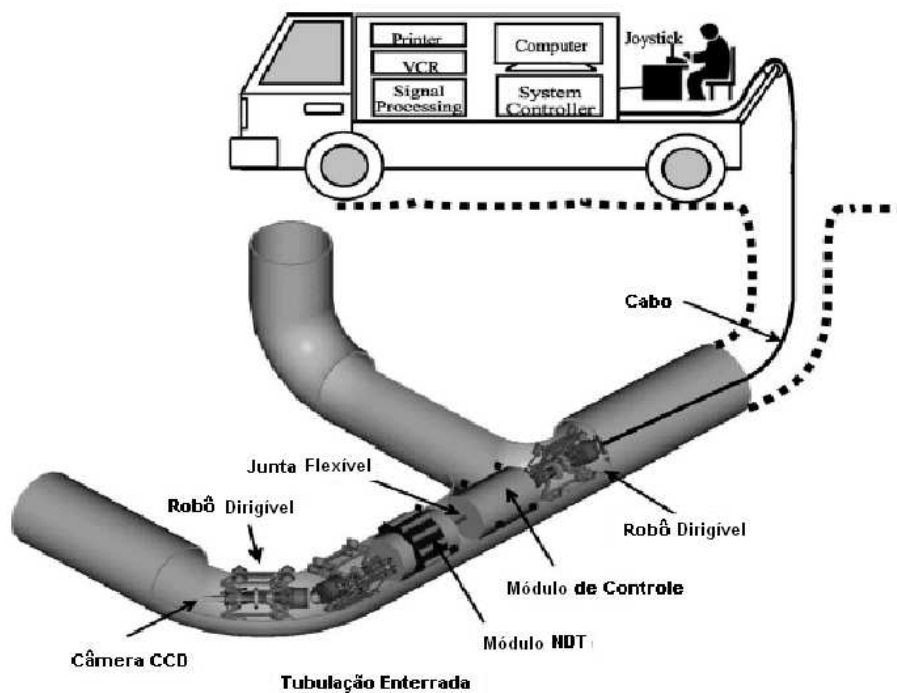


FIGURA 7.14: Constituição do sistema robótico pilotável (Choi & Ryew 2002)

O projeto destes sistemas depende, principalmente, do estado presente da arte na tecnologia, bem como dos requerimentos do sistema. A configuração das tubulações restringem o tamanho total do robô e a tecnologia corrente determina a possibilidade de implementação, pois o atuador, os *drivers* eletrônicos, o estoque de energia, o controle, os sensores e as ferramentas de comunicação devem ser alocados em um espaço extremamente pequeno. Do ponto de vista da presente

tecnologia, e por esta razão, o robô deve ser maior o possível em comprimento. Uma solução razoável para este problema é utilizar uma estrutura articulada tal como um robô com multi- juntas, ainda que o controle deste tipo de robô seja mais difícil (Choi & Ryew 2002). Na figura 7.14 pode- se observar uma configuração possível de um robô funcionalmente particionado em módulos, tais como, módulos dirigíveis, módulos de controle, módulo de sensores, dentre outros.

- **Visão geral desse sistema robotizado:**

Como pode ser observado na figura 7.14, o proposto sistema robotizado de inspeção consiste de corpos articulados incluindo veículos dirigíveis, módulo de controle, cabos e estação terrestre. O módulo de instrumentação para o NDT pode ser aderido ao robô opcionalmente. A figura 7.14 descreve o robô proposto dentro de uma tubulação sendo simulado com facilidade. Basicamente um sistema robotizado é projetado para possuir força de tração o suficiente para escalar dutos verticais ou arrastar cabos presos a eles. Cada veículo dirigível (seja o dianteiro ou o traseiro) possui um mecanismo flexível de pernas com rodas que serão pressionadas contra a parede do duto, respectivamente, e esta fricção entre as rodas e a parede interna do duto ajudam a gerar força motriz. Durante uma navegação com sentido para frente o veículo dirigível frontal ao robô gera forças de tração e o veículo da parte traseira gera forças que o impulsionam e vice versa. O veículo dirigível é formado por dois segmentos e um mecanismo de direção entre os segmentos. O mecanismo de direção chamado DAUJ (Junta Universal Duplamente Ativa) (Ryew & Choi 2001), habilita uma locomoção tridimensional do robô dentro da tubulação. Isto torna possível a escolha de direção em ramos, assemelhando- se a uma junta de dois graus de liberdade em manipulador articulado. Os módulos passivos, tais como NDT, são perfeitamente unidos via juntas universais. Como uma característica adicional, esta Junta Universal Duplamente Ativa (Ryew & Choi 2001), habilita um controle complacente. Devido a esta complacência e ao mecanismo de pernas com rodas o corpo inteiro do sistema robotizado possui uma certa flexibilidade e, como uma mola, evitam o excesso de forças reflexivas provenientes das paredes durante o movimento, propiciando,

assim, uma excelente mobilidade ao sistema robotizado. A “Junta Universal Duplamente Ativa”, também, não permite a agitação do sistema robotizado ao longo da direção em que este anda, por outro lado, o robô pode ser curvado, ou realizar manobras helicoidais, sendo importante lembrar que este tipo de manobra pode causar danos sérios ao sistema robotizado e também eventualmente fazer com que ocorra rupturas no cabo que é unido a este sistema robotizado.

A comunicação do robô com a estação terrestre é feita através de cabos. Este cabo é composto por linhas de força e fibra óptica para o sinal de vídeo e para a transmissão de dados digitais (Choi & Ryew 2002).

- **Veículo dirigível/módulo de tração:**

Conforme pode ser visto na figura 7.15, este é composto por dois segmentos, um dianteiro e outro traseiro, estes são unidos via DAUJ e ambos possuem três mecanismos de pernas com rodas que podem ser simultaneamente dobradas e desdobradas, dependendo da espessura ou da restrição interna no interior do duto, exercendo, assim, uma força de pressão contra a mesma.

No SRIID em questão as forças de tração são principalmente geradas pelas rodas localizadas nas pernas, sendo que estas são atuadas por um motor DC, localizado no corpo principal do seguimento traseiro. A força do motor é uniformemente transmitida via um mecanismo de redução com engrenagens e um sincronismo nas pernas do sistema robotizado. O segmento frontal não possui força ativa, possui uma câmera CCD e vários sensores de navegação.

