

SISTEMA ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE LINHAS AÉREAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Pedro Lopes da Frota Moreira

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.

Dr. Plutarcho Maravilha Lourenço, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2008

MOREIRA, PEDRO LOPES DA FROTA

Sistema Robótico para Inspeção de Linhas
Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica
[Rio de Janeiro] 2008

XII, 126 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Sistemas Robóticos
2. Inspeção de Linhas de Transmissão
3. Inspeção Robotizada

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram na elaboração desta dissertação. Agradeço aos professores do Laboratório de Controle pelos ensinamentos passados ao longo do curso, ao meu orientador Fernando Lizarralde pela orientação e a todos os colegas de classe que muito me ajudaram, principalmente Guilherme, Elison, Wilmar, Paula, Fernando e Rafael.

Gostaria de agradecer também a todo apoio dado pelo Cepel e seus funcionários, em especial ao Plutarcho Maravilha, a Célia Lourenço e ao colega de laboratório Ildejairo por todo o apoio dado no desenvolvimento do projeto.

Não poderia deixar de agradecer a toda minha família, os que estão perto, os que estão longe e a que acabou de chegar, e em especial a minha namorada Renata, pelo apoio, carinho e paciência de me aturar em todos os momentos.

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

SISTEMA ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Pedro Lopes da Frota Moreira

Abril/2008

Orientador: Fernando Cesar Lizarralde

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta o projeto de um sistema robótico para inspeção de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, com ênfase na inspeção de cabos condutores utilizando técnicas não destrutivas. São apresentados os principais métodos para inspeções e manutenções em linhas de transmissão de energia elétrica que um sistema robótico pode realizar. Em seguida, o trabalho discute a estrutura mecânica, influência do vento no equilíbrio do robô, blindagem eletromagnética, eletrônica embarcada e a estratégia de controle empregados para conseguir o movimento adequado e obter os dados necessários para inspeção.

Resultados experimentais obtidos com um protótipo são apresentados mostrando que o sistema robótico projetado é flexível, podendo assim operar com mais de uma técnica de inspeção. Testes de interferência eletromagnética garantiram que o sistema é capaz de operar em linhas energizadas.

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 AERIAL POWER TRANSMISSION LINES
INSPECTION

Pedro Lopes da Frota Moreira

April/2008

Advisor: Fernando Cesar Lizarralde

Department: Electrical Engineering

This work presents a design of a robotic system for use in inspection of electric energy transmission lines, with emphasis in inspection of conductor cables using non-destructive techniques. The main methods for inspections and maintenance in electric energy transmission lines that a robotic system can perform are presented. Then, the work discusses the mechanical structure, the wind influence in the robot's balance, electromagnetic shielding, embedded system and the control strategy to achieve the appropriate movement and to obtain the necessary data for inspection.

Experimental results obtained with a prototype are presented, showing that the projected robotic system is flexible, being able to work with more than one inspection technic. Electromagnetic interference tests ensure that the system is able to perform in energized lines.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Robôs no Setor Elétrico	3
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivo	6
1.4 Metodologia	8
1.5 Organização da dissertação	8
2 Inspeção e manutenção em linhas de transmissão	10
2.1 Linhas de Transmissão de Energia Elétrica	10
2.1.1 Torres	11
2.1.2 Cabos condutores e cabos guarda	12
2.1.3 Isoladores	14
2.2 Corrosão em cabos condutores com alma de aço	15
2.2.1 Inspeção por Método Magnético	16
2.2.1.1 Inspeção utilizando o método LF de fluxo principal . .	17
2.2.1.2 Inspeção utilizando o método LMA	19
2.2.2 Inspeção por Método da Corrente Parasita	21
2.3 Desgaste de juntas e grampos	23
2.3.1 Inspeção pelo método pela medição da resistência	24
2.3.2 Inspeção pelo método da termografia	25
2.4 Inspeção visual das condições gerais da linha	25
2.5 Instalação de esferas de sinalização	26
2.6 Conclusão	27
3 Sistemas Robóticos Utilizados para Inspeção em Linhas de Trans-	
missão	28

3.1	Sistema de locomoção	29
3.1.1	Configuração simples	29
3.1.2	Configuração simples com hastes	30
3.1.3	Configuração com dois sistemas de locomoção	32
3.1.4	Configuração com três sistemas de locomoção	32
3.2	Efeito do vento no equilíbrio de robôs em linhas de transmissão	34
3.2.1	Simulações do efeito da ação do vento	37
3.2.1.1	Simulações variando a área da seção transversal ao vento	38
3.2.1.2	Simulações variando a distância entre o centro de gravidade e o cabo condutor	39
3.2.1.3	Simulações variando a velocidade média do vento	42
3.2.2	Conclusões sobre o efeito do vento no robô	42
3.3	Blindagem Eletromagnética	45
3.3.1	Cálculo da Eficiência da Blindagem	46
3.3.2	Materiais utilizados para blindagem eletromagnética	49
3.4	Conclusão	50
4	Eletrônica Embarcada em Robôs para inspeção de Linhas de Transmissão	52
4.1	Unidades de processamento	56
4.1.1	Computadores PC/104	56
4.1.2	Microcontroladores	58
4.1.3	Um exemplo comercial: CompactRIO	60
4.2	Sensores	62
4.2.1	Deteção de obstáculos	63
4.2.1.1	Sonar	64
4.2.1.2	Sensor Infravermelho	66
4.2.1.3	Chaves de toque	67
4.2.2	Posição e velocidade	68
4.2.2.1	Encoder Incremental	68
4.2.2.2	Encoder Absoluto	70
4.2.2.3	Sistema de Posicionamento Global - GPS	71
4.2.3	Visão	72
4.2.4	Sensor de desgaste em juntas	74
4.2.5	Sensor de corrosão em cabos	75
4.2.5.1	Sensores magnéticos	75
4.2.5.2	Sensores baseados em corrente parasita	76
4.3	Motores	78

4.3.1	Acionamento dos motores de corrente contínua	81
4.3.2	Sensores de corrente	83
4.4	Transmissão de dados	84
4.4.1	Módulos transceiver RF	85
4.4.2	Rede locais sem fio	86
4.5	Conclusão	87
5	Estudo de caso: Robô para inspeção de corrosão em cabos de linhas de transmissão de energia elétrica	88
5.1	Definição dos requisitos do projeto	88
5.2	Definição da arquitetura mecânica	89
5.3	Escolha da eletrônica embarcada	91
5.3.1	Sensores	92
5.3.1.1	Posição e Velocidade	93
5.3.1.2	Detecção de obstáculo	93
5.3.1.3	Visão	93
5.3.1.4	Sensor de corrente	94
5.3.2	Unidades de Processamento	94
5.3.2.1	Unidade de Processamento I	94
5.3.2.2	Definição da Unidade de Processamento II	96
5.3.3	Definição dos módulos de comunicação sem fio	96
5.3.4	Definição do Motor	98
5.4	Controle de velocidade do motor	101
5.4.1	Identificação dos parâmetros do motor	101
5.4.1.1	Método pela resposta ao degrau	103
5.4.1.2	Método de Identificação por Mínimos Quadrados	105
5.4.2	Controlador de velocidade do motor	108
5.4.3	Implementação do controlador	110
5.5	Interface com o usuário	113
5.6	Confiabilidade do sistema robótico	115
5.7	Testes e resultados	118
6	Conclusão	121
6.1	Propostas de trabalhos futuros	122
	Referências Bibliográficas	124

Lista de Figuras

1.1	Utilização mundial de robôs industriais por ano (Litzenberger 2007) . .	1
1.2	Uso de robôs de serviço por área de atuação e a expectativa de novas instalações (IFR 2005)	2
1.3	Robô para manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica de baixa e média tensão (Maruyama 2000)	3
1.4	Metodologia de um projeto mecatrônico proposta em (Rosário 2005) . .	9
2.1	Exemplos de torres utilizadas em linhas de transmissão de energia elétrica	12
2.2	(a) Seção transversal de um cabo ACSR; (b) Vista lateral de um cabo AAC	13
2.3	Exemplos de cadeias de isoladores utilizadas em linhas de transmissão de energia elétrica: (a) cadeia de amarração; (b) cadeia de suspensão .	15
2.4	Diagrama da corrosão na alma de aço de cabos tipo ACSR	16
2.5	Concepção dos sensores magnéticos de corrosão do tipo LF que fazem uso do fluxo principal	19
2.6	Sinal de saída típico de sensores magnéticos de corrosão do tipo LF . .	19
2.7	Concepção dos sensores magnéticos de corrosão do tipo LMA que fazem uso do fluxo principal	20
2.8	Sinal de saída típico de sensores magnéticos de corrosão do tipo LMA .	21
2.9	Circuito Utilizados em sensores que utilizam o método de corrente parasita	22
2.10	Métodos mais utilizados para instalação de esferas de sinalização em linhas de transmissão	27
2.11	Robô de instalação de esferas de sinalização em linhas de transmissão .	27
3.1	Diferentes configurações dos sistemas de locomoção utilizados em robôs para inspeção em linhas de transmissão (Moscatto et al. 2003)	29
3.2	Configuração simples com duas polias utilizadas em robôs para inspeção em linhas de transmissão	30

3.3	Funcionamento da configuração com hastes, para transposição de obstáculos, desenvolvida por (Sawada et al. 1991): (a) Aproximação do obstáculo; (b) Transposição do obstáculo	31
3.4	Funcionamento da configuração com hastes, para transposição de obstáculos, desenvolvida em (Montambault 2006)	32
3.5	Funcionamento da configuração com dois sistemas de locomoção utilizada em robôs para inspeção de linhas de transmissão	32
3.6	Configuração com três sistemas de locomoção utilizada em robôs para inspeção em linhas de transmissão (Ventrela et al. 2003)	33
3.7	Robô para inspeção de linhas de transmissão desenvolvido em (Zhou et al. 2005), com três sistemas de locomoção	34
3.8	Diagrama de forças do robô apoiado no cabo	35
3.9	Modelo de robô utilizado na terceira simulação da influência do vento no equilíbrio do robô	38
3.10	Modelo do robô com corpo retangular utilizado nas simulações da influência do vento no robô	39
3.11	Resultados obtidos nas simulações variando a área da seção transversal à direção do vento	40
3.12	Resultados obtidos nas simulações variando-se o comprimento L	41
3.13	Relação entre o comprimento L e a frequência harmônica do robô	42
3.14	Resultados das simulações variando a velocidade média do vento	43
3.15	Impedância de ondas eletromagnéticas em campos próximos (Paul 2006)	48
3.16	Método de blindagem desviando o campo magnético	49
4.1	Eletrônica embarcada com arquitetura simplificada (Campos et al. 2003)	54
4.2	Eletrônica embarcada dividida em camadas proposta por (Zhou et al. 2005)	55
4.3	Computador do tipo PC/104 com módulos adicionais empilhados	57
4.4	Diagrama do funcionamento interno de um microcontrolador	59
4.5	Vista frontal de um sistema CompactRIO	61
4.6	Princípio básico do funcionamento de um sonar	65
4.7	Princípio de funcionamento de um sensor Infravermelho de reflexão . .	66
4.8	Princípio de funcionamento da medição de distância com sensor infravermelho	67
4.9	Funcionamento de um encoder incremental	69
4.10	Sinais de saída de um encoder incremental em quadratura	69
4.11	Funcionamento de um encoder absoluto	70
4.12	Rede de satélites utilizados no serviço de GPS em órbita da Terra	71
4.13	Sensor de medição do desgaste de juntas	75

4.14	Sinais de saída do sensor magnético	76
4.15	Classificação dos sensores de corrente parasita pela disposição das bobinas	77
4.16	Sinal de saída de sensores por corrente parasita	77
4.17	Diagrama de forças	78
4.18	Circuito típico de acionamento de motores de corrente contínua por amplificadores lineares	81
4.19	Representação do funcionamento de uma ponte H para acionamento de um motor de corrente contínua	82
4.20	Divisão em camadas do protocolo TCP/IP	86
4.21	Exemplo de uma rede local sem fio em um sistema robótico	87
5.1	Estrutura mecânica do sistema robótico desenvolvido no projeto	90
5.2	Vista frontal e lateral do sistema robótico desenvolvido no projeto	91
5.3	Eletrônica embarcada dividida em camadas proposta para o projeto	92
5.4	Gráfico da tensão de saída do sensor de corrente utilizado no projeto	94
5.5	Circuito utilizado adequar a saída do sensor de corrente à leitura do A/D	95
5.6	Funcionamento da comunicação entre a eletrônica embarcada e a base com o uso de dois canais de comunicação	97
5.7	Funcionamento da comunicação entre a eletrônica embarcada e a base utilizando rede local sem fio	98
5.8	Diagrama da ponte H	100
5.9	Circuito de tempo morto	100
5.10	Circuito equivalente do motor de corrente contínua	101
5.11	Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem	104
5.12	Resposta ao degrau aplicado no motor de corrente contínua utilizado	104
5.13	Comparação entre os dois modelos do motor DC identificados	108
5.14	Controle do motor em malha fechada simulado no MATLAB	109
5.15	Simulação da resposta do sistema utilizando o controlador projetado em malha fechada	110
5.16	Diagrama do sistema de controle implementado no projeto	112
5.17	Comparação entre o resultado obtido e o resultado simulado	112
5.18	Estação base para o controle do robô	113
5.19	Tela do programa desenvolvido para a interface do usuário com o robô	113
5.20	Arvore de falhas do sistema robótico projetado	116
5.21	Fluxograma do tratamento das falhas no robô	117
5.22	Teste de movimentação do protótipo desenvolvido para inspeção em linhas de transmissão	118
5.23	Cabo condutor visto pela câmera de vídeo do robô	119
5.24	Teste de interferência no robô submetido a alta tensão e alta corrente	120

Lista de Tabelas

2.1	Sistemas de distribuição e transmissão de energia	10
3.1	Classificação dos obstáculos	29
3.2	Amplitudes pico a pico do ângulo θ obtidos nas simulações variando a área da seção transversal à direção do vento	39
3.3	Dimensões dos modelos de robôs utilizados nas simulações variando-se L	40
3.4	Dimensões dos modelos de robôs utilizados nas simulações variando a velocidade do vento	42
3.5	Amplitude pico a pico do ângulo θ obtidas nas simulações variando a velocidade média do vento	44
3.6	Valores de σ_r e μ_r de alguns metais	50
4.1	Módulos CPU no padrão PC/104	58
4.2	Comparação entre microcontroladores	60
4.3	Módulos Controladores CompactRIO	62
4.4	Módulos de entrada e saída de dados	62
4.5	Exemplos de sensores	63
4.6	Métodos de detecção de obstáculos	64
4.7	Sensores do tipo sonar disponíveis no mercado	65
4.8	Sensores da família GP2XXX	67
4.9	Classificação dos sensores de posição	68
4.10	Encoders Incrementais	70
4.11	Encoders Absolutos digitais	71
4.12	Módulos GPS	72
4.13	Sensores	75
4.14	Módulos RF transceiver	85
5.1	Resultado obtido com a resposta ao degrau aplicado no motor	105

Capítulo 1

Introdução

O uso de sistemas robóticos vem se difundindo ao longo das últimas décadas. Segundo (Litzenberger 2007) existe a perspectiva de se chegar a mais de um milhão de robôs operando em linhas de produção industrial até o ano de 2010, como pode ser visto no gráfico da figura 1.1.