- **Mecanismo de Pernas com Rodas**

Uma das mais importantes questões em projetos de veículos dirigíveis é como obter força de tração o suficiente para carregar uma série de instrumentações bem como o próprio peso do robô. Especialmente em trajetórias verticais é necessário sustentar adequadamente a força de pressão contra a parede da tubulação assegurando, assim, força de tração suficiente. A utilização destas forças deve ser de modo a não ser excessiva ou insuficiente, para não causar danos ao sistema robotizado ou evitar que o mesmo escorregue em uma trajetória vertical. A força de

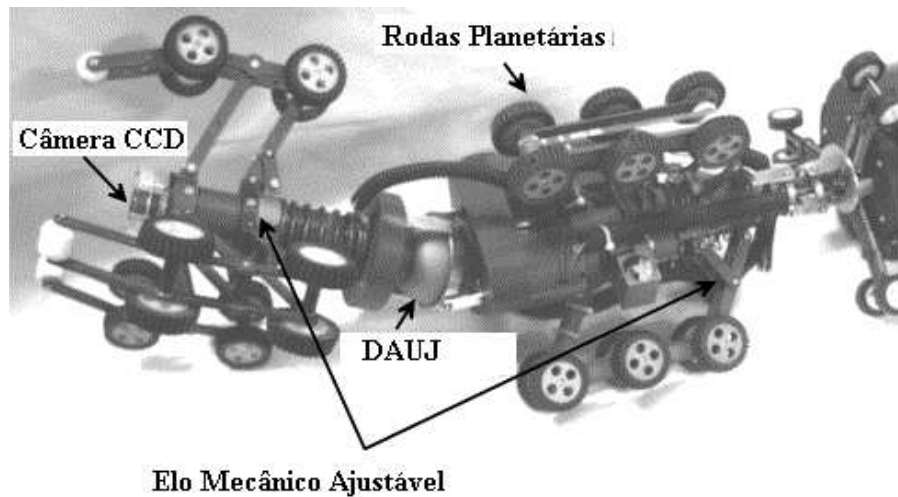


FIGURA 7.15: Veículo dirigível do sistema robotizado pilotável (Choi & Ryew 2002)

tração é proporcional ao coeficiente de atrito e a força de pressão entre as rodas e a superfície do duto, sendo que o coeficiente de atrito depende do material que é constituída as rodas do robô e as condições da superfície interna do duto.

Este mecanismo de pernas com rodas, ver figura 7.16, utilizado neste SRIID deve possuir três requerimentos. Em primeiro lugar ele deve ser capaz de exercer uma pressão adequada contra as paredes da tubulação. Em segundo, a força de pressão não deve apresentar mudanças significativas durante a navegação, deve manter-se estável, afim de manter uma locomoção flexível. E por ultimo, o mecanismo deve ser simples e pequeno para ocupar o mínimo de espaço dentro da tubulação.

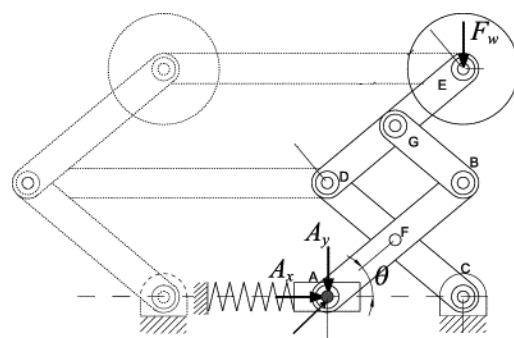


FIGURA 7.16: Mecanismo de pernas com rodas do sistema robótico pilotável (Choi & Ryew 2002)

- Mecanismo de Direção

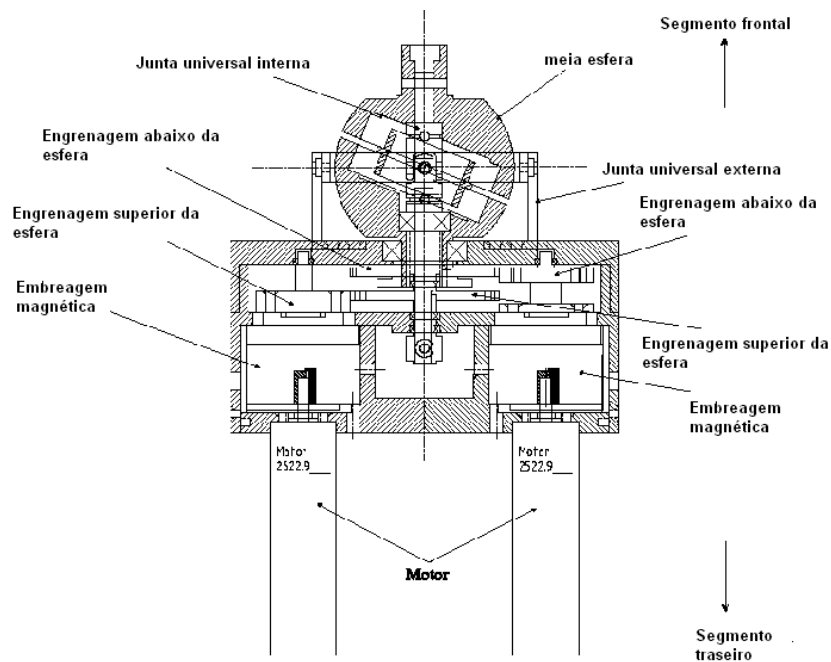


FIGURA 7.17: Detalhes do mecanismo de pilotagem do sistema robótico (Choi & Ryew 2002)

Neste sistema a pilotagem é realizada por um mecanismo chamado **DAUJ**, Junta Universal Duplamente Ativa. A figura 7.17 descreve este mecanismo em detalhes. Conforme pode ser observado o DAUJ é uma junta com dois graus de liberdade, cujo cada grau de liberdade se move ativamente ou passivamente com movimentos acoplados de dois motores e duas engrenagens.

7.5 Robô para micro inspeção de dutos de uma polegada

Este sistema robótico foi desenvolvido especialmente para inspeções de dutos com diâmetro de uma polegada (25,4 mm), mais direcionado a tubulações de pequenos diâmetro, mais freqüentemente encontradas em dutos de aquecimento ou refrigeração, dutos de distribuição de gás e água. Este SRIID possui 23mm de diâmetro e 110 mm de comprimento e é equipado com uma micro câmera CCD colorida de alta qualidade (410.000 *pixels*), capaz de localizar rachaduras de até $25\mu\text{m}$ que possam existir na superfície interna do duto, e um manipulador para pequenos objetos no interior do duto, com seis graus de liberdade. Este sistema robotizado pode percorrer secções verticais e curvas, tornando possível inspeções que seriam bastante difíceis para os sistemas convencionais. Sua velocidade é de 6 mm/s e tem capacidade para suportar uma carga de 1 N (Suzumori et al. 1999).

1. Sistema robótico e micro Dispositivos

- *Sistema*

As figura 7.18 e 7.19 mostra o esboço deste micro sistema robotizado, possuindo este 23 mm de diâmetro externo, 110 mm de comprimento e 16 g de massa. Na parte frontal deste estão localizados uma micro câmera e um micro atuador. Estes habilitam a observação da superfície de duto, a recuperação de algumas partes e uma amostragem por escalas do duto. A câmera e o micro atuador podem ser rotacionados ao redor do eixo do duto graças a um motor pneumático de alto torque.

Este sistema robotizado possui um elo de borracha, bastante flexível, que dobra passivamente seguindo as curvaturas do duto. Este elo flexível possui um mecanismo com rodas planetárias em cada extremidade, estes possuem essencialmente a mesma estrutura, mas número de rodas diferentes, figura 7.19. O mecanismo frontal possui um número de rodas menor, pois este segmento possui a finalidade de permitir /possibilitar a rotação da câmera e do atuador.

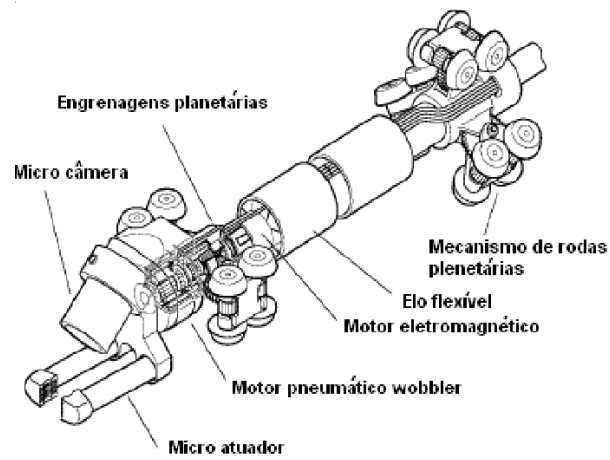


FIGURA 7.18: Configuração do micro sistema robotizado de inspeção (Suzumori et al. 1999)

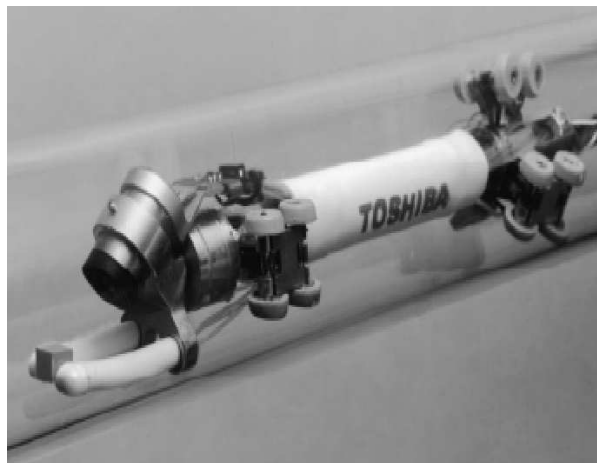


FIGURA 7.19: Foto do micro sistema robotizado carregando um pequeno objeto dentro de um tubo de uma polegada (Suzumori et al. 1999)

A conexão entre o sistema robotizado e o controlador é feita através de 4 cabos elétricos para as duas unidades de rodas com motor, 6 tubos pneumáticos para as mãos, 6 tubos pneumáticos para o motor e 12 cabos pneumáticos para a câmera CCD. Cada cabo elétrico possui cerca de 0.4 mm de diâmetro, o conjunto total de cabos somam cerca de 6mm de diâmetro e 20g/metro o total de massa. Este são flexíveis e atravessam com facilidades regiões curvas.

O robô é controlado manualmente por um operador que observa as imagens da câmera CCD e o opera por um joystick.

- *Mecanismo de Rodas Planetárias*

Geralmente, para uma locomoção normal no interior de dutos são necessários sistemas de tração, que sejam capazes de proverem duas ações: Realizar uma rotação nas rodas e exercer forças contra a parede interna do duto.

Este micro robô possui um mecanismo que realiza ambos estes movimentos com um único motor é um mecanismo simples que é apropriado para minituarização.

Este gera o torque empurra as rodas traseiras firmemente na parede da tubulação.

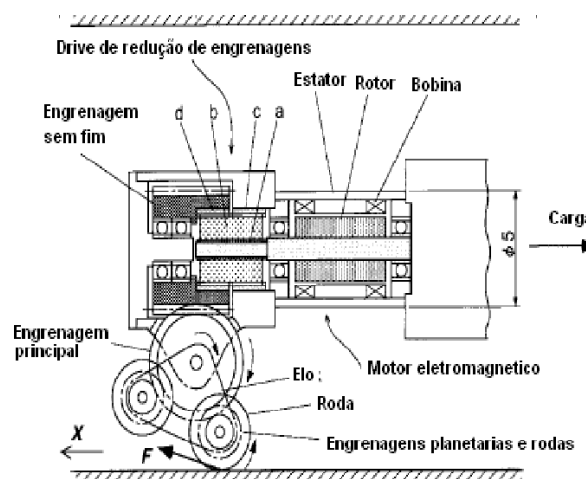


FIGURA 7.20: Mecanismo de tração do micro sistema robotizado (Suzumori et al. 1999)

- *Motor Eletromagnético e Drive de Redução de Engrenagens*

A figura 7.20 mostra o drive de redução de engrenagens e o motor eletromagnético. A saída do motor eletromagnético é conectada diretamente ao eixo de entrada da engrenagem de redução, indicada por a , e a saída da engrenagem de redução, indicada por d é conectada em uma engrenagem sem fim (Worm gear).

O motor possui 5 mm de diâmetro e 8 mm de comprimento, ver figura 7.21. É constituído de um estator, que atua como uma embalagem (encapsulamento), seis bobinas finas sobre o estator e um rotor. O rotor é constituído de um ímã de cobalto de forma anelar, dentro do qual é inserido uma haste suporte. Este motor não possui sensores e nem escovas, permitindo uma maior munituarização. As bobinas do estator são fabricadas sobre uma película fina e flexível.

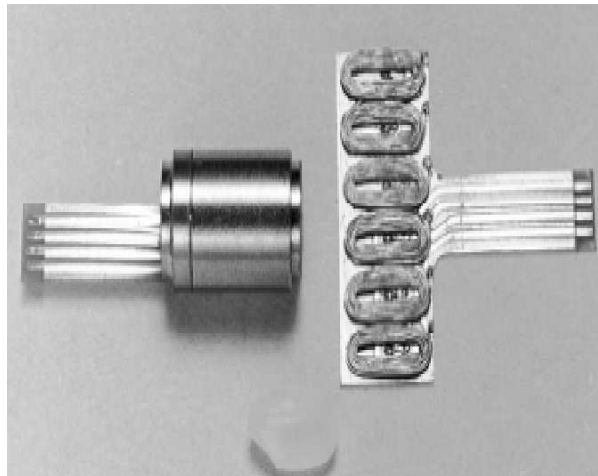


FIGURA 7.21: Micro motor eletromagnético (Suzumori et al. 1999)

- *Elo Flexível*

O elo flexível, o qual conecta os dois mecanismos de rodas planetárias, é um tubo feito de borracha de silicone fina. Ele se deforma passivamente quando o robô passa por curvas e cotovelos. Os cabos elétricos passam através deste.

- *Câmera CCD*

Esta micro câmera CCD 1/4 pode ser vista na figura 7.22 Possui 410 K *pixels*, 7 mm de diâmetro, 12 mm de comprimento e uma massa de 1.2 g.