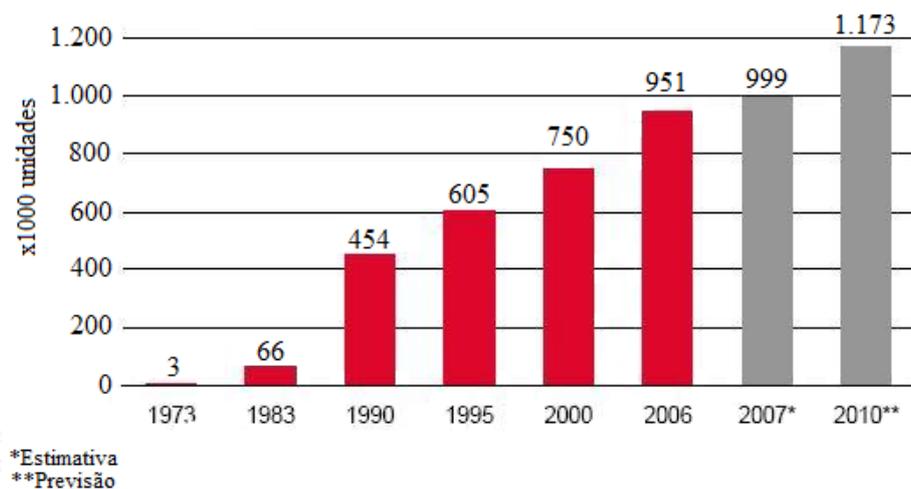


FIGURA 1.1: Utilização mundial de robôs industriais por ano (Litzenberger 2007)

Os avanços tecnológicos nas áreas de sensores, controle e acionamento permitiram a implementação de sistemas robóticos para aplicações em outras áreas além da produção industrial, são os chamados robôs de serviço (Oliveira & Lages 2007). De acordo com IFR (International Federation of Robotics) define-se um robô de serviço como aquele que executa tarefas úteis para o bem estar de seres humanos ou de equipamentos,

podendo operar de forma autônoma ou semi-autônoma. Os robôs de serviços podem ser separados em três grupos:

- Robôs servindo humanos - segurança pessoal, atividades domésticas, entretenimento etc.
- Robôs servindo equipamentos - manutenção, reparo, limpeza etc.
- Robôs realizando outras tarefas autônomas - vigilância, transporte, aquisição de dados etc.

O gráfico da figura 1.2 disponibilizado pelo departamento de estatística da IFR, mostra a distribuição de robôs de serviços para uso profissional, ou seja aqueles que não são utilizados em tarefas domésticas ou de entretenimento, instalados até o final de 2006 e a estimativa de novas instalações até o final de 2010.

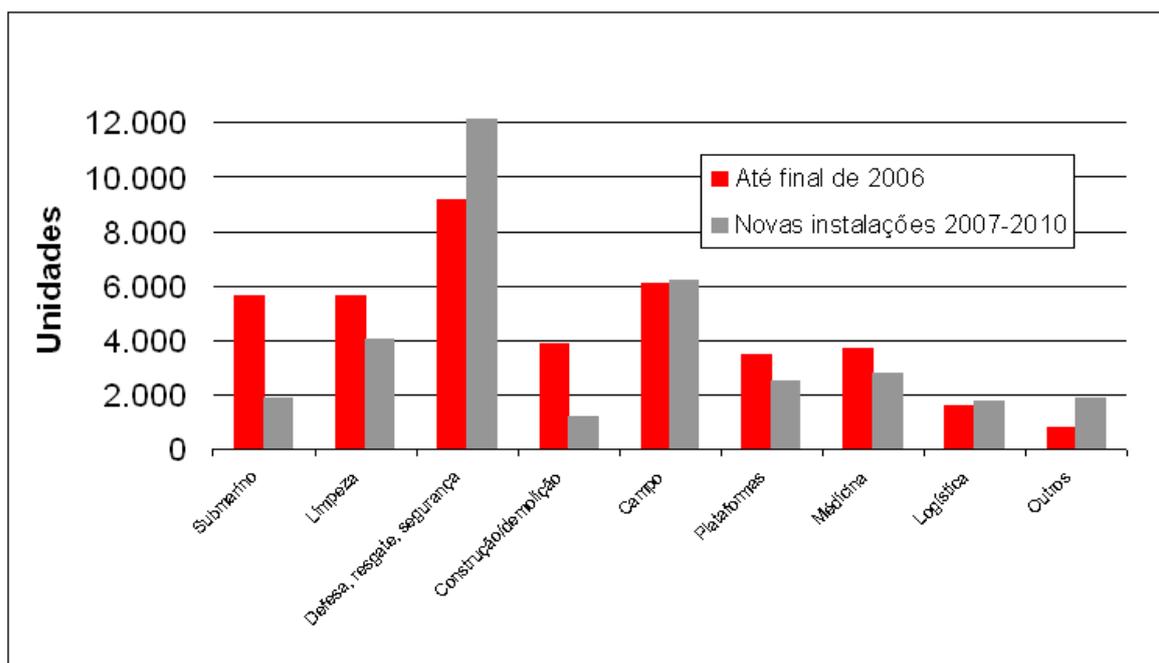


FIGURA 1.2: Uso de robôs de serviço por área de atuação e a expectativa de novas instalações (IFR 2005)

O emprego de robôs cresce de importância em situações onde o ambiente é de difícil acesso ou hostil ao ser humano, como, por exemplo, imersão em águas profundas, exploração em regiões contaminadas, inóspitas ou explosivas etc. O setor elétrico é outro exemplo que se apresenta como um campo vasto para aplicações de sistemas

robóticos, devido a sua diversidade de fenômenos e aos locais e condições em que esses ocorrem.

1.1 Robôs no Setor Elétrico

Vários exemplos de robôs empregados no setor elétrico são encontrados atualmente, principalmente em tarefas de manutenção e inspeção de linhas de energia elétrica.

O uso de braços robóticos para a realização de trabalhos como inspeção, limpeza e substituição de isoladores são razoavelmente difundidos no Japão (Montambault & Pouliot 2003). Os robôs desenvolvidos em (Aracila, Pefina, Femea, Jimneza & Barrientosa 1995) e (Maruyama 2000) permitem a realização de tarefas de manutenção nas cadeias de isoladores de linhas de média tensão (até $22kV$), sem a necessidade de desligamento da linha. O robô desenvolvido em (Maruyama 2000) é equipado com dois braços robóticos comandados por um operador a distância, como mostra a figura 1.3.

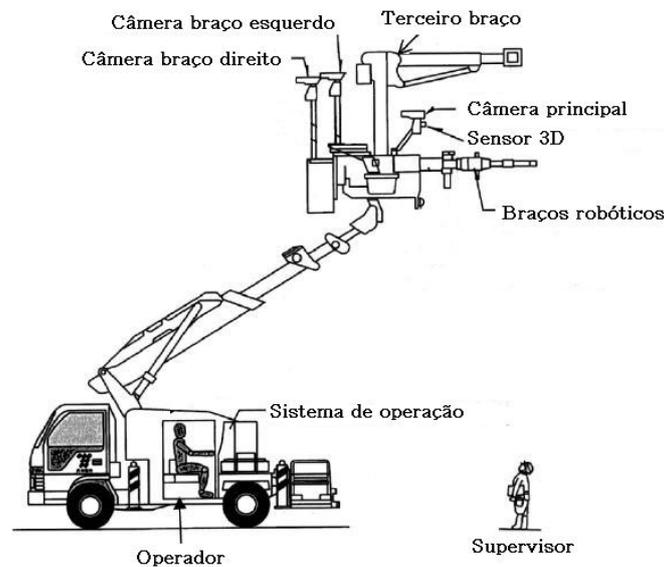


FIGURA 1.3: Robô para manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica de baixa e média tensão (Maruyama 2000)

A instalação de esferas de sinalização em cabos guarda é outra tarefa que pode ser realizada por robôs (Campos, Pereira, Vale, Bracarense, Pinheiro & Oliveira 2003). Os métodos tradicionais de instalação de esferas por meio de um helicóptero, além de caros, colocam em risco a vida dos operadores, por isso robôs capazes de realizar

essa instalação foram desenvolvidos, como é o caso do robô apresentado em (Campos et al. 2003).

A inspeção das condições das linhas de transmissão de energia elétrica e de seus componentes é mais uma tarefa importante que pode ser realizada por robôs. Os procedimentos adotados atualmente, além de apresentar sérios riscos ao pessoal envolvido, o que por si só já justificaria o desenvolvimento de sua automação, têm custo alto e exigem um tempo longo para serem executados (Oliveira & Lages 2007).

A inspeção visual, por exemplo, atualmente a mais adotada, é feita normalmente por um helicóptero que sobrevoa toda a extensão da linha (Ishino & Tsutsumi 2004). Atualmente esse tipo de inspeção já é feita, em alguns casos, por um robô percorrendo os cabos da linha de transmissão, conforme apresentado em (Ventrela, Moscato, de Souza, dos Santos, Filho & Ferreira 2003), (Zhou, Wang, Li & Xiao 2005) e (Montambault & Pouliot 2003), e uma de suas vantagens em relação a anterior é a possibilidade de se obter imagens mais detalhadas dos componentes da linha.

A utilização de robôs facilita o emprego de outras técnicas na detecção de falhas na alma de aço de cabos de linhas de transmissão, como as técnicas magnética e eletromagnética, permitindo melhorar a qualidade dos resultados obtidos em relação a inspeção visual. Exemplos de robôs que utilizam essas técnicas podem ser encontrados em (Komoda, Kawashima, Minemura, Mineyama, Aihara, Ebinuma, Kanno & Kiuchi 1990), (Sawada, Kusumoto, Maikawa, Munakata & Ishikawa 1991).

1.2 Motivação

A procura por serviços de energia melhores e mais eficientes está exigindo das empresas do setor elétrico investimentos em novos equipamentos, que permitam monitorar todo o sistema elétrico, do nível de água nos reservatórios até os medidores de energia, de modo a prever possíveis eventos ou falhas que prejudicariam o funcionamento adequado do sistema e antecipar soluções visando eliminar ou reduzir os seus efeitos. Cada parte do sistema elétrico, geração, distribuição e transmissão, é afetada de maneira diferente pelos eventos que ocorrem.

Na parte de transmissão de energia, por exemplo, as linhas de transmissão ficam expostas a variações climáticas (vento, chuva, neve, etc) e às condições do ambiente

em que se encontram, durante vários anos. Um problema que ocorre nessas linhas é o desgaste gradual do cabo que, se não for detectado a tempo, pode ocasionar a sua ruptura e em consequência sérios prejuízos.

Para tentar minimizar os riscos de tal falha e suas consequências, normas e códigos de segurança recomendam a realização de inspeções periódicas para determinar as condições reais dos cabos (Weischedel 1985).

Quanto mais antigas as linhas de transmissão de energia elétrica, mais susceptíveis estão os seus cabos de apresentar problemas. Estudos realizados em linhas de 115 kV, em Toronto, Canadá (Havard, Bellamy, Buchan, Ewing, Horrocks, Krishnasamy, Motlis & Yoshiki-Gravelsins 1992), mostraram que interrupções no fornecimento de energia, não relacionadas a causas meteorológicas, aumentaram de menos de uma por ano em linhas de 10 a 30 anos, para valores entre três e cinco em linhas de 70 a 80 anos. Embora exista uma diferença de idade grande (40 anos) entre os grupos comparados, dependendo das condições do ambiente em que a linha se encontre, essa diferença pode diminuir.

Uma outra análise estatística apresentada em (Weischedel 1985), que analisou mais de 8.000 resultados de testes em campo e em laboratório, revelou os seguintes fatos sobre a condição de cabos em serviço:

- Aproximadamente 10% de todos os cabos considerados mostraram perda de robustez acima de 15%; mais de 2% dos cabos tinham perda acima de 30% de sua robustez nominal. Em outras palavras, embora ainda em serviço, 10% de todos os cabos estavam em uma condição inaceitável e potencialmente perigosa e 2% estavam em uma condição extremamente perigosa
- Inversamente, mais de 70% de todos os cabos na amostra foram retirados de serviço com pouca ou nenhuma perda de robustez
- Os valores acima sugerem que somente uma percentagem muito pequena de cabos foi substituída no tempo adequado.

Essas observações ilustram que: embora a maioria dos cabos seja retirada prematuramente por precaução, muitos cabos em serviço podem estar severamente degradados

e em condição perigosa. Isso significa que anualmente são desperdiçados recursos elevados com cabos em bom estado, sem garantir a segurança necessária dos cabos. Torna-se importante, portanto, que procedimentos de inspeção sejam aplicados nos cabos para tentar identificar as condições em que estes se encontram e indicar com antecedência a necessidade de manutenção, se for o caso, de modo a evitar situações de risco.

A falta de resultados satisfatórios nas inspeções em cabos e a dificuldade de se realizar algumas tarefas de manutenção em linhas de transmissão, impulsionou a busca de novos métodos para realização dessas tarefas. Dentro desse quadro, os sistemas robóticos apareceram como uma alternativa para a realização de tais tarefas possibilitando a redução de custos, aumento da segurança do pessoal e diminuição do tempo gasto na sua realização.

No Brasil, onde uma quantidade considerável de linhas de transmissão já ultrapassou os 40 anos de idade e alguns eventos foram registrados, o conhecimento dos efeitos do envelhecimento dos seus cabos, empregando procedimentos de inspeção adequados, é uma necessidade premente.

1.3 Objetivo

O objetivo desse trabalho é desenvolver o projeto mecatrônico de um robô para percorrer os cabos de uma linha de transmissão, comandado remotamente, de modo a permitir a realização de testes não destrutivos nesses cabos com equipamentos apropriados. A disponibilidade de uma ferramenta desse tipo traz algumas vantagens para as empresas de energia elétrica, como:

- segurança - reduz o risco de vida
- rapidez nos serviços - permite diminuir o tempo de execução de tarefas
- confiabilidade - a diminuição do tempo de execução de tarefas possibilita a sua repetição garantindo resultados mais confiáveis
- economia - a obtenção de diagnósticos mais confiáveis permite a programação de manutenções no equipamento somente quando necessário, aumentando a sua disponibilidade

- versatilidade - o sistema pode ser empregado em várias tarefas distintas.

O trabalho visa a construção de um protótipo capaz de inspecionar uma quantidade significativa de linhas de transmissão de energia elétrica. Por se tratar de um tema ainda pouco difundido no Brasil, serão abordados ainda diversos tipos de falhas que podem ocorrer em linhas de transmissão e as inspeções que podem ser realizadas por sistemas robóticos a fim de identificar essas falhas. Para a construção do protótipo, o projeto contou com o apoio financeiro da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e com o apoio do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

Como resultado deste trabalho é apresentado o protótipo construído, capaz de realizar a inspeção visual de cabos e com a previsão de receber, em trabalhos futuros, sensores de corrosão em cabos condutores de energia elétrica. Com base nos estudos realizados sobre métodos de inspeção e robôs já existentes para esta finalidade, chegou-se a um protótipo com as seguintes características:

- Peso do robô: $25kg$
- Método de Inspeção: Visual
- Velocidade máxima: $40m/min$
- Operação remota sem fio
- Capacidade para adicionar sensores de corrosão em cabos condutores

A melhoria das inspeções e a utilização de sensores de corrosão em cabos condutores de energia elétrica podem trazer grandes benefícios para as empresas responsáveis pela transmissão e distribuição de energia elétrica, uma vez que elas podem identificar possíveis pontos de falhas, permitindo assim uma manutenção preventiva e evitando que cabos condutores em bom estado sejam retirados prematuramente. Para tentar minimizar o número de acidentes e evitar trocas desnecessárias de cabos, a CHESF investe cada vez mais no desenvolvimento de pesquisas para a melhoria da qualidade das inspeções em linhas de transmissão de energia elétrica.