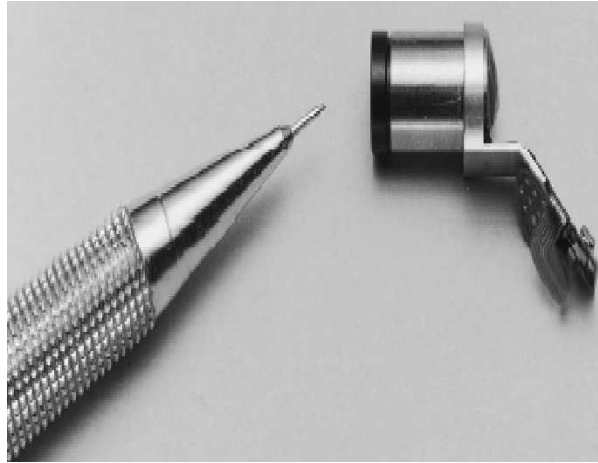


FIGURA 7.22: Micro câmera CCD (Suzumori et al. 1999)

O corpo total da câmera inclui o CCD, um filtro óptico, uma micro lente óptica e um módulo de circuito subordinado. A alimentação e sinais para o CCD, tais como, os de sincronismo vertical e horizontal e movimentos, são fornecidos através de cabos. O controlador da câmera incorpora a função de processador digital, ou seja, realiza um controle automático de luminância, o qual controla a íris da câmera e um controle de nível de branco.

- *Micro Atuador*

O dispositivo micro atuador utilizado é do tipo **FMA** (Micro Atuador Flexível), é constituído por fibras reforçadas de borracha. Este possui três câmaras internas, a pressão interna em cada uma é controlada independentemente através dos tubos flexíveis conectados às válvulas de controle pneumáticas. Um controle apropriado da pressão pneumática em cada câmara permite um movimento com três graus de liberdade, dobrando em qualquer direção e também permite um alongamento.

7.6 Sistema robótico GIRINO

O sistema robótico de inspeção de dutos “GIRINO”, que pode ser observado na figura 7.23, foi desenvolvido pelo Cenpes/ Petrobrás com o objetivo de inspecionar dutos de óleo e gás. Foi desenvolvido devido a um problema encontrado em dutos submarinos: a parafina. Devido às baixas temperaturas do oceano, a parafina existente no petróleo se cristaliza e acumula-se na parede da tubulação, com o passar do tempo esta massa bloqueou o fluxo de óleo em uma tubulação localizada na bacia de Campos (RJ).

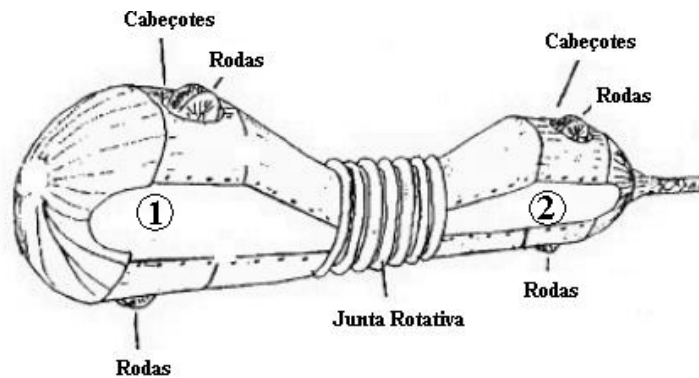


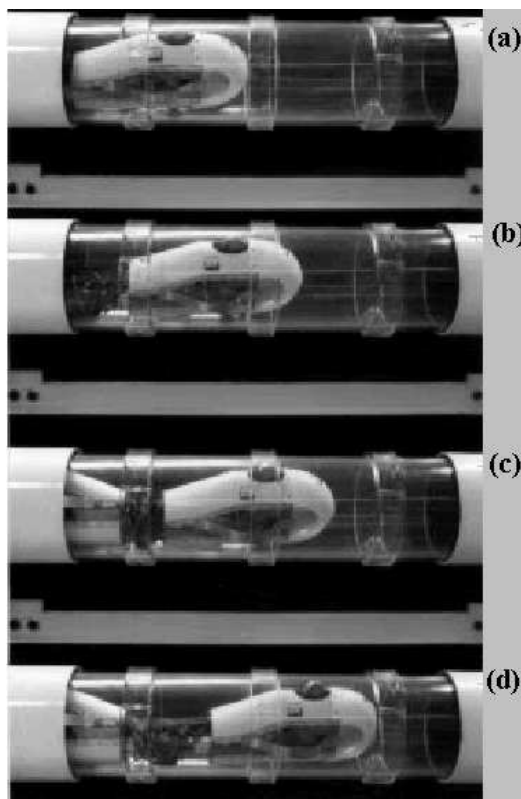
FIGURA 7.23: Esquema do sistema robotizado GIRINO (Reis 2001)

7.6.1 Princípio de locomoção do sistema GIRINO

O princípio da sua locomoção foi inspirado nos movimentos de um girino. A principal característica deste sistema de locomoção é o tipo de movimento utilizado, similar ao “*Inchworm*”, ou “lagarta”, ver figura 7.24.

É constituído por dois módulos idênticos, unidos por uma junta rotativa, a qual conecta as hastes dos cilindros propulsores, hidráulicos ou pneumáticos. Cada módulo é constituído, basicamente, por um cilindro propulsor, responsável pelo deslocamento longitudinal do módulo, por uma torre de posicionamento, onde são montados roletes/rodas (responsável também pela trava do sistema no decorrer de sua locomoção), dotados de um sistema de contra recuo e meios para girar a torre de posicionamento,

com referência ao seu eixo vertical, invertendo-se o sentido de deslocamento do equipamento.



- (a) O primeiro módulo esta travado na tubulação, e o segundo esta com seus roletes retraídos;
- (b) A junta sofre uma expansão, deslocando o segundo módulo longitudinalmente;
- (c) O segundo módulo trava, o primeiro módulo retrai seus roletes e a junta do sistema é contraída;
- (d) Em seguida o primeiro módulo ativa seu sistema de trava, reiniciando o processo de locomoção.

FIGURA 7.24: Locomoção do sistema robotizado GIRINO (Reis 2001)

7.6.2 Instrumentação do sistema GIRINO

O sistema “GIRINO” permite a chegada de ferramentas, equipamentos, dispositivos ou materiais em um ponto remoto, no interior de um duto, dotado de curvas para a realização de desobstruções, inspeções ou outras operações (Reis 2001). Estes dispositivos, chamados de “umbilicais”, se estendem até o local de inserção, fornecendo o óleo e a eletricidade necessária para a locomoção e o solvente a ser usado na parafina.

7.6.3 Testes operacionais do sistema GIRINO

Em testes realizados com o protótipo deste, observou-se que este tem a capacidade de remover um caminhão de 7,5 toneladas, fato este muito importante porque ele tem a necessidade de arrastar os dispositivos de instrumentação chamados de “umbilicais” por muitos quilômetros dentro da tubulação. A sua geometria é feita de tal forma que ele adaptadas a uma variedade de valores de medidas de diâmetros. O sistema robotizado “GIRINO”, que possui modelos para dutos de 8 e 16 polegadas de diâmetro, se locomove a uma velocidade de 1 a 2 quilômetros por hora, através de uma extensão de até 200 quilômetros.