Com esse trabalho pretende-se contribuir na melhoria dos métodos e técnicas de inspeção de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica utilizados no Brasil.

1.4 Metodologia

De acordo com o que é apresentado em (Bishop 2005), o projeto de um sistema mecatrônico é um relacionamento bidirecional entre os projetos de um sistema mecânico e de um sistema eletrônico. Com base nisso, é proposto em (Rosário 2005) uma metodologia básica para o desenvolvimento de projetos mecatrônicos, que pode ser observada na figura 1.4.

Ainda em (Rosário 2005) são apresentadas algumas características do projeto de um sistema mecatrônico:

- É possível distinguir uma parte que trata do projeto mecânico e outra parte que trata do projeto eletrônico.
- A especificação do sistema ocorre mediante a execução concomitante do projeto mecânico e do projeto eletrônico.
- Há duas possíveis alternativas para um reprojeto, no caso de um projeto inicial não atender as especificações.

Esta foi a metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto.

1.5 Organização da dissertação

O trabalho foi dividido em seis capítulos. No capítulo 1, é feita uma introdução de sistemas robóticos e da evolução de seu emprego ao longo dos anos em diversos tipos de atividades, em especial no setor elétrico. Em seguida são apresentadas a motivação para o trabalho desenvolvido e o seu objetivo.

O capítulo 2 apresenta alguns tipos de tarefas que podem ser realizadas por um robô em linhas aéreas de transmissão e as técnicas que geralmente são empregadas.

Um estudo sobre os sistemas mecânicos utilizados em robôs para inspeção em linhas de transmissão está no capítulo 3.

Os circuitos e componentes eletrônicos geralmente utilizados em um robô, são apresentados no capítulo 4, onde suas vantagens e desvantagens são analisadas. Ainda neste capítulo, são apresentadas as principais opções de componentes encontradas no mercado.

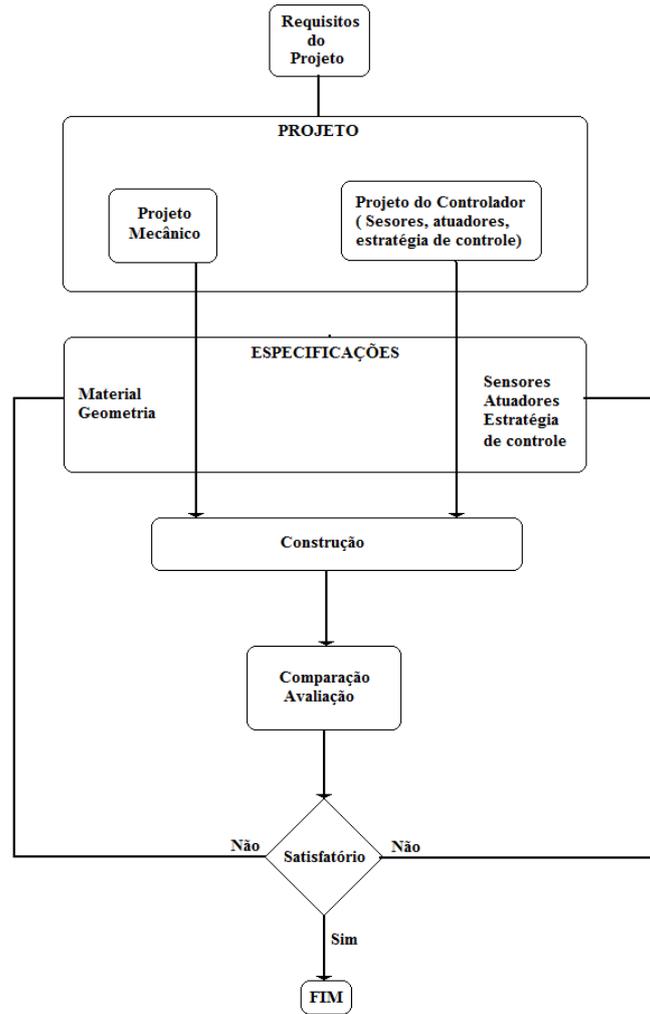


FIGURA 1.4: Metodologia de um projeto mecatrônico proposta em (Rosário 2005)

O capítulo 5 mostra o estudo de caso realizado: Projeto mecatrônico para a construção de um robô capaz de identificar falhas em cabos de alumínio com alma de aço (ACSR) de linhas de transmissão de energia elétrica.

As análises e estudos feitos nos capítulos anteriores são usadas para a escolha de circuitos, sensores e demais elementos do robô. O resultado de diversos testes realizados durante as várias etapas de construção do robô são discutidos no final do capítulo 5.

O capítulo 6 conclui a dissertação trazendo comentários sobre o desenvolvimento do projeto e os resultados alcançados, e apresentando propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Inspeção e manutenção em linhas de transmissão

Neste capítulo apresenta-se algumas técnicas de inspeção e manutenção em linhas de transmissão que podem ser realizadas por um robô. Antes de apresentar essas técnicas, apresenta-se uma introdução sobre as linhas de transmissão e os componentes que as compõem.

2.1 Linhas de Transmissão de Energia Elétrica

Em qualquer lugar que utilize a eletricidade como fonte de energia, requer um sistema de transmissão e distribuição. Isso porque, em geral, a energia elétrica não é produzida no local onde será consumida.

Os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica são classificados de acordo com o nível de tensão em que operam. A tabela 2.1 mostra a divisão em camadas dos sistemas de transmissão e distribuição com suas respectivas tensões.

Componente		Tensão (kV)
Geração		2,2 - 22,0
Transmissão		138 - 1000
	Sub transmissão	22 - 138
Distribuição	Distribuição primária	3,8 - 22
	Distribuição secundária	0,110 - 0,440

TABELA 2.1: Sistemas de distribuição e transmissão de energia

A transmissão de energia elétrica pode ser definida como o transporte da energia dos centros geradores até os centros de consumo. Esse transporte é feito por linhas de transmissão operando normalmente em alta tensão, entre 230kV e 750kV. Trabalhando num nível de tensão mais baixo está o sistema de distribuição, que fornece a energia elétrica vinda dos sistemas de transmissão para os consumidores finais. Um sistema de distribuição de energia pode ser dividido em três subsistemas: sub transmissão, distribuição primária e distribuição secundária.

No Brasil, devido à grande extensão territorial e às grandes distâncias entre os centros geradores e os centros de consumo, tem-se uma extensa rede de transmissão e distribuição de energia elétrica. Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão responsável pelo controle e coordenação dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica no Brasil, somente a rede básica, que compreende as linhas com tensões de 230kV a 750kV, atingiu no final de 2005 uma extensão de 86.229km (ONS 2006).

Uma linha de transmissão é formada por uma série de componentes, pode-se citar como os três principais componentes de uma linha de transmissão:

1. Torres
2. Cabos condutores e cabos guarda
3. Isoladores

2.1.1 Torres

As torres são estruturas de suporte necessárias para carregar cabos condutores e cabos guarda, devendo suportar todas as forças aplicadas a ela, e ao mesmo tempo satisfazer todos os requisitos necessários para o funcionamento ideal da linha, como por exemplo a distância entre os cabos e o solo, e a distância dos cabos entre si.

Os comprimentos do vão entre as torres e a arquitetura utilizada em cada torre são determinados por um estudo que define a maior economia com a maior segurança, levando em conta todas as variáveis envolvidas no projeto: torres, isoladores, tipo de condutores, tensão da linha, geografia do terreno etc. Por exemplo, torres mais altas são estruturas mais complexas e mais caras, porém o comprimento do vão entre elas

pode ser maior, o que permite uma quantidade menor de torres por quilometro, ao passo que torres menores são mais baratas e menos complexas mas necessitam de um número maior de torres por quilometro (Ryam 1994). Na figura 2.1 pode-se ver alguns exemplos de torres utilizadas por empresas de transmissão de energia elétrica.

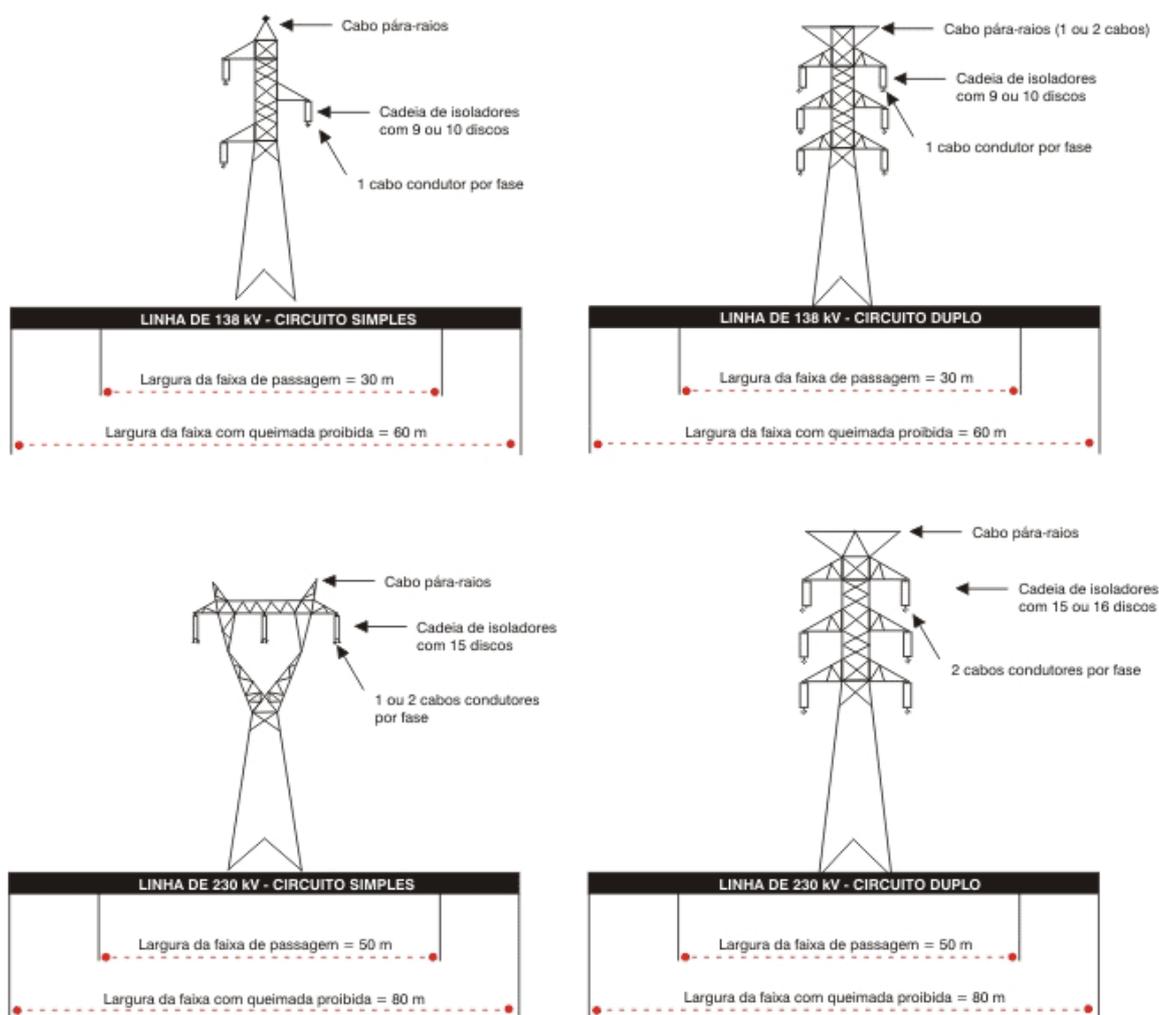


FIGURA 2.1: Exemplos de torres utilizadas em linhas de transmissão de energia elétrica

2.1.2 Cabos condutores e cabos guarda

Os cabos condutores têm a função de transportar a energia elétrica. Já os cabos guardas, também chamados de cabos de terra, são cabos que se localizam normalmente acima dos cabos condutores e têm como função proteger os cabos condutores de descargas elétricas.

Atualmente os cabos condutores de alumínio são os mais utilizados. No caso de linhas de transmissão, os condutores de alumínio têm substituído os condutores de cobre, isto porque se for analisado um condutor de cobre e um condutor de alumínio com a mesma resistência chega-se a conclusão que o condutor de alumínio, apesar de ter um diâmetro maior, será bem mais leve que o condutor de cobre, além de ter um custo financeiro menor (Ryam 1994).

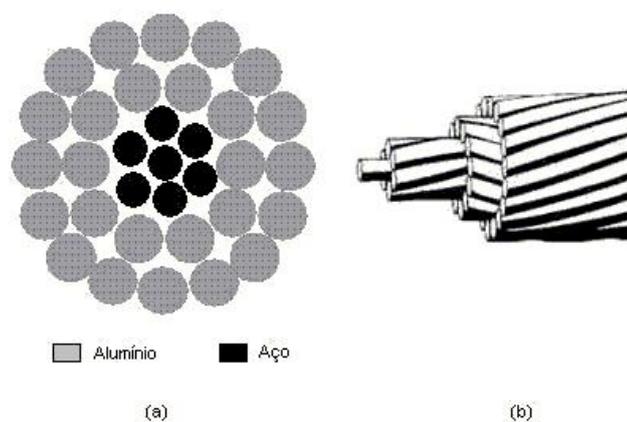


FIGURA 2.2: (a) Seção transversal de um cabo ACSR; (b) Vista lateral de um cabo AAC

Os cabos condutores são formados por fios condutores torcidos de maneira a uniformizar a seção reta do cabo, como pode ser visto na figura 2.2. Esses fios podem ser de alumínio, liga de alumínio ou de aço. Os fios de alumínio garantem a boa condutibilidade do cabo, enquanto que os fios de aço garantem uma boa resistência mecânica. Atualmente pode-se classificar os cabos condutores de alumínio em quatro categorias:

1. AAC (All Aluminum Cable) - São cabos formados apenas por fios de alumínio. Tem ótima condutibilidade, porém baixa resistência mecânica.
2. AAAC(All Aluminum Alloy Cable) - São cabos formados por fios de uma liga de alumínio, essa liga normalmente é composta de alumínio mais magnésio ou silício e tem uma resistência mecânica maior que o cabo puramente de alumínio.
3. ACSR (Aluminum Cable Steel Reinforced) - São cabos formados por fios de alumínio, mas com fios de aço no centro formando uma alma de aço, que garante uma grande resistência mecânica ao cabo, com uma boa condutibilidade.

4. ACAR (Aluminum Cable Alloy Reinforced) - Cabo formado por fios de alumínio com uma alma de liga de alumínio. Têm uma ótima condutibilidade, e uma resistência mecânica razoável.