Uma técnica de inspeção utilizada no “GIRINO” é a denominada “geométrica”, ou seja, é um dispositivo computadorizado para a inspeção de dutos, que percorre as tubulações realizando um levantamento da geometria de sua seção reta, detectando deformações e defeitos. Este sistema é utilizado em duas etapas, sendo que a primeira é durante a construção do duto, especialmente na etapa de montagem e condicionamento, com o objetivo de detectar a existência de mossas e ovalizações (provocados por agentes mecânicos externos ou pela movimentação localizada do terreno), e durante a sua operação de monitoramento nos dutos, verificando possíveis reduções de diâmetro e outras anomalias geométricas que possam ocorrer. Ou seja, o sistema “GIRINO” além de verificar se há ou não defeito em um duto, é capaz de informar com precisão a posição e o tamanho deste. Algumas horas depois de inspecionar uma linha de duto, o robô gera um relatório contendo um desenho tridimensional do percurso inspecionado.

O sistema “GIRINO” pode também trabalhar acoplado com outros sistemas de inspeção, tais como o SIMCRODUTO (Costa, Hsu, Peixoto, Gomes & Reis 2003). O SIMCRODUTO, desenvolvido pelo GSCAR (grupo de simulação e controle em automação e robótica) da COPPE/UFRJ, é um dispositivo robotizado composto por sensores que são utilizados para medir a espessura da pintura interna de dutos longos. O SIMCRODUTO foi projetado com dois graus de liberdade, possui uma junta revolução responsável por girar os sensores para uma certa posição angular na seção transversal do duto e uma junta prismática que movimenta os sensores para frente e para trás.

7.7 Conclusão

- Sistemas robotizados série Theuses;

Próprios para dutos com variações de diâmetro de 25 a 200 mm, possuindo tração baseada a rodas e em movimento helicoidais, estes sistemas robotizados foram desenvolvidos voltados para o projeto de mecanismos capazes de realizar uma locomoção ao longo de uma tubulação constituída por uma série de curvatura (ou cotovelos). Foi mostrado um conceito denominado “ Movimento inteiro dos cabos” ou WSD (*Whole Stem Drive*). A aplicação deste conceito permitiu a estes sistemas robotizados realizarem testes experimentais com obtenção de sucesso.

- Sistemas robotizados série Heli-Pipe;

Os sistemas da série Heli-Pipe são voltados para tubulações com 38 a 173 mm de diâmetro, possuem sistemas de tração baseados em movimentos helicoidais. Foram desenvolvidos para realizar tração o suficiente par realizar trajetos verticais e com curvas. São alimentados via baterias e capazes de manter sua autonomia na faixa de duas horas.

- Sistema robotizado pilotável para inspeção interna de redes urbanas de tubulação de gás;

Este sistema robotizado esta voltado para tubulações de gás cujo o diâmetro varia entre 160 e 240 mm. Possui um mecanismo de tração misto, constituído de pernas com rodas. Este sistema é separado em módulos, ou seja, possui módulos de instrumentação, tração, controle e um módulo de testes não destrutivos. Este possui a capacidade de ser pilotado manualmente (quando for necessário) por uma interface com o operador, através do controle de posição de um sistema conhecido como “junta universal duplamente ativa”. Este sistema permite a realização de um controle complacente do mecanismo de inspeção de dutos.

- Robô para micro inspeção de dutos de uma polegada;

Foi desenvolvido para redes de tubulações de distribuição, ou seja, dutos de aquecimento ou refrigeração e distribuição de água e gás. Seu diâmetro mede 23 mm

(1 polegada), possui 110 mm de comprimento e 16 g de peso. Sendo seu sistema de tração à rodas, este micro robô pode atingir uma velocidade de até 6 mm/s e suporta uma carga de até 1 N.

- Sistema robotizado GIRINO;

Este sistema robotizado está voltado para oleodutos e para tubulações de gás. Seu módulo de tração é similar ao sistema *Inchworm* ou “lagarta”, responsável pelo seu deslocamento longitudinal. Possui um sistema de recuo, importante caso ocorra uma insuficiência de energia no sistema. Possui um mecanismo que permite a chegada de ferramentas e materiais em um ponto remoto da tubulação para a realização de desobstruções, inspeções ou outras operações. É utilizado em redes de com extensões na faixa de 200 metros e possui força o suficiente para arrastar até 7,5 toneladas.

Capítulo 8

Estudo de caso - Inspeção interna em dutos de transporte óleo

8.1 Introdução

As redes de dutos nacionais são compostas de tubulações de vários diâmetros e extensões, por onde circulam óleo, derivados e gás natural. Manter essas malhas funcionando requer sistemas de monitoramento e reparo, o que incentiva investimentos em ciência e tecnologia nesta área. Atualmente, algumas empresas, centros de pesquisa e universidades estão desenvolvendo pesquisas e produtos para auxiliar nessas funções.

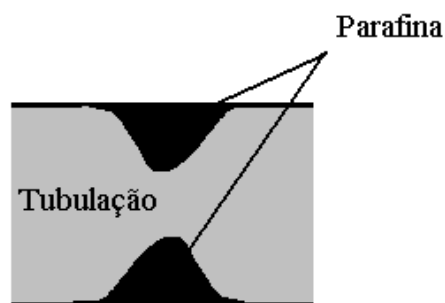


FIGURA 8.1: Obstrução em rede de tubulação devido à parafina

Grande parte da extração de petróleo no Brasil é feita no mar, logo, seu transporte e

de seus derivados são realizados de forma submarina. Devido às baixas temperaturas do oceano, a parafina existente no petróleo cristaliza e acumula-se na parede da tubulação, ver figura 8.1. Com o passar do tempo, esta massa de parafina pode vir a bloquear o fluxo de óleo. Com a finalidade de ilustrar o desenvolvimento de um SRIID será apresentado neste capítulo um caso de estudo geral aplicado a redes de tubulações de transporte de óleo.

O desenvolvimento de um sistema robotizado para inspeção interna de dutos pode ser realizado seguindo o diagrama mostrado na figura 8.2.

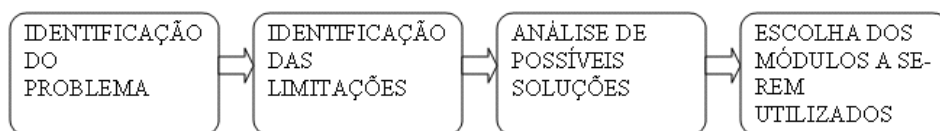


FIGURA 8.2: Diagrama de desenvolvimento de um SRIID

Cada uma destas etapas são de grande importância devendo ser seguidas e analisadas cuidadosamente. A seguir, estas etapas serão destacadas segundo as necessidades do caso de estudo em questão.

8.2 Identificação do problema

- Obstruções no interior de uma rede de tubulação que transporta óleo, ocasionado devido ao acúmulo de materiais;
- A rede de tubulação possui extensão relativamente longa;
- Devem ser localizadas tais obstruções e/ou o estagio inicial destas.

8.3 Limitações

- O fluido transportado é de consistência oleosa;
- A configuração da rede de tubulação não é complexa, mas possui grande extensão e encontra-se sob o solo;
- Variação de diâmetro da tubulação devido ao acúmulo de material.

Como foi visto a característica do fluido transportado é bastante importante na escolha de algumas características do SRIID. Estas são relacionadas ao sistema de tração, e aos sensores atuantes do SRIID.

Igualmente, possuindo informações sobre a configuração da tubulação e suas condições, o projetista pode retirar dados também importantes para escolha do sistema de tração e sistema de controle.

8.4 Possíveis soluções

A realização de inspeções robotizadas no interior da tubulação é viável devido ao fato de se tratar de tubulações bastante longas e de difícil acesso.

Pode ser feita uma comparação entre o problema aqui considerado e os problemas apresentados nos exemplos de SRIID do capítulo 7. A partir daí, é opção do projetista a escolha do desenvolvimento de um sistema similar a um dos apresentados no capítulo, ou o desenvolvimento de um sistema diferenciado, baseado na escolha separada dos módulos.

O caso de estudo em questão, por se tratar de tubulações de transporte de fluidos oleosos, é semelhante ao caso de aplicação do sistema robótico “GIRINO” visto no capítulo 7.

8.5 Escolha da instrumentação

Algumas considerações devem ser feitas antes da escolha da instrumentação necessária a um SRIID, sendo que algumas delas podem ser exemplificadas abaixo:

- O que é desejado que o SRIID faça ou meça no interior da tubulação?
- Quais as condições que será submetida a instrumentação?
- Qual é o espaço disponível para a disposição da instrumentação no corpo do sistema e, qual seu espaço de trabalho no interior da tubulação?

Relacionadas às considerações feitas anteriormente, no estudo de caso em questão, devem ser observadas as seguintes questões:

- Sabe-se que o SRIID deve localizar obstruções, ou o início das mesmas. Para isto é necessário que o SRIID em questão possua um sensor de proximidade detector de obstáculo, para detectar as obstruções. Neste caso é desejado conhecer também a localização da obstrução no interior da tubulação, sendo que para isto pode ser utilizado um sensor de posição *encoder*.
- Dependendo do material que flui no interior da tubulação deve ser feita a escolha da instrumentação. O grau de proteção dos sensores sempre deve ser verificado antes da sua escolha definitiva. As tabelas (3.6 e 3.7) de grau e classe de proteção pode ser vista no capítulo 3.
- Na escolha do sensor deve sempre ser observado os dados relacionados as dimensões físicas do mesmo, estes dados são encontrados com facilidade nos *data sheets* dos dispositivos. Estes geralmente são fornecidos pelos fabricantes.

- Considerações finais

A instrumentação apropriada para o caso de estudo em questão pode ser observada na tabela 8.1. O uso de sensores de proximidade e de posição são suficientes (havendo ainda a opção pelo uso de câmeras), já que tubulações de transporte não possuem configurações complexas (constituída por ramos e braços).

TABELA 8.1: Instrumentação apropriada para o caso de estudo exemplificado

Instrumentação	Tipos	Proteção recomendada
Sensores	Proximidade- Ultrassônico Proximidade- Capacitivo	IP67 ou IP68
<i>Encoders</i>	Incremental ou Absoluto	IP67 ou IP68

A escolha do sensoriamento pode ser feita baseadas nas tabelas 3.16, 3.17 e 3.18 (capítulo 3), onde são discriminadas algumas de suas características mais importantes.

8.6 Escolha da tração

Conforme visto anteriormente, antes da escolha do sistema de tração de um SRIID deve ser observado as seguintes características da tubulação:

- A configuração da tubulação, inclusive o seu diâmetro interno;
- O material fluente no interior da mesma.

É do conhecimento do projetista que, no caso de estudo em questão, a tubulação possui as seguintes características:

- Tubulação de transporte de material oleoso;
- A rede de tubulação pode possuir variações de diâmetro devido ao acúmulo de material.

- Considerações finais

Dentre as possibilidades de SRIIDs, os mais apropriados para tubulações que transportam materiais oleosos são os que o sistema de tração que exercem forças contra a parede da tubulação, podendo também ser utilizados em casos que existam variações de diâmetro. Seguindo o exemplo do sistema “GIRINO”, o sistema de tração a ser utilizado, neste caso de estudo, poderia ser o “lagarta” ou *inchworm*.

O módulo de tração deve possuir força suficiente para realizar a trajetórias e suportar o peso total do SRIID.

O sistema “GIRINO”, também apresenta um sistema de recuo bastante importante, necessário para o recolhimento do SRIID. Em casos da utilização de sistema de tração “lagarta” é necessário o uso deste sistema de recuo.

8.7 Escolha do tipo de alimentação

Conforme visto no capítulo 5, a alimentação de um SRIID pode ser feita das seguintes formas:

- Feita através de cabos;
- Feita por pilhas e/ou baterias;
- Sistema misto, com a utilização de cabos ou baterias.

Antes da escolha de um dos tipos de alimentação, devem ser feitas as seguintes observações:

- Qual é a configuração e/ou extensão da rede de tubulação?
- Qual é a potência e/ou alimentação necessária para o sistema de tração?
- Qual é a potência e/ou alimentação necessária para a instrumentação e módulo controlador?

Dados sobre a extensão ou configuração de uma rede de tubulações, além de serem úteis para a escolha do tipo de alimentação, são importantes também para a escolha da disposição do SRIID no interior da mesma, afim de diminuir os riscos de ruptura de cabos (em caso da utilização destes).

O dimensionamento da alimentação deve ser feito de modo a abastecer todos os módulos do SRIID. Deve ser o suficiente para o sistema realizar toda a sua tarefa de inspeção e retornar ao seu ponto de partida.

Alguns SRIID podem possuir um sistema de alimentação auxiliar, que são utilizados em situações de emergência.

Relecionadas às observações feitas anteriormente, para o caso de estudo em questão, devem ser satisfeitas as seguintes questões:

- O SRIID aplicado a este caso deverá ser capaz de percorrer o interior da tubulação por toda a sua extensão;
- A alimentação deverá ser suficiente para o sistema realizar a sua trajetória e manter todos os seus módulos alimentados durante o intervalo de tempo da mesma.

- Considerações finais

O sistema de alimentação mais apropriado para este caso é o tipo misto, feito por cabos e por baterias, ver tabela 8.2. A alimentação do módulo de tração poderá ser feita por cabos. A alimentação do módulo de instrumentação e controle poderá ser feita por pilhas ou baterias recarregáveis.

TABELA 8.2: Tipos de alimentação por módulos

Módulo	Tipo de alimentação
Tração	Cabos
Instrumentação	Pilhas/baterias
Controle	Pilhas/baterias

A alimentação feita por cabos deve ser dimensionada, fisicamente, de acordo com a extensão da tubulação. Devem ser utilizadas fontes e conversores dc/dc, para evitar sobrecargas e ruídos.

No capítulo 5 foram fornecidas tabelas (5.3 e 5.4) com dados importantes sobre alguns tipos de pilhas/baterias.

8.8 Escolha do sistema de controle

O módulo de controle de um SRIID é responsável por:

- Controle de movimento do SRIID;
- Gerenciamento de comunicação do sistema robotizado com uma estação terrestre.