Com a inclusão de fios de aço na alma do cabo, é possível obter cabos com grande resistência mecânica, baixo peso e boa condutibilidade. Assim os cabos de alumínio com alma de aço (ACSR) são muito utilizados em linhas de transmissão.

Os cabos guarda por não terem a necessidade de conduzir energia elétrica, são normalmente feitos de fios de aço torcidos, assim é possível obter cabos com grande resistência mecânica.

2.1.3 Isoladores

O papel dos isoladores nas linhas de transmissão é o de sustentar os cabos e isolá-los eletricamente das torres, evitando assim a passagem de corrente entre os condutores e a terra.

As principais características desejadas de um isolador são:

- Elevada resistividade
- Rigidez dielétrica suficiente para agüentar tensões muito maiores que a tensão de operação, evitando danos em casos de sobretensão.
- Forma adequada que diminua ao máximo a corrente de fuga e que evite descargas de contornamento. Descargas de contornamento são descargas elétricas em arco que ocorrem entre o condutor e as partes metálicas dos suportes. Ela acontece normalmente em dias de chuva ou com grau de umidade do ar muito elevado.
- Resistência mecânica suficiente para suportar os esforços exercidos pelos condutores.
- Resistência às variações de temperatura

Atualmente os isoladores são feitos de porcelana ou de vidro e são agrupados formando uma cadeia de isoladores. O número de isoladores que formam uma cadeia

depende da tensão em que a linha opera. Para tensões de 120kV usa-se de 6 a 8 isoladores, enquanto para linhas de 500kV usa-se de 26 a 32 isoladores. As cadeias de isoladores podem ser divididas em dois grupos:

- Cadeia de suspensão - Cadeias verticais ou em V, são usadas em postes onde há apenas o suporte da linha ou um pequeno ângulo.
- Cadeia de amarração - Cadeias horizontais, são usadas em postes de amarração, de ângulo ou de fim de linha.

A figura 2.3 mostra um exemplo de cadeia de amarração e um exemplo de cadeia de suspensão.

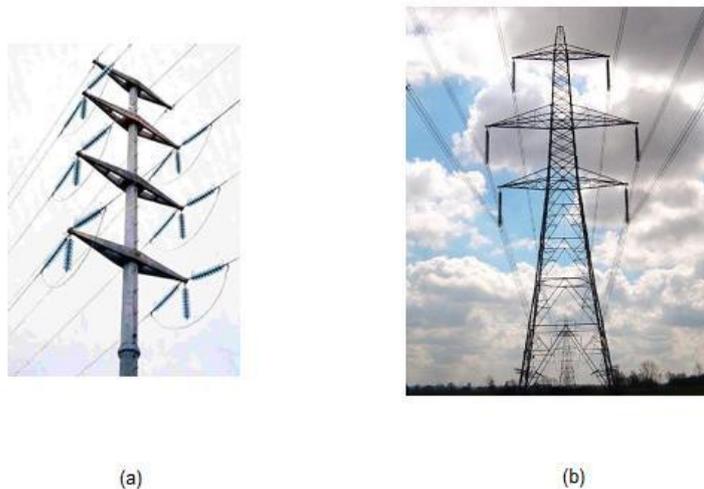


FIGURA 2.3: Exemplos de cadeias de isoladores utilizadas em linhas de transmissão de energia elétrica: (a) cadeia de amarração; (b) cadeia de suspensão

2.2 Corrosão em cabos condutores com alma de aço

Como visto na seção 2.1.2, um cabo condutor do tipo ACSR é formado por fios de aço e de fios de alumínio. Para reduzir a corrosão, os fios de aço são galvanizados, ou seja, recebem uma película de zinco e além disso são separados dos fios de alumínio por uma camada de graxa.

A corrosão galvânica ocorre quando dois elementos de potenciais de oxidação diferentes se encontram imersos em um eletrólito, como por exemplo uma barra de ferro e uma de cobre imersas numa solução aquosa com íons de cloro e oxigênio dissolvido.

No caso da corrosão em cabos ACSR, ocorre que, no momento em que a chuva penetra no cabo ela traz consigo substâncias encontradas na atmosfera como o dióxido de enxofre (SO_2), o cloreto de sódio ($NaCl$) e o ácido clorídrico (HCl). Essas substâncias reagem com o alumínio formando o cloreto de alumínio ($AlCl_3$), que penetra na graxa e reage com a película de zinco, corroendo lentamente a proteção existente, como pode ser visto na figura 2.4. A partir daí o alumínio e o aço, que possuem potenciais de oxidação diferentes, encontram-se imersos em um eletrólito sem nenhuma proteção, podendo começar assim o fenômeno da corrosão galvânica.

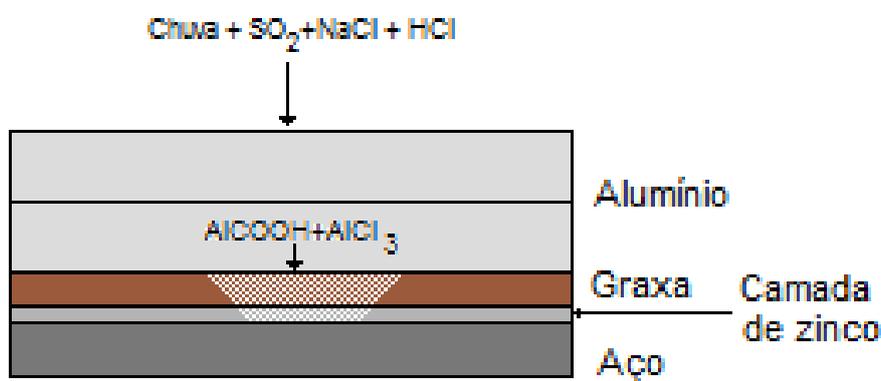


FIGURA 2.4: Diagrama da corrosão na alma de aço de cabos tipo ACSR

O maior problema desse tipo de corrosão se deve por ela ocorrer na parte interna do cabo, de dentro para fora, só sendo possível verificar a sua existência a olho nú quando a corrosão já estiver avançada. Para tentar detectar esse tipo de corrosão num estado inicial, alguns métodos têm sido desenvolvidos.

2.2.1 Inspeção por Método Magnético

A utilização desse tipo de inspeção é bastante difundida em diversos países, principalmente para inspeção em cabos de ancoragem. Consta na literatura que o primeiro sensor desse tipo foi desenvolvido aproximadamente em 1907 (Weischedel 1985).

Essa técnica consiste em saturar magneticamente um segmento do cabo de aço na direção longitudinal por meio de um ímã permanente e empregar uma bobina ou sensor de efeito hall como sensor.

Baseado nesses conceitos surgiram dois tipos diferentes de métodos de inspeção:

- LF (“local fault”)- São capazes de localizar uma falha, mas dificilmente conseguem identificar a intensidade dessa falha.
- LMA (“Loss of metallic area”) - Esses sensores conseguem definir a intensidade da falha.

Atualmente os equipamentos de inspeção eletromagnética em cabos de aço permitem a detecção de descontinuidades do tipo LF e LMA, simultaneamente. Dentro desta linha mais moderna de equipamentos, pode-se distinguir dois grandes grupos. O primeiro grupo faz uso do princípio físico do Fluxo Magnético de Retorno e o segundo utiliza-se do método do Fluxo Magnético Principal.

O método de fluxo magnético principal utiliza uma bobina concêntrica ao cabo, medindo assim o fluxo no cabo de aço. Já o método de fluxo magnético de retorno utiliza detectores do tipo Hall ou bobinas sensoras que são posicionados entre os pólos do ímã permanente e o cabo ou posicionados no interior do circuito magnético, medindo o fluxo magnético que retorna do cabo.

Os equipamentos que utilizam a técnica de fluxo de retorno não possuem um alto poder de resolução se comparados a equipamentos de fluxo principal (Weischedel 1998). Enquanto os equipamentos de fluxo de retorno determinam uma variação média da área da seção reta metálica em um comprimento de cabo equivalente à distância entre os pólos do ímã, os equipamentos de fluxo principal determinam esta mesma variação em um comprimento de cabo equivalente às dimensões da bobina sensora. Devido a essa limitação iremos nos restringir apenas aos sensores LF/LMA de fluxo magnético principal.

O fato desses equipamentos serem muito pesados e a dificuldade de se conseguir um sensor de fácil manuseio, fizeram com que esse tipo de método não se tornasse, até os dias de hoje, muito utilizado em linhas aéreas de transmissão.

2.2.1.1 Inspeção utilizando o método LF de fluxo principal

Segundo a lei de Faraday, variações no campo magnético que envolve uma bobina induzem uma tensão na bobina, também chamada de força eletromotriz. Essa tensão é proporcional ao numero de espiras da bobina e à variação do fluxo no tempo (Halliday, Resnick & Walker 2004):

$$v = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

$$\Phi = \int B dA \quad (2.2)$$

onde v é a tensão induzida na bobina, N é o número de espiras da bobina e Φ é o fluxo magnético. O fluxo magnético pode ser calculado por (2.2), onde B é a densidade de fluxo magnético e dA é um vetor paralelo a área da superfície e com magnitude igual a área dA (Halliday et al. 2004). Considerando um campo magnético constante o fluxo magnético é dado por (2.3), onde θ é o ângulo entre a seção reta do cabo e o campo magnético.

$$\Phi = BA \cdot \cos\theta \quad (2.3)$$

Como neste caso o campo magnético é perpendicular à seção reta do cabo, $\cos\theta = 1$ e substituindo (2.3) em (2.1), pode-se chegar até (2.5):

$$v = -N \frac{d(BA)}{dt} \quad (2.4)$$

$$v = -N \cdot \left(A \frac{dB}{dt} + B \frac{dA}{dt} \right) \quad (2.5)$$

Para B constante tem-se:

$$v = -N \cdot B \cdot \frac{dA}{dt} \quad (2.6)$$

No método LF de fluxo magnético principal, o sinal utilizado para a detecção da falha é a própria tensão v , figura 2.5. Nos trechos em que o cabo não possui falhas, o valor dessa tensão será aproximadamente constante (valor de equilíbrio).

Quando uma falha, que modifique a seção do cabo, ocorrer, a parte defeituosa entrando no sensor altera o valor de v , como ilustrado no ponto x_1 da figura 2.6; essa parte ao deixar o sensor, após um pequeno intervalo de tempo, muda a tensão v , conforme indicado no ponto x_2 da mesma figura. Essa variação de tensão permite acusar a presença de falhas no cabo.

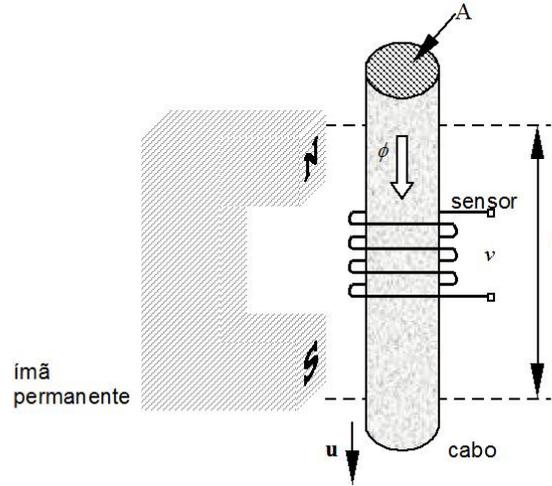


FIGURA 2.5: Concepção dos sensores magnéticos de corrosão do tipo LF que fazem uso do fluxo principal

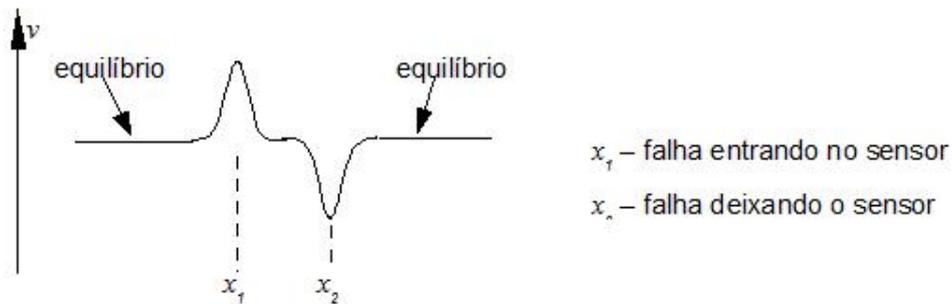


FIGURA 2.6: Sinal de saída típico de sensores magnéticos de corrosão do tipo LF

Instrumentos baseados em LF fornecem uma indicação qualitativa de falhas em cabos, especialmente as que apresentam variações bruscas de seção, e são utilizados na sua localização. Para detectar falhas graduais, no entanto, eles não são muito apropriados.

Uma interpretação quantitativa dos sinais fornecidos por instrumentos do tipo LF é muito difícil, às vezes impossível, e requer pessoal altamente qualificado. Porém, a inspeção de cabos com esses instrumentos pode detectar muitas falhas que inspeções visuais não conseguem detectar.

2.2.1.2 Inspeção utilizando o método LMA

A figura 2.7 mostra como obter o sinal empregado em instrumentos LMA de fluxo principal. A tensão de interesse é calculada integrando o sinal v de saída do sensor, de

acordo com:

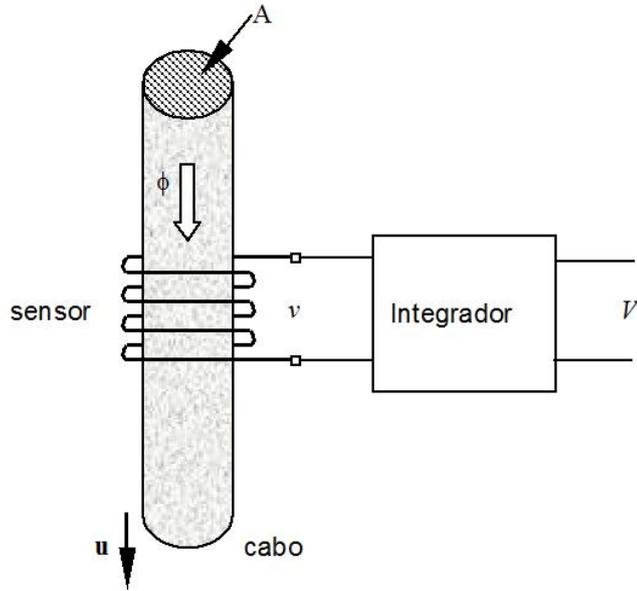


FIGURA 2.7: Concepção dos sensores magnéticos de corrosão do tipo LMA que fazem uso do fluxo principal

$$V = \int v dt \quad (2.7)$$

Substituindo o valor de v dado em (2.6), tem-se:

$$V = -N \cdot \phi = -N \cdot B \cdot A \quad (2.8)$$

Uma vez que o cabo está saturado magneticamente, o fluxo longitudinal é diretamente proporcional à área da seção reta transversal instantânea do cabo. Assim, uma variação de V é uma medida da variação dessa área A .

$$\Delta V \propto \Delta A$$

Diferentemente do método LF, o sensor deste método mede o valor da tensão e não apenas variações no seu valor. O comportamento da tensão V , em trechos sem falha e com falha, pode ser visto na figura 2.8.

Observa-se por essa figura que, com os valores de V , é possível estimar a alteração causada na seção do cabo pela falha. Esse método, portanto, possibilita localizar a

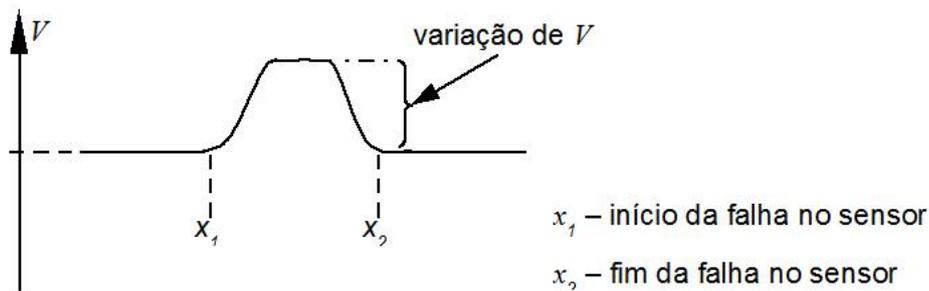


FIGURA 2.8: Sinal de saída típico de sensores magnéticos de corrosão do tipo LMA

falha no cabo e quantificar a sua extensão.

2.2.2 Inspeção por Método da Corrente Parasita

A inspeção pelo método de corrente parasita tem origem na descoberta da indução magnética feita por Michael Faraday e na descoberta de Hughes de que uma bobina mudava suas características ao se aproximar de materiais com diferentes condutibilidades. Mas foi apenas na segunda guerra mundial que a teoria foi colocada em prática, e muito utilizada na inspeção de materiais metálicos na indústria aeronáutica e nuclear.

Os sensores de corrente parasita podem ser divididos em dois tipos (Cartz 1995):

1. Sensores Absolutos
2. Sensores Diferenciais

Sensores absolutos geralmente utilizam apenas uma bobina. Nele, quando uma corrente alternada passa pela bobina gera um campo magnético ao redor dela mesmo, quando a bobina é posicionada perto de um material condutor o campo magnético gera uma corrente parasita no material. A geração dessa corrente parasita consome energia, o que pode ser observado como um aumento da resistência elétrica da bobina. A corrente parasita gera, ao redor do material condutor que está sendo inspecionado, o seu próprio campo magnético, que se opõe ao campo magnético da bobina, e isso altera a reatância indutiva da bobina. Medindo a alteração da impedância absoluta da bobina pode-se detectar diversos tipos de falhas e defeitos no material que está sendo inspecionado.

Já os sensores diferenciais utilizam, normalmente, duas bobinas, uma oposta a outra. Quando ambas estão sobre uma superfície livre de falhas não há nenhum sinal resultante desta combinação, isto porque as bobinas terão o mesmo valor de impedância. Quando uma das bobinas passa por uma falha enquanto a outra ainda está numa superfície sem falhas, as impedâncias já não são mais as mesmas. Em (Komoda et al. 1990) um sensor diferencial é apresentado, utilizando um circuito em ponte e um circuito eletrônico capaz de identificar o desbalanço na ponte ocasionado pela diferença de impedância das bobinas, figura 2.9.

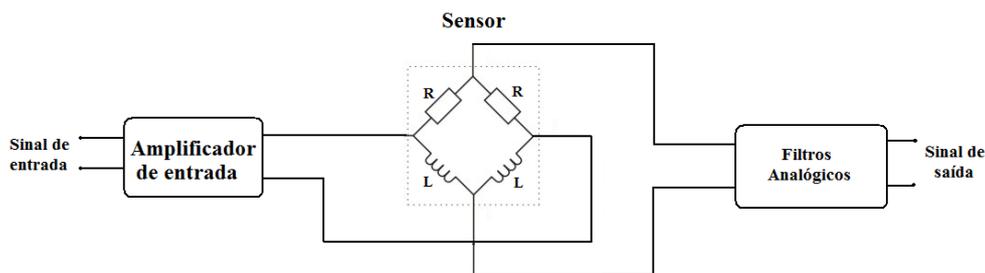


FIGURA 2.9: Circuito Utilizados em sensores que utilizam o método de corrente parasita

A corrente parasita produzida pelo cabo depende de uma série de fatores, tais como: a frequência de excitação, o tipo de condutor, condutividade, permeabilidade, as falhas no cabo e a dimensão e a impedância das bobinas utilizadas. Entre esses, fatores as escolhas das dimensões das bobinas e da frequência de excitação são consideradas as mais importantes. Em (Komoda et al. 1990) foi feito um estudo onde o autor define as características de dimensão da bobina e frequência de excitação de maneira a se obter a melhor sensibilidade possível.

Algumas das vantagens da inspeção por corrente parasita são:

- Sensível a pequenas falhas.
- Detecta falhas na superfície e abaixo dela.
- Equipamentos portáteis.
- Os sensores não necessitam encostar na superfície inspecionada.

As limitações encontradas ao se utilizar esse tipo de inspeção são:

- Só materiais magnéticos podem ser inspecionados.
- A superfície precisa estar acessível.
- Rugosidades na superfície podem interferir no resultado.
- Necessidade de um padrão de referência.
- Profundidade de penetração limitada.

A inspeção por corrente parasita é bastante difundida, principalmente na inspeção de tubos metálicos, superfícies de aviões, tanques etc.

Para que esse tipo de inspeção possa ser realizado em linhas de transmissão de energia elétrica a ponta de prova deve ficar bem próxima à superfície do cabo e percorrê-la com velocidade constante, por isso é necessário um equipamento que carregue a ponta de prova ao longo da linha.

Para a aplicação desse método alguns robôs vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos, podemos citar como exemplos o caso dos robôs desenvolvidos em (Sawada et al. 1991) e (Komoda et al. 1990).

2.3 Desgaste de juntas e grampos

Juntas e grampos são componentes críticos de linhas de transmissão. Eles devem ser capazes de suportar toda a tensão elétrica do condutor com qualquer corrente e a qualquer temperatura, além de suportar o esforço mecânico devido ao peso do cabo.

Juntas mal instaladas ou mal projetadas podem causar pouco contato entre os cabos, aumentando a resistência elétrica e aquecendo-a além do recomendado. Esse aquecimento pode danificar a junta e causar sérios problemas. Outros fatores que acarretam em aumento da resistência elétrica são corrosão da junta e o desgaste do cabo devido à vibração resultante da ação do vento.

Atualmente existem dois métodos para verificar as condições das juntas, o método de termografia e o método onde se mede a resistência da junta através de um equipamento específico (Comte & Lacasse 2003).

2.3.1 Inspeção pelo método pela medição da resistência

Alguns artigos descrevem o método pela medição da resistência elétrica como o melhor método para avaliação das condições das juntas, como é o caso de (Comte & Lacasse 2003) e (Snell & Renowden 2000). A condição de uma junta é dada pela razão da resistência elétrica da junta e a resistência elétrica de um mesmo comprimento do condutor no qual ela está conectada. Uma junta adequada deve ter a sua resistência entre 30% e 80% do valor da resistência do condutor com mesmo comprimento. Isto significa que a razão entre as duas resistências deve ficar entre 0,3 e 0,8. Razões acima de 0,8 indicam uma degradação na junta, razões acima de 1,2 indicam sérios problemas na junta, causando super aquecimento da mesma. Segundo estudo apresentado em (Snell & Renowden 2000), empresas operadores de linhas de transmissão sugerem as seguintes classificações para as condições das juntas:

- até 1,1 a junta pode continuar sendo utilizada.
- até 1,5 a junta deve ser inspecionada outras vezes para acompanhamento.
- a partir de 1,5 deve ser programado uma troca.
- Acima de 2,0 a junta deve ser trocada o mais rápido possível.

Para fazer esse tipo de medição existem no mercado equipamentos que calculam a resistência elétrica da junta medindo a corrente alternada que passa pela junta e a queda de tensão devido a resistência do segmento de linha inspecionado (OhmStik 2006).

Apesar de ter sua eficácia comprovada, a desvantagem desse método é a dificuldade de acesso às juntas. O equipamento pode ser utilizado com um bastão, ou no caso de juntas que se localizam no meio do vão entre as torres, um helicóptero é utilizado para que se consiga ter acesso à junta.

Para facilitar a inspeção e se ter acesso às juntas que se localizam no meio do vão de maneira mais fácil e menos onerosa, existe a possibilidade de se utilizar robôs que carreguem o sensor até o local da junta a ser inspecionada.

Em (Montambault & Pouliot 2003) tem-se um exemplo de um robô que utiliza esse equipamento para medir a resistência elétrica das juntas localizadas em pontos de difícil acesso. O robô utiliza uma câmera conectada à base através de um transmissor

sem fio, dessa maneira o operador consegue visualizar o valor da resistência medido pelo sensor mostrado no display do sensor.

2.3.2 Inspeção pelo método da termografia

Nesse método são geradas imagens infravermelhas das juntas. Essas imagens são processadas de maneira a se tentar identificar locais nas juntas onde a temperatura está acima do normal, o que pode indicar uma possível falha. Assim como no método anterior, a mesma relação entre os valores da temperatura é feita entre a temperatura da junta e a temperatura do condutor adjacente a junta. Uma junta adequada deve ter a sua temperatura menor que temperatura do cabo condutor.

Para fazer esse tipo de inspeção, é necessário câmeras especiais capazes de capturar imagens infravermelho que, posteriormente, são analisadas em softwares adequados. Existe a possibilidade de se adaptar uma câmera desse tipo em um robô, para que as imagens sejam geradas a uma distância menor das juntas. Até o final do ano de 2007, não foi encontrado na literatura nenhum robô equipado com esse tipo de câmera.

O grande problema desse método é que, assim como no método que utiliza esse tipo de imagem para detectar a corrosão no cabo, as condições climáticas atrapalham a sua eficácia. A ação do vento resfriando a junta, a ação do sol aquecendo-a ou uma série de outros fatores podem influenciar no resultado.

2.4 Inspeção visual das condições gerais da linha

A inspeção visual é utilizada para determinar as condições de vários fatores presentes em uma linha de transmissão, tais como:

- Isoladores
- Espaçadores
- Torres
- Vegetação no entorno da linha
- Assoreamento da torre

Normalmente a inspeção visual é feita utilizando uma aeronave, tripulada ou não, que sobrevoa a linha e colhe imagens através de câmeras de alta definição, que posteriormente são analisadas em buscas de possíveis falhas. Em alguns lugares, ela é feita por funcionários que percorrem os cabos à procura de pontos de desgaste. Esse tipo de inspeção vem sendo substituída por métodos mais práticos e seguros, pois além de ser uma inspeção lenta ela oferece muitos riscos ao funcionário.

Atualmente, alguns robôs que se deslocam nos cabos guarda foram desenvolvidos para esse tipo de inspeção, como é o caso de (Ventrela et al. 2003) e (Zhou et al. 2005). Os robôs são equipados com câmeras do tipo PTZ (Pan Tilt Zoom), com câmeras IP e com câmeras CCD. Dessa forma ele é capaz de captar imagens de alta definição de toda a linha a uma pequena distância, principalmente dos cabos condutores e das cadeias de isoladores. Essas imagens são transmitidas para uma base onde um operador faz a análise das imagens em busca de possíveis falhas.

2.5 Instalação de esferas de sinalização

Grandes linhas de transmissão, em geral, são extensas, altas e têm grandes vãos, fazendo com que se torne um perigo para a aviação. Para tentar evitar acidentes, países no mundo todo desenvolveram leis que regulamentam a instalação de sinalizações nas linhas de transmissão, de maneira que possam ser localizadas por aeronaves. No Brasil, a norma que regulamenta esse tipo de sinalização é a norma NBR 7276 de 1982.

A sinalização é feita com esferas de cor laranja que são instaladas principalmente em linhas que passem perto de aeroportos ou sobre estradas, rios e vales. Essas esferas são afixadas nos cabos guarda formando sempre um triângulo, possibilitando assim uma visão das esferas em qualquer direção que a aeronave estiver. A instalação desta sinalização sempre foi considerada uma operação arriscada, atualmente as técnicas mais comuns para esse tipo de serviço são: instalação feita por um funcionário andando no cabo ou a instalação através de um helicóptero (figura 2.10).

No Brasil, pesquisadores de Furnas Centrais Elétricas S/A desenvolveram um robô capaz de instalar essas esferas de sinalização (figura 2.11). O robô semi-autônomo carrega a esfera até o ponto onde ela deve ser instalada e então, com o auxílio de uma parafusadeira a esfera é presa ao cabo. Esse mesmo processo pode ser feito para a

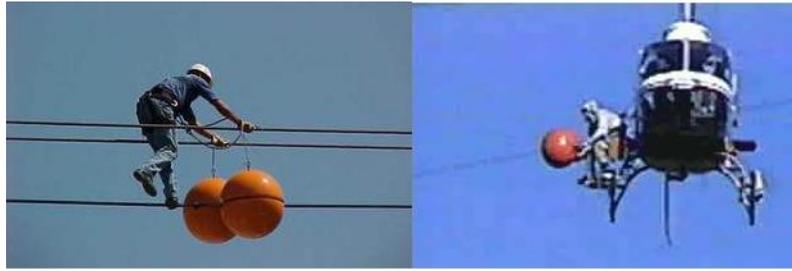


FIGURA 2.10: Métodos mais utilizados para instalação de esferas de sinalização em linhas de transmissão

retirada das esferas.

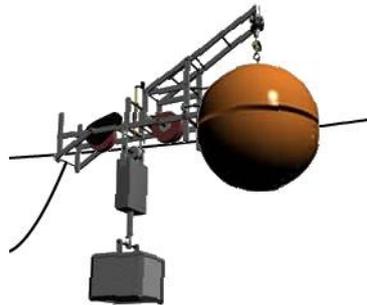


FIGURA 2.11: Robô de instalação de esferas de sinalização em linhas de transmissão

A instalação de esferas de sinalização através de robôs oferece grandes vantagens para as empresas: rapidez de instalação, baixo custo, não ter a necessidade de se desligar a linha e a redução dos riscos aos funcionários envolvidos na instalação. Na literatura existem outros casos bem sucedidos de robôs que fazem esse tipo de serviço (Campos et al. 2003).

2.6 Conclusão

Neste capítulo mostrou-se as possibilidades de tarefas que podem ser realizadas por sistemas robóticos na inspeção e na manutenção de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Todas as tarefas apresentadas neste capítulo são de grande interesse das empresas que controlam as linhas de transmissão de energia elétrica.

Os capítulos seguintes trazem informações necessárias para o desenvolvimento de um projeto de sistema robótico capaz de realizar uma ou mais tarefas aqui apresentadas, dando ênfase na inspeção de cabos condutores.

Capítulo 3

Sistemas Robóticos Utilizados para Inspeção em Linhas de Transmissão

Este capítulo irá tratar dos principais fatores que devem ser considerados dentro do projeto do sistema mecânico de um robô para inspeção em linhas de transmissão.

Em (Moscatto, de Souza, Santos, Filho, Ferreira & Ventrella 2003), foi colocado que o desenvolvimento do sistema mecânico de um robô para inspeção em linhas de transmissão deve ter como principais pontos o sistema de locomoção que será utilizado e a influência do vento no equilíbrio do robô, o que influenciará diretamente sua forma geométrica.

No projeto apresentado em (Li, Lijin & Hongguang 2004), é ressaltado também, a importância do material utilizado para a confecção do compartimento que abrigará a eletrônica embarcada do robô. Essa importância deve-se à necessidade de se construir uma blindagem para proteger os circuitos eletrônicos de interferências eletromagnéticas que possam causar algum mal funcionamento do sistema.

A partir disso, pelo menos três pontos importantes devem ser considerados no projeto do sistema mecânico de robôs para inspeção em linhas de transmissão:

- Sistema de locomoção
- Efeito do vento
- Blindagem eletromagnética

Esses pontos são apresentados a seguir.

3.1 Sistema de locomoção

Algumas configurações mecânicas dos sistemas de locomoção para robôs que operam em linhas de transmissão já foram propostas na literatura. Em (Moscato et al. 2003) elas são divididas em quatro grupos e podem ser vistas na figura 3.1.

Algumas configurações foram desenvolvidas com o intuito de se conseguir superar os obstáculos encontrados ao longo de uma linha de transmissão. Em (Montambault & Pouliot 2006), é feita uma classificação dos principais obstáculos encontrados, de acordo com o seu comprimento e essa classificação está apresentada na tabela 3.1.

Tipo de obstáculo	Comprimento em metros
Amortecedores	0.10
Cadeia de isoladores em suspensão	0.20 - 0.25
Cadeia de isoladores em suspensão em V	0.60 - 0.70
Esferas de sinalização	0.75
Cadeia de isoladores em amarração	1.35 - 2.00

TABELA 3.1: Classificação dos obstáculos

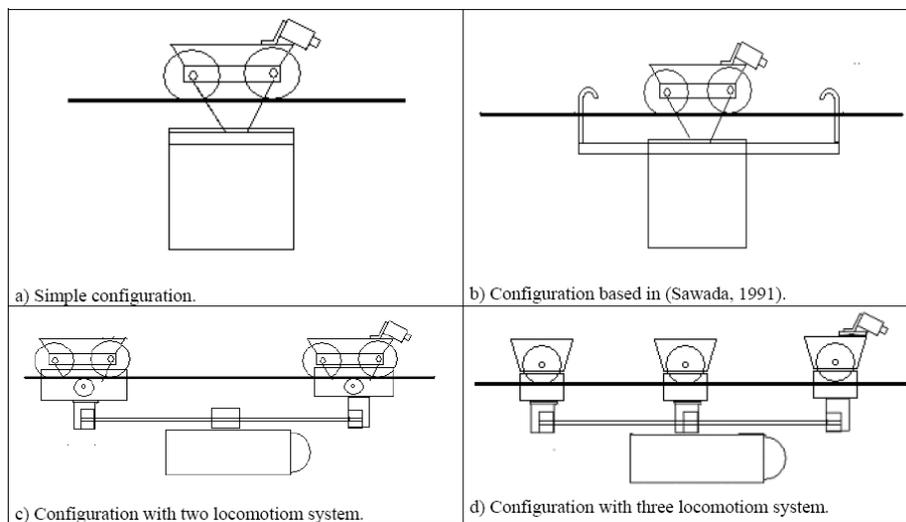


FIGURA 3.1: Diferentes configurações dos sistemas de locomoção utilizados em robôs para inspeção em linhas de transmissão (Moscato et al. 2003)

3.1.1 Configuração simples

Essa configuração é eficiente para a realização de tarefas em um vão de linha de cada vez. A figura 3.2 mostra um exemplo de configuração desse tipo. Ela é mais apro-

priada para linhas que não possuam obstáculos nos cabos analisados que impeçam o deslocamento do robô, sendo capaz de atender uma quantidade razoável de linhas de transmissão.

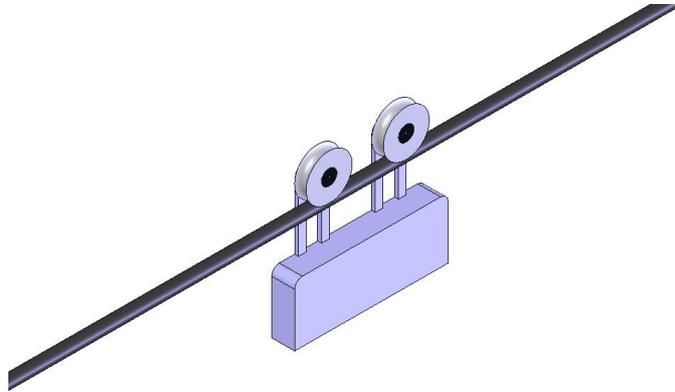


FIGURA 3.2: Configuração simples com duas polias utilizadas em robôs para inspeção em linhas de transmissão

Alguns robôs desenvolvidos com essa estrutura foram empregados em aplicações como:

- instalação de esferas de sinalização em cabos guarda (Campos et al. 2003),
- inspeção de cabos condutores com sensores de corrosão por corrente de fuga (Sawada et al. 1991),
- degelo dos cabos guarda e medição da resistência elétrica das juntas de cabos condutores (Montambault & Pouliot 2003).

Esta última aplicação usava uma variação da arquitetura da figura 3.2 , empregando três polias.

No caso de linhas que tenham peças colocados nos cabos para alguma finalidade, esse tipo de arquitetura não consegue ser utilizado em toda a extensão do vão entre torres de maneira autônoma, requerendo a intervenção de um operador humano para transpor os obstáculos existentes.

3.1.2 Configuração simples com hastes

Essa configuração utiliza hastes que se prendem ao cabo para a transposição de obstáculos. Exemplos de robôs que utilizam esta configuração são os propostos por (Sawada et al.

1991) e (Montambault & Pouliot 2006).

- (Sawada et al. 1991) desenvolveu um sistema com duas polias e uma haste retrátil em forma de arco (figura 3.3). Ao se aproximar do obstáculo, ele abre a haste, prendendo-a em um ponto anterior e outro posterior ao obstáculo, e passa a se locomover pela haste. Depois de ultrapassado o empecilho, ele retorna ao cabo. Até a data de sua publicação, foram realizadas algumas simulações computacionais dos algoritmos de controle, mas nenhum teste prático foi apresentado em (Sawada et al. 1991).

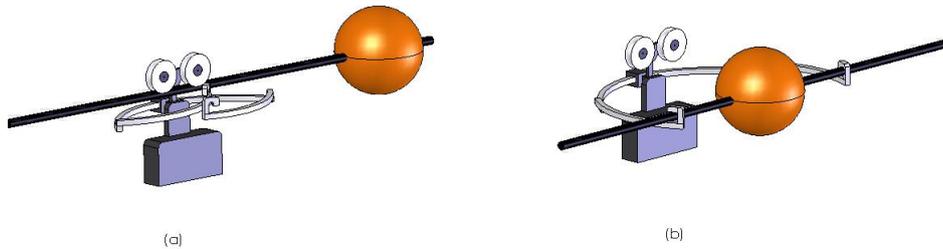


FIGURA 3.3: Funcionamento da configuração com hastes, para transposição de obstáculos, desenvolvida por (Sawada et al. 1991): (a) Aproximação do obstáculo; (b) Transposição do obstáculo

- (Montambault & Pouliot 2006) desenvolveu o único robô capaz de transpor obstáculo que pôde ser encontrado na literatura até o final do ano de 2007, e que tenha sido testado em linhas vivas. Ele desenvolveu um sistema semelhante ao de (Sawada et al. 1991), no momento em que o robô se aproxima do obstáculo uma haste presa ao robô se desloca para frente e se prende ao cabo logo após o obstáculo. O robô então retrai as roldanas e passa a se deslocar pela haste; após passar pelo obstáculo as roldanas são posicionadas no cabo novamente. Até o momento de sua publicação o robô era capaz de transpor obstáculo com um comprimento de $0,75m$. A figura 3.4 ilustra esse procedimento.

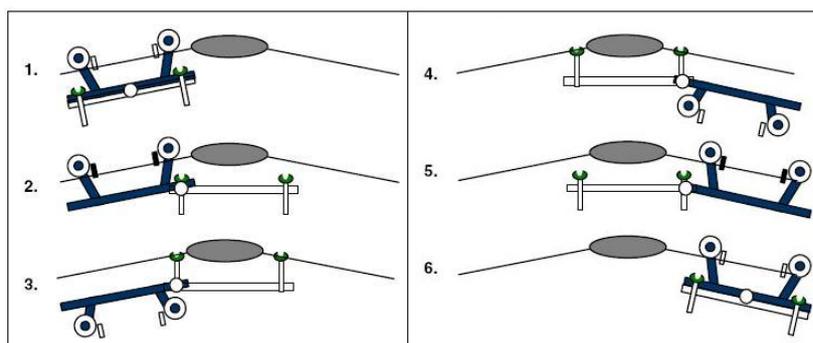


FIGURA 3.4: Funcionamento da configuração com hastes, para transposição de obstáculos, desenvolvida em (Montambault 2006)

3.1.3 Configuração com dois sistemas de locomoção

Esta configuração consiste em dois sistemas de locomoção, onde cada um dos sistemas possui três rodas. Quando o primeiro sistema de locomoção encontra um obstáculo, o corpo do robô se move para trás; o primeiro sistema de locomoção se desacopla do cabo e o robô anda para frente até o primeiro sistema de locomoção ultrapassar o obstáculo. O primeiro sistema de locomoção é, então, acoplado ao cabo novamente e em seguida o corpo do robô se movimenta para frente; por último, o segundo sistema de locomoção se desacopla e também transpõe o obstáculo. Todo este procedimento é ilustrado na figura 3.5.

Esta configuração é proposta em (Moscatto et al. 2003), mas não foi encontrado registro de que tenha sido implementada.

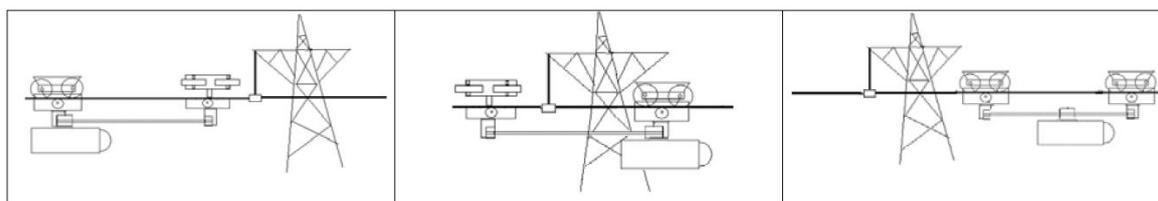


FIGURA 3.5: Funcionamento da configuração com dois sistemas de locomoção utilizada em robôs para inspeção de linhas de transmissão

3.1.4 Configuração com três sistemas de locomoção

Esta configuração foi proposta em (Ventrela et al. 2003) e (Zhou et al. 2005) com a intenção de superar obstáculos e pode ser considerada equivalente a configuração com

dois sistemas de locomoção.

Por utilizar três sistemas de locomoção, esta configuração consegue ultrapassar obstáculos sem a necessidade de movimentar o corpo do robô. Para que isso possa acontecer, deve-se ultrapassar um sistema de locomoção de cada vez, ficando assim o robô apoiado sempre em pelo menos dois sistemas. A configuração proposta por (Ventrela et al. 2003) pode ser observada na figura 3.6.



FIGURA 3.6: Configuração com três sistemas de locomoção utilizada em robôs para inspeção em linhas de transmissão (Ventrela et al. 2003)

O robô desenvolvido por (Zhou et al. 2005) é um pouco diferente daquele desenvolvido por (Ventrela et al. 2003). Ele também utiliza três sistemas de locomoção, mas esses sistemas estão em 3 hastes articuladas que são coordenadas por um sistema de controle para transpor os obstáculos. Ao todo são necessários 16 motores para o seu funcionamento. A complexidade maior dessa arquitetura exige um algoritmo de controle mais elaborado para superar as obstruções. Na figura 3.7, pode-se observar o robô desenvolvido por (Zhou et al. 2005).

Nos exemplos empregando configurações que possibilitam transpor obstáculos sem auxílio de um operador apresentados, a tarefa a ser executada é somente a inspeção visual. Nesses exemplos, não existe nenhum sensor acoplado ao cabo. A utilização de sensores para inspeção das condições do cabo significaria um aumento significativo na complexidade da estrutura e do algoritmo de controle.

Apresentadas as configurações mecânicas normalmente utilizadas, passou-se ao estudo do efeito do vento no equilíbrio do robô.

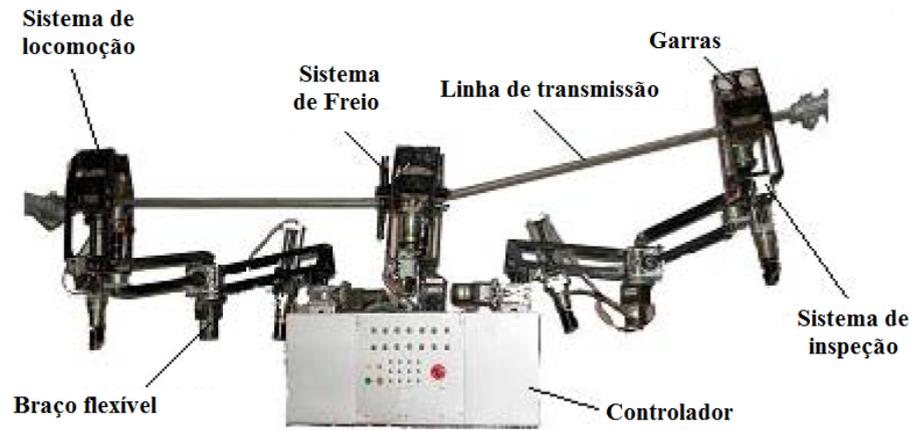


FIGURA 3.7: Robô para inspeção de linhas de transmissão desenvolvido em (Zhou et al. 2005), com três sistemas de locomoção

3.2 Efeito do vento no equilíbrio de robôs em linhas de transmissão

Um robô que realiza alguma tarefa apoiado em um cabo de linha de transmissão estará sujeito à ação do vento. Essa ação, dependendo das características do robô e da força do vento, pode causar um movimento rotacional do robô em relação ao eixo do cabo condutor, criando algum risco a sua operação.

Um corpo imerso em uma corrente de vento é submetido a duas forças, a força de arrasto $F_d(t)$, paralela à direção do vento, e uma força de sustentação $F_l(t)$, perpendicular à direção do vento. Essas forças são dadas por:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho S V^2 \quad (3.1)$$

$$F_l = \frac{1}{2} C_l \rho S V^2 \quad (3.2)$$

- C_d, C_l - Coeficientes de arrasto e de sustentação, respectivamente
- ρ - densidade do ar.
- S - área da seção transversal à direção do vento.
- V - velocidade do vento

No caso em estudo, tanto o robô quanto o cabo onde ele está apoiado estão submetidos à ação do vento. A figura 3.8 mostra o diagrama de corpo livre do sistema em questão. Nesta figura, estão representadas as forças que interagem no sistema e os deslocamentos, vertical e horizontal, que ocorrem.

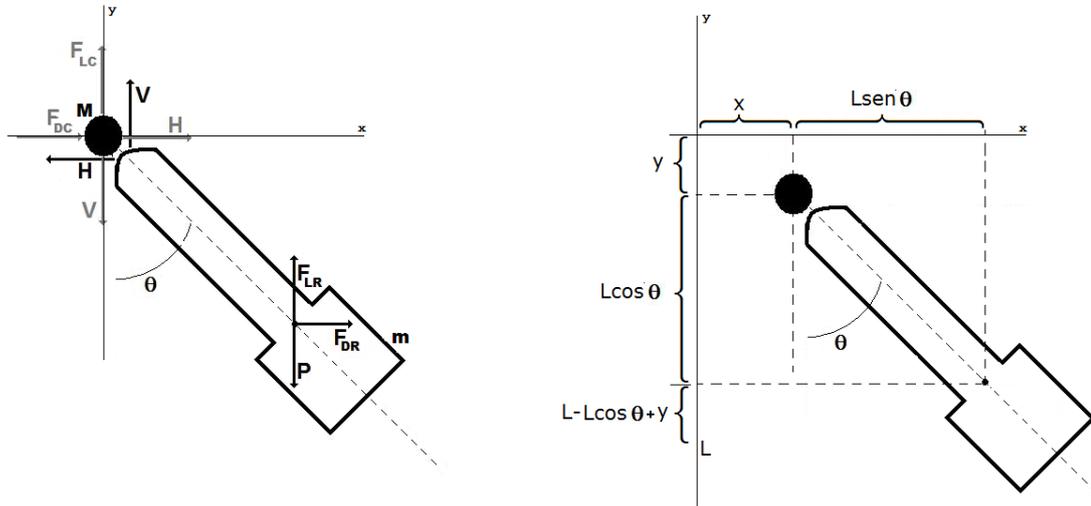


FIGURA 3.8: Diagrama de forças do robô apoiado no cabo

Onde:

- F_{lc} - força de sustentação feita pelo vento no cabo.
- F_{dc} - força de arrasto feita pelo vento no cabo.
- F_{lr} - força de sustentação feita pelo vento no robô.
- F_{dr} - força de arrasto feita pelo vento no robô.
- P - peso do robô
- V - componente vertical da força exercida pelo cabo no robô e pelo robô no cabo.
- H - componente horizontal da força exercida pelo cabo no robô e pelo robô no cabo.
- θ - ângulo entre o eixo y e o eixo do robô.
- M - massa do cabo.

- m - massa do robô.
- L - Distância entre o centro de gravidade do robô e o eixo do cabo.
- y - deslocamento do centro de gravidade do cabo no eixo y.
- x - deslocamento do centro de gravidade do cabo no eixo x.
- $L + y - L\cos\theta$ - deslocamento do centro de gravidade do robô no eixo y.
- $x + L\sin\theta$ - deslocamento do centro de gravidade do robô no eixo x.

O movimento de rotação em torno do centro de gravidade do robô pode ser descrito por:

$$I\ddot{\theta} = -VL\sin\theta + HL\cos\theta \quad (3.3)$$

onde I é o momento de inércia do robô em relação ao seu centro de gravidade e L é a distância do centro de gravidade do robô ao ponto de apoio.

As equações a seguir descrevem os movimentos vertical e horizontal do cabo.

$$M\frac{d^2y}{dt^2} = F_{lc} - V \quad (3.4)$$

$$M\frac{d^2x}{dt^2} = F_{dc} + H \quad (3.5)$$

O movimento horizontal do centro de gravidade do robô é dado por:

$$m\frac{d^2(x + L\sin\theta)}{dt^2} = F_{dr} - H \quad (3.6)$$

$$H = -m\frac{d^2x}{dt^2} - mL\frac{d^2\sin\theta}{dt^2} + F_{dr} \quad (3.7)$$

O movimento vertical do centro de gravidade do robô é dado por:

$$m\frac{d^2(y + L - L\cos\theta)}{dt^2} = V + F_{lr} - mg \quad (3.8)$$

$$V = m\frac{d^2y}{dt^2} - mL\frac{d^2\cos\theta}{dt^2} - F_{lr} + mg \quad (3.9)$$

Substituindo 3.4 em 3.9 e 3.5 em 3.7 chega-se a:

$$H = \frac{-mF_{dc}}{m+M} - \frac{MmL \frac{d^2 \text{sen}\theta}{dt^2}}{m+M} + \frac{MF_{dr}}{m+M} \quad (3.10)$$

$$V = \frac{mF_{lc}}{M+m} - \frac{MmL \frac{d^2 \text{cos}\theta}{dt^2}}{M+m} - \frac{MF_{lr}}{M+m} + \frac{Mmg}{M+m} \quad (3.11)$$

Sabendo que o peso do robô irá permanecer perto de $30kg$ e que o peso de um cabo condutor é próximo de $1200kg/km$, é possível considerar $M \gg m$, $\frac{M}{M+m} \approx 1$ e que $\frac{m}{M+m} \approx 0$, e sabendo que,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \text{cos}\theta}{dt^2} &= -\ddot{\theta} \text{sen}\theta - \dot{\theta}^2 \text{cos}\theta \\ \frac{d^2 \text{sen}\theta}{dt^2} &= \ddot{\theta} \text{cos}\theta - \dot{\theta}^2 \text{sen}\theta \end{aligned}$$

pode-se reescrever (3.3) da seguinte forma:

$$(I + mL^2)\ddot{\theta} = -mgL \text{sen}\theta + F_{lr}L \text{sen}\theta + F_{dr}L \text{cos}\theta \quad (3.12)$$

3.2.1 Simulações do efeito da ação do vento

De acordo com o que é apresentado em (Moran, Shapiro, Munson & DeWitt 2002) corpos que permitem um escoamento simétrico do fluido têm coeficientes de sustentação, C_l , praticamente iguais à zero. Com isso pode-se desconsiderar os efeitos da força F_{lr} . Considerando então $F_{lr} \approx 0$ e que F_{dr} é dada por:

$$F_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho S V^2 (1 + 0,2 \cdot \text{sen}(\omega t)) \quad (3.13)$$

onde o termo $1 + 0,2 \cdot \text{sen}(\omega t)$ representa a oscilação da velocidade do vento, segundo o estudo apresentado em (Blessmann 1998), essa oscilação pode ser considerada entre $0,1Hz$ e $0,5Hz$.

Assim, (3.12) pode ser aproximada por (3.14), que foi utilizada nas simulação realizadas.

$$(I + mL^2)\ddot{\theta} + mgL\sin\theta = L\frac{1}{2}C_d\rho SV^2(1 + 0,2 \cdot \sin\omega t)\cos\theta \quad (3.14)$$

Dois formatos de robôs foram considerados nas simulações e para cada formato utilizou-se um valor de coeficiente de arrasto específico, cujo os valores foram retirados de (Kreith & Berger 1999). Para o robô com formato de um paralelepípedo utilizou-se $C_d = 1,05$ (figura 3.10), para formatos cilíndricos utilizou-se $C_d = 0,47$ (figura 3.9). O momento de inércia de um paralelepípedo é dado por:

$$\frac{m \cdot (a^2 + c^2)}{12} \quad (3.15)$$

e o momento de inércia de um cilindro é dado por:

$$\frac{m \cdot r^2}{2} \quad (3.16)$$

Utilizando essas equações, foram realizadas simulações variando-se a área de cada modelo do robô, a distância entre o centro de gravidade e o cabo e a velocidade do vento. Dessa forma é esperado identificar o comportamento do robô em diferentes situações.

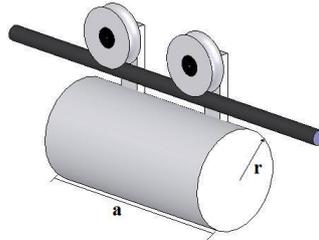


FIGURA 3.9: Modelo de robô utilizado na terceira simulação da influência do vento no equilíbrio do robô

3.2.1.1 Simulações variando a área da seção transversal ao vento

Nessas primeiras simulações será observado o comportamento de cada modelo de robô variando-se a área da seção transversal à direção do vento. A velocidade média do

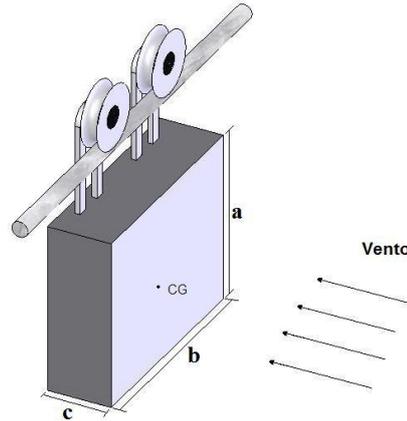


FIGURA 3.10: Modelo do robô com corpo retangular utilizado nas simulações da influência do vento no robô

vento foi retirada do Atlas Eólico Brasileiro, que indica que as velocidades médias no Brasil ficam entre $5m/s$ e $10m/s$. Nos casos a seguir será utilizada uma velocidade média de $10m/s$.

A tabela 3.2 traz os resultados da variação total do ângulo θ .

Área	Modelo Retangular	Modelo Cilíndrico
$0,08m^2$	$2,4^\circ$	$1,1^\circ$
$0,16m^2$	$4,8^\circ$	$2,3^\circ$
$0,24m^2$	$7,1^\circ$	$3,2^\circ$
$0,32m^2$	$10,9^\circ$	$6,5^\circ$

TABELA 3.2: Amplitudes pico a pico do ângulo θ obtidos nas simulações variando a área da seção transversal à direção do vento

Os gráficos da figura 3.11 apresentam a variação de θ obtida nas simulações com áreas iguais a $0,08m^2$ e $0,24m^2$.

3.2.1.2 Simulações variando a distância entre o centro de gravidade e o cabo condutor

Esta subseção apresenta as simulações realizadas variando a distância entre o centro de gravidade do robô e o cabo condutor (L). Para esta simulação será utilizado os dois modelos de robôs descritos anteriormente com as seguintes dimensões:

Os gráficos da figura 3.12 mostram a variação do ângulo θ para $L = 0,20m, L = 0,40m$ e $L = 0,80m$.

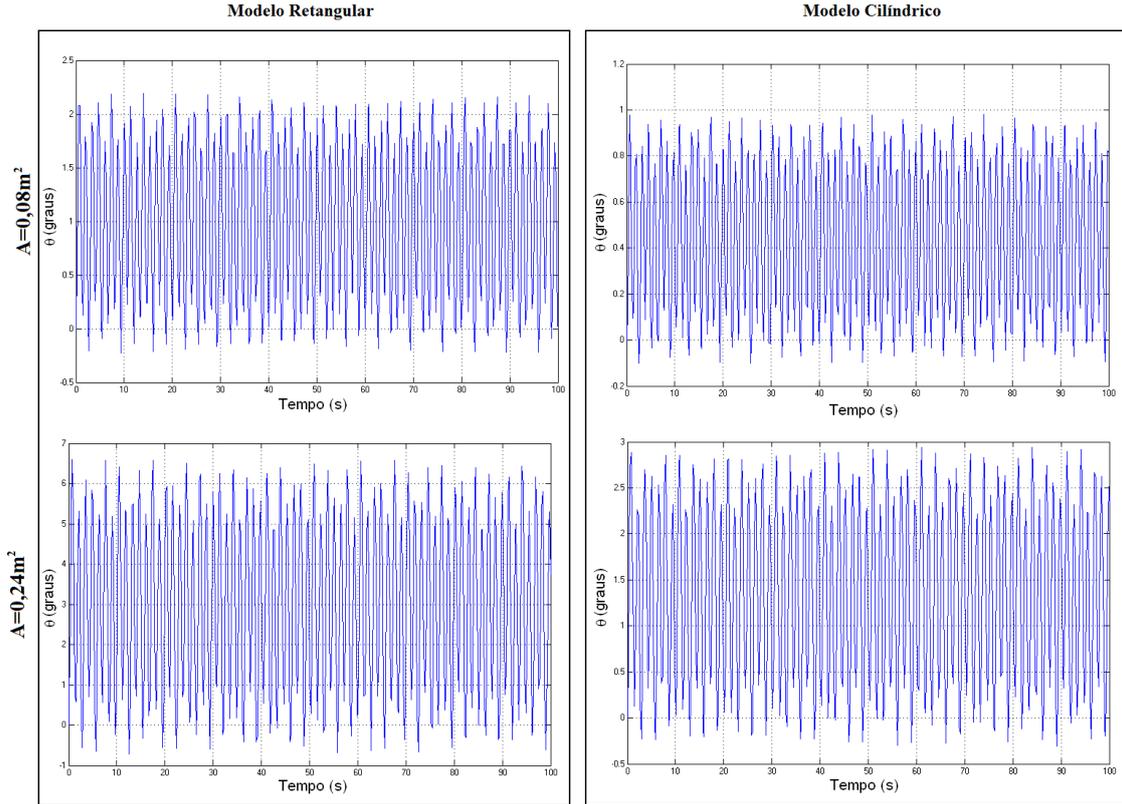


FIGURA 3.11: Resultados obtidos nas simulações variando a área da seção transversal à direção do vento

Modelo Retangular	Modelo Cilíndrico
$a = 0,40m$	$a = 0,40m$
$b = 0,40m$	$r = 0,20m$
$c = 0,20m$	

TABELA 3.3: Dimensões dos modelos de robôs utilizados nas simulações variando-se L

As simulações indicam que a variação de L não influencia a variação de θ até que L se aproxime de $0.80m$. Isto ocorre porque aumentando o valor de L diminui-se o valor da frequência de oscilação harmônica do robô.

Para calcular a frequência harmônica em função de L será utilizado o modelo linear, pois as oscilações não ultrapassaram o valor de 20° . Nesse modelo, considera-se $\sin\theta = \theta$ e $\cos\theta = 1$. A frequência de oscilação harmônica é determinada pelas propriedades do sistema, e pode ser calculada por:

$$(I + mL^2)\ddot{\theta} + mgL\theta = 0 \quad (3.17)$$

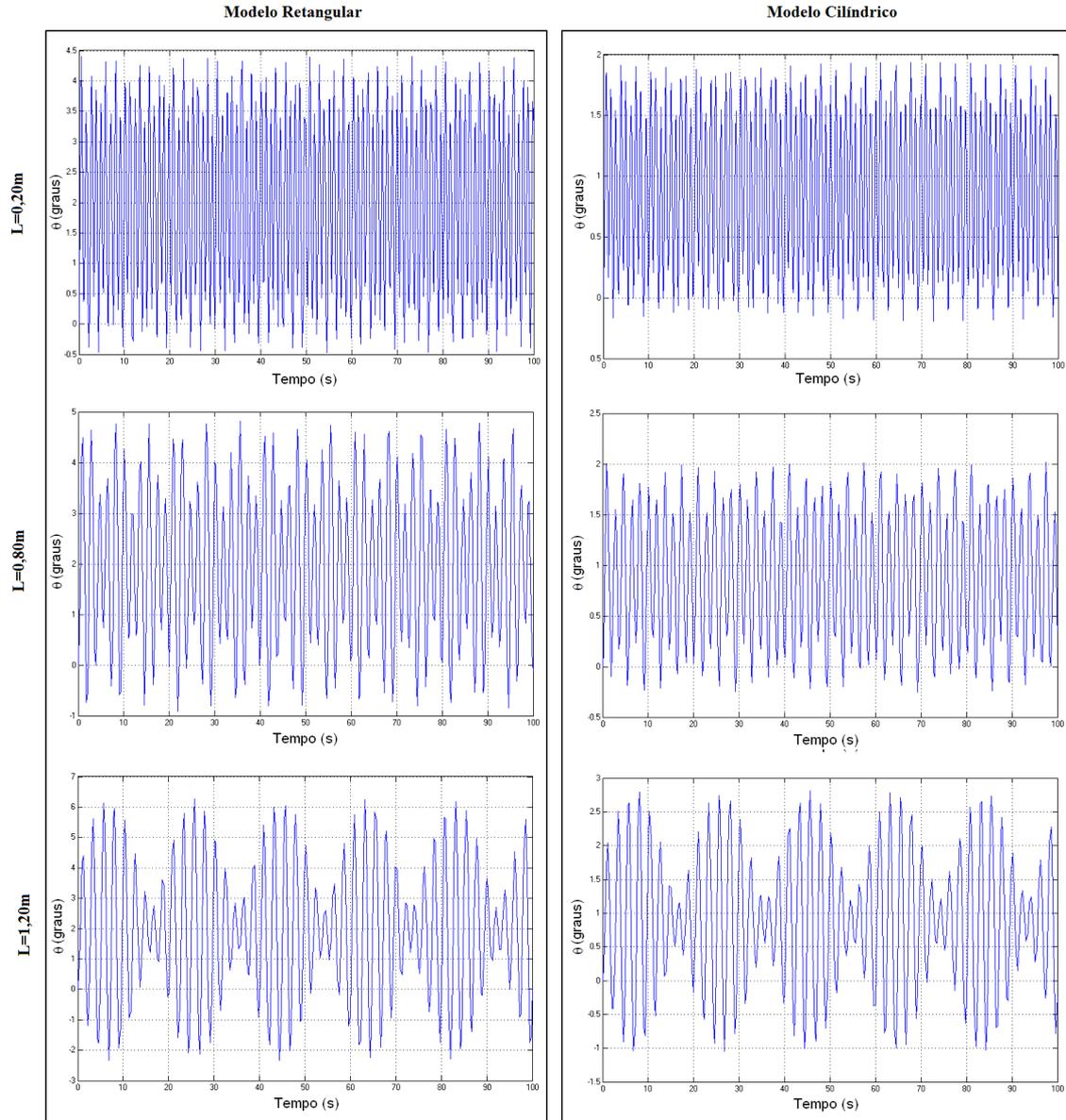


FIGURA 3.12: Resultados obtidos nas simulações variando-se o comprimento L

Resolvendo esta equação diferencial tem-se:

$$\theta = -\frac{mgL}{I + mL^2} \cos\left(\sqrt{\frac{mgL}{I + mL^2}}t + \gamma\right) \quad (3.18)$$

Assim, a frequência harmônica é dada por:

$$f_n = \frac{\sqrt{\frac{mgL}{I + mL^2}}}{2\pi} \quad (3.19)$$

Os gráficos da figura 3.13 apresentam a relação entre a frequência harmônica e o

comprimento L . É possível observar que à medida que aumenta-se o valor de L a frequência natural do robô diminui, se aproximando dos valores de oscilação do vento.

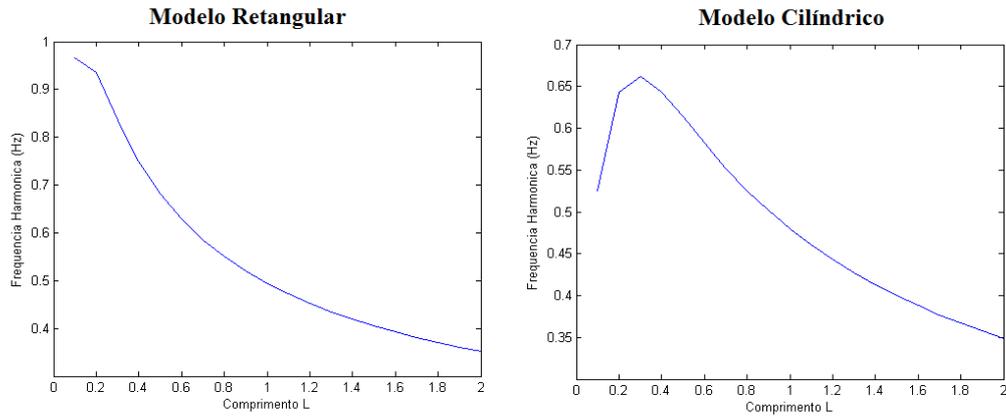


FIGURA 3.13: Relação entre o comprimento L e a frequência harmônica do robô

3.2.1.3 Simulações variando a velocidade média do vento

Para as simulações variando a velocidade do vento será utilizado os dois modelos de robô (cilíndrico e retangular) com as seguintes dimensões:

Modelo Retangular	Modelo Cilíndrico
$a = 0,40m$	$a = 0,40m$
$b = 0,40m$	$r = 0,20m$
$c = 0,20m$	
$L = 0,40m$	$L = 0,40m$

TABELA 3.4: Dimensões dos modelos de robôs utilizados nas simulações variando a velocidade do vento

A tabela 3.5 apresenta as variações de θ encontradas em cada simulação. Os gráficos da figura 3.14 apresentam os resultados das simulações com velocidades de vento iguais à $6m/s$, $10m/s$ e $14m/s$.

3.2.2 Conclusões sobre o efeito do vento no robô

A partir de (3.14) e das simulações realizadas, foi possível concluir que os seguintes aspectos devem ser levados em conta no que se refere a ação do vento no robô:

- Quanto menor o coeficiente de arrasto, menor será a variação do ângulo θ . Isto

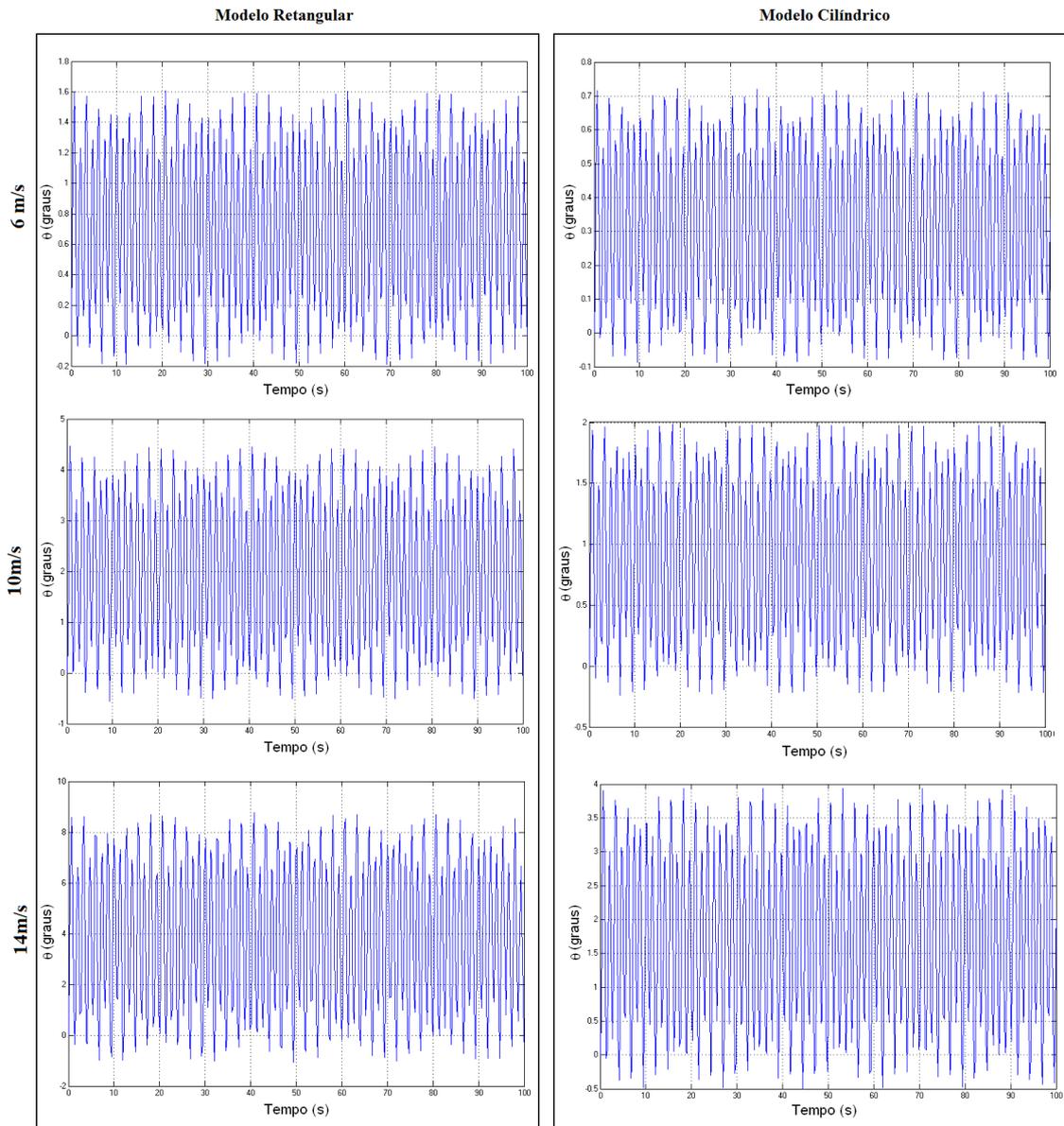


FIGURA 3.14: Resultados das simulações variando a velocidade média do vento

Vento	Modelo Retangular	Modelo Cilíndrico
$6m/s$	$1,3^\circ$	$0,9^\circ$
$8m/s$	$3,7^\circ$	$1,3^\circ$
$10m/s$	$4,8^\circ$	$2,3^\circ$
$12m/s$	$7,1^\circ$	$3,3^\circ$
$14m/s$	$9,2^\circ$	$4,4^\circ$
$16m/s$	$11,8^\circ$	$5,5^\circ$
$20m/s$	20°	$8,9^\circ$
$24m/s$	$27,5^\circ$	$12,2^\circ$

TABELA 3.5: Amplitude pico a pico do ângulo θ obtidas nas simulações variando a velocidade média do vento

porque a força exercida sobre o robô pelo vento está diretamente ligada ao coeficiente de arrasto.

- Deve-se tomar cuidado com a distância entre o centro de gravidade do robô e o cabo, isto porque quanto maior for esta distância, menor será a frequência natural do robô. Assim como o formato do robô também influenciará a frequência natural do robô.

Caso a frequência de oscilação do vento fique muito próxima à frequência natural do robô, o robô entrará em uma oscilação harmônica, fazendo com que a variação do ângulo θ cresça.

De acordo com os exemplos simulados, o valor de L não deve ultrapassar $0,80m$, pois a partir desse valor, a frequência natural do robô começa a se aproximar dos valores das frequências de oscilação da velocidade do vento.

- Deve-se tentar diminuir ao máximo a área da seção transversal à direção do vento, pois a amplitude da força de arrasto também está diretamente ligada à esta área.
- Como era esperado, quanto maior a velocidade do vento, maior será a amplitude da oscilação do ângulo θ , isso ocorre porque a força aplicada no robô é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do vento. Nos exemplos simulados as variações passaram a alcançar 20° a partir de valores de velocidade do vento de $16m/s$.

3.3 Blindagem Eletromagnética

Uma das vantagens que a utilização de robôs em linhas de transmissão pode apresentar é o seu funcionamento com a linha energizada enquanto a tarefa é realizada. Para isso, no entanto, alguns cuidados especiais devem ser tomados, principalmente em relação à interferência eletromagnética nos circuitos eletrônicos do robô, que podem ocasionar erros no seu funcionamento. O robô ficará sujeito a campos eletromagnéticos elevados, que podem causar interferência nos seus circuitos eletrônicos. Essa interferência pode ser atenuada com o emprego de uma blindagem eletromagnética.

O primeiro passo para se projetar uma blindagem eficiente é identificar o tipo de onda eletromagnética que irá incidir sobre ela. Segundo (Paul 2006) os campos eletromagnéticos causadores de interferência podem ser classificados em campos próximos e campos distantes. São considerados campos próximos os casos onde a fonte está a uma distância menor que $\lambda/2\pi$, sendo λ o comprimento de onda. Campos onde a fonte está a uma distância maior são considerados campos distantes.

De forma geral, a impedância de uma onda eletromagnética é a razão entre o campo elétrico e o campo magnético associados a ela, e é dada por:

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad (3.20)$$

onde, Z_w é a impedância da onda eletromagnética, E é o campo elétrico e H é o campo magnético.

No caso de uma onda eletromagnética de um campo distante, sua impedância pode ser aproximada pela impedância característica do meio em que ela se propaga, conforme:

$$Z_f \approx \eta_o = \sqrt{\mu_o/\epsilon_o} = 377\Omega \quad (3.21)$$

onde, Z_f é a impedância de uma onda de um campo distante, η_o é a impedância característica do ar, μ_o é a constante de permeabilidade do ar e ϵ_o é a permissividade do ar.

Para campos distantes, pode-se considerar as ondas eletromagnéticas como ondas planas (Paul 2006), o que facilita muito o cálculo de uma blindagem eficiente. Infe-

lizmente, não é o caso do robô operando em linhas de transmissão a 60Hz, uma vez que $\lambda_{60Hz} = 5000km$. Por isso, deve-se considerar o caso de campos eletromagnéticos próximos (Paul 2006).

No campo próximo, a razão do campo elétrico para o campo magnético não é mais determinada pela impedância característica do meio, e as ondas eletromagnéticas não se comportam mais como ondas planas. Dessa forma, considera-se que campos próximos são estruturas bem mais complexas que campos distantes, dificultando bastante o cálculo da eficiência da blindagem. Para a análise de uma blindagem para campos próximos, deve-se ainda considerar o tipo de campo ao qual a blindagem será submetida, pode-se separar os campos próximos em dois grupos:

- Campos predominantemente magnéticos - São campos gerados por fontes que possuem baixa tensão e alta corrente, também chamados de campos com baixa impedância.
- Campos predominantemente elétricos - São campos gerados por fontes que possuem alta tensão e baixa corrente, também chamados de campos com alta impedância.

Esses fatores são considerados na seção seguinte.

3.3.1 Cálculo da Eficiência da Blindagem

Segundo (Ficchi 1971) a eficiência de uma blindagem (SE) é um valor dado em decibel e pode ser determinada pela razão entre o campo incidente no equipamento sem a blindagem e com a blindagem, conforme:

$$SE = 20\log\left(\frac{Y_o}{Y}\right) \quad (3.22)$$

onde Y representa o campo elétrico (E) ou magnético (H); Y_o é o campo incidente sem blindagem; Y é o campo incidente com blindagem.

O cálculo da eficiência da blindagem pode ser feito também em função das perdas por absorção e perdas por reflexão. Dessa forma, a eficiência de uma blindagem é dada por:

$$SE = A + R + B \quad (3.23)$$

onde o termo A se refere as perdas por absorção, o termo R se refere a perdas por reflexão e o termo B é considerado um fator de correção. Esse fator de correção pode ser desprezado sempre que $A > 15dB$ (Ficchi 1971).

Em campos distantes, considerando que a barreira é feita de um material bom condutor e que a espessura da blindagem (t) é muito maior que a profundidade de penetração da onda (δ), pode-se definir as perdas por reflexão e por absorção através de (Paul 2006):

$$R = 20 \log \left| \frac{(\hat{Z}_w + \hat{\eta})^2}{4\hat{Z}_w\hat{\eta}} \right| \