No caso de estudo em questão sabe-se que a tubulação possui longa extensão e sua configuração é simples. Logo o movimento do SRIID no interior da tubulação será bastante simples, limitando-se apenas a movimentos para frente ou para trás. Quando o módulo de instrumentação detectar algum obstáculo o SRIID deverá parar, registrar a sua posição e retornar a posição inicial.

- Considerações finais

Para este caso de estudo não existe a necessidade de teleoperação, pois se trata de tubulações simples. Não existe situações de decisão de trajetória.

O movimento do robô pode ser controlado por um microcontrolador da família Intel MCS-96 de 16 bits, modelo 80196.

O sistema de controle supervisionará a movimentação do robô e a comunicação com uma estação terrestre, enviando dados da inspeção para a mesma.

A comunicação entre os módulos e com a estação terrestre será feita via barramentos, Rs 232 e Rs 485 respectivamente.

8.9 Observações

Reunindo todas as características mostradas nos tópicos anteriores, um SRIID para o caso de estudo em questão poderá possuir as seguintes configurações mostradas na tabela 8.3:

TABELA 8.3: Possível configuração de um SRIID

Instrumentação	Tipo	Modelos
Sensores <i>Encoder</i>	Proximidade - Ultrassônico Absoluto	UM-30/Sick ARS-60/Sick
Tração		
Tipo <i>inchworm</i>		
Alimentação	Tipo	
Módulo de tração Módulo de instrumentação e controle	Cabos pilhas/baterias	
Controle		
Movimento	Controlador Intel 80196	
Comunicação	Rs 232 e Rs 485	

Deve ficar claro que estas características (tabela 8.3) não são as únicas opções para a escolha de um SRIID neste caso de estudo. As escolhas destas características devem suprir as limitações presentes e realizar a tarefa de inspeção com êxito.

Para outras situações devem ser feitas outras análises, de forma a encontrar outras possíveis características para o desenvolvimento de um SRIID mais apropriado.

Capítulo 9

Conclusão e trabalhos futuros

O presente trabalho reuniu uma série de sistemas robotizados de inspeção interna de dutos, classificou-os e extraiu destes suas características básicas. Foi verificado que estes sistemas tinham características em comum, relacionadas a seu mecanismo de tração, a seu mecanismo de percepção, ao seu modo de alimentação e ao seu sistema de controle. Sendo que cada uma destas características fazem parte de uma estrutura básica para o desenvolvimento de um sistema robótico de inspeção de dutos. Tais características foram exploradas no presente trabalho, e foram feitos levantamentos de dispositivos relacionados a elas, tais como, sensores, mecanismos de tração, sistemas de controle e módulos de alimentação. Estes dispositivos foram organizados em tabelas como objetivo de facilitar a sua visualização para o caso de desenvolvimento de projetos similares.

A classificação dos sistemas robotizados de inspeção de dutos foi feita quanto ao seu mecanismo de locomoção, podendo estes serem do tipo com tração: à rodas, com pernas, do tipo esteira, *inchworm* (lagarta), sistemas que utilizam da pressão do fluido para se locomover e sistemas combinados. O conhecimento do material fluente na tubulação aliado a esta classificação, facilita ou direciona a escolha mais apropriada de um tipo de tração a ser utilizado em um projetos sistemas robotizados de inspeção de dutos. Um outro fator que foi destacado neste trabalho é a relação entre as restrições do meio físico e o projeto de um módulo de inspeção. Dependendo da sua configuração são extraídas informações importantes para o dimensionamento dos módulos do robô.

O sensoriamento é uma ferramenta básica e indispensável em sistemas robotizados de inspeção interna de dutos. De acordo com a aplicação do robô, existe uma ampla variedade de sensores que podem ser utilizados. A maioria dos sistemas robotizados de inspeção interna de dutos utilizam sensores de proximidade, posição e visão, a escolha destes deve ser baseada no interesse particular de cada sistema de inspeção. Os melhores sensores para detecção de obstáculos ou obstruções, são os sensores de proximidade à ultrassom e os capacitivos, pois ambos detectam objetos compostos de vários materiais. É importante lembrar também as condições de funcionamento restritas pelo fator de proteção e as limitações dos mesmos, estes podem ser visualizados nos manuais disponibilizados pelos fabricantes.

Considerando os sistemas de tração apresentados pode se concluir que em situações de “condutos fechados”, podem ser utilizados sistema de inspeção que utiliza a própria pressão do fluido. Em tubulações de materiais oleosos existe uma necessidade forças de tração capazes de realizar a sua locomoção exercendo pressão o suficiente para o sistema robotizado não escorregar, podem ser utilizados o tipo de locomoção “ *Inchworm* ” ou “ lagarta”. Um sistema que utiliza este princípio é o sistema “GIRINO” (Reis 2001) que é utilizado em redes de tubulações submarinas de petróleo, este mesmo sistema de tração também pode ser utilizado em sistemas de inspeção endoscópicas. A utilização de sistema de tração com pernas possui a vantagem da adaptabilidade, mas é bastante complexo e custoso, visto que uma única perna pode possuir vários graus de liberdade, além de possuir um grau de consumo de energia elevado. Os sistemas mistos helicoidais, os de pernas com rodas e os que exercem forças de pressão nas paredes das tubulações podem ser a solução em projetos de sistemas robotizados para inspeção de tubulações onde existam trajetórias verticais ou mistas, ou seja, em redes de tubulações mais complexas.

O sistema de alimentação de um SRIID deve ser capaz de efetuar uma alimentação plena ao mesmo. Este possui a responsabilidade de manter funcionamento dos dispositivos do módulo de instrumentação, do módulo de controle e pelo funcionamento do módulo de tração. Um correto dimensionamento evita de o sistema robotizado falhar nas suas medições de inspeção, deste ficar parado no interior da tubulação e evita acidentes, como quedas que podem danificar o sistema robotizado e a tubulação.

Em sistemas de alimentação via cabos o projetista deve tomar o cuidado para não

sobrecarregar o sistema e assim não danificar o mesmo.

Deve se tomar o mesmo cuidado com o dimensionamento de alimentação via baterias. Devem ser levadas em consideração a densidade de energia da bateria, a sua capacidade nominal e seu ciclo de vida.

Foi verificado que as mais utilizadas são as de Níquel Cádmio e Chumbo ácido, sendo que estas podem ser substituídas pelas de Zinco/Prata, Níquel hidreto metálica e pelas de íons de lítio devido a maiores capacidades de armazenamento de carga, seus maiores ciclos de vida, leveza e até por serem mais aceitas em termos ambientais.

O sistema de controle de um robô de inspeção é a parte responsável pelo controle de movimento do sistema robotizado e pelo gerenciamento de dados provenientes do módulo de instrumentação. O controle de movimento esta diretamente relacionado ao controle do motor. Este controle é realizado por códigos implementado no microcontrolador, tendo como variáveis os dados recebidos do módulo de instrumentação. A comunicação entre os módulos do sistema robotizado, pode ser feita por barramentos, via Rs 232 e Rs 485 dependendo da distância entre os módulos.

9.1 Propostas para trabalhos futuros

Com o objetivo de incentivar a continuação da pesquisa apresentada neste trabalho, seguem algumas propostas que podem ser desenvolvidas em trabalhos futuros:

- Nos acidentes da construção civil algumas das redes de tubulações muitas vezes se mantêm intactas. A partir daí torna-se possível o desenvolvimento de SRIIDs, utilizando as características mostradas neste trabalho, capazes de localizar sobreviventes;
- Desenvolvimento de SRIIDs capazes de identificar danos (causados pelo efeito corrosivo dos sais em solução) ou obstruções em redes de tubulações agrícolas de fertirrigação (adubação líquida), que se encontram em localidades de difícil acesso (Filho, Pinto & Arruda 1999).

Referências Bibliográficas

- Ambrosio, R. C. & Ticianelli, E. A. (2001), ‘Baterias de níquel-hidreto metálico, uma alternativa para as baterias de níquel-cádmio’, *Quim. Nova*, **24**(2), 243–246.
- Atmel (2005), <http://www.atmel.com>.
- Bruce, A. P., William, R. S., Tsuzuki, M. S. G., Buiocchi, F. & Camerini, C. S. (1993), ‘Pipe crawling inspection robots: an overview’, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **8**(3), 576–583.
- Choi, H. R. & Ryew, S. M. (2002), ‘Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipeline’, *Mechatronics* **12**, 713–736.
- Choi, H., Ryew, S. & Sunghwi, C. (1999), ‘Development of articulated robot for inspection of underground pipelines’, *15th Conf. on Structural Mechanics In Reactor Technology* **3**, 407–414.
- Contrinex (2005), <http://www.contrinex.com>, Contrinex proximity switches.
- Costa, R. R., Hsu, L., Peixoto, A. S., Gomes, L. P. & Reis, N. R. S. (2003), ‘Sistema robotizado para inspeção interna de dutos’, *Petro e Química* pp. 112–114.
- Dally, J. W., Riley, W. F. & McConnell, K. G. (1993), *Instrumentation for Engineering Measurements*, 2 edn, John Wiley and Sons.
- Everett, H. R. (1995), *Sensors for Mobile Robots*, Vol. 1, 1 edn, A. K. Peters.
- Filho, J. F., Pinto, J. & Arruda, N. (1999), *Dimensionamento, Construção e Características Hidráulica de um Injetor Tipo Venturi para uso na Quimificação*, Vol. 4, Revista Irriga.
- Fraden, J. (2003), *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*, 3 edn, Springer.
- GM-Battery (2005), <http://www.gmbattery.com>.
- GP-Batteries (2005), <http://www.gpbatteries.com>.
- Hayashi, I., Iwatsuki, N. & Iwashina, S. (1995), ‘The running characteristics of a screw-principle microrobot in a small bent pipe’, *IEEE, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* pp. 225–228.

- Hirose, S., Ohno, H., Mitsui, T. & Suyama, K. (1999), ‘Design of in-pipe inspection vehicles for $\phi 25$, $\phi 50$, $\phi 150$ pipes’, *Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics and Automation* pp. 2309–2314.
- Honeywell-Sensors (2005), <http://www.honeywell.com>.
- Horodincu, M., Doroftei, I., Mignon, E. & Preumont, A. (2002), ‘A simple architecture for in-pipe inspection robots’, *Int Colloquium on Mobile and Autonomous Systems, 10 Years of the Fraunhofer IFF* pp. 25–26.
- Intel (2005), <http://www.intel.com>.
- Kagawa, Y., Hayashi, I., Iwatsuki, N. & Morikawa, K. (1999), ‘Screw principle micro-robot passing steps in a small pipe’, *Proceedings of IEEE, International Symposium on Micromechatronics and Human Science* pp. 149–152.
- Menciassi, A., Park, J. H., Lee, S., Gorini, S., Dario, P. & Park, J. O. (2002), ‘Robotic solutions and mechanisms for a semi-autonomous endoscope’, *Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems* pp. 1379–1384.
- Microchip (2005), <http://www.microchip.com>.
- Neubaeuer, W. A. (1994), ‘A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes’, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* pp. 1178–1185.
- Okada, T. & Sanemori, T. (1987), ‘Mogrer: A vehicle study and realization for in-pipe inspection tasks’, *IEEE Robotics and Automation* **RA-3**(6), 573–582.
- Okamoto, J. J., Adamowski, J. C., Tsuzuki, M. S. G., Buiocchi, F. & Camerini, C. S. (1999), ‘Autonomous system for oil pipelines inspection’, *Mechatronics* **9**, 731–743.
- Omron-Sensors (2005), <http://www.omronsensors.com>.
- Pires, J. N. (2004), *Automação Industrial*, Vol. 1, 2 edn, Etep.
- Reis, N. R. S. (2001), ‘Girino-get inside robot to impel and restore normal operation’, *International Workshop on Underwater Robotics, Rio de Janeiro, Brazil*.
- Roh, S. G. & Choi, H. R. (2005), ‘Differential-driving in-pipe robot for moving inside urban gas pipeline’, *IEEE Transactions on Robotics* **21**, 1–17.
- Romano, V. F. (2002), *Robótica Industrial: Aplicação na indústria de manufatura e de processos*, Edgard Blücher.
- Rosário, J. M. (2005), *Princípios de Mecatrônica*, Prentice Hall.
- Ryew, S. & Choi, H. (2001), ‘Double active universal joint (dauj): Robotic joint mechanism for humanlike motions’, *IEEE Transaction on Robotics and Automation* **17**(3), 290–300.
- Saft-Batteries (2005), <http://www.saftbatteries.com>.

- Sanyo-Batteries (2005), <http://www.sanyo.com/batteries>.
- Sciavicco, L. & Siciliano, B. (2000), *Modelling and Control of Robots Manipulators*, Vol. 1, 2 edn, Springer.
- Sick-Sensor (2005), <http://www.sick.com>, Ultrasonic sensors.
- Sie-Sensors (2005), <http://www.sie-sensors.com>.
- Sigwart, R. & Nourbakhsh, I. R. (2004), *Introduction to autonomous mobile robot*, Vol. 1, 1 edn, A bradford book.
- Suzumori, K., Miyagawa, T., Kimura, M. & Y.Hasegawa (1999), ‘Micro inspection robot for 1-in pipes’, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **4**(3), 286–292.
- Tadiran-Batteries (2005), <http://www.tadiran.com>.
- Takahashi, M., Hayashi, I., Iwatsuki, N., Suzumori, K. & Ohki, N. (1993), ‘The development of an in- pipe microrobot applying the motion of an earthworm’, **1**(2), 35–40.
- Telles, P. C. S. & Barros, D. G. (1993), *Tubulações Industriais*, Vol. 1, 3 edn, Livros Técnicos e Científicos.
- USA-Batteries, B. (2005), <http://www.bipowerusa.com>.
- Weston, J. (2000), ‘A safer way to search disaster sites’, *IEEE, Robotics and Automation Magazine* **7**, 56–57.
- White, R. M. (1991), ‘A sensor classification schemes’, *Microsensor. IEEE Press, New York* pp. 3–5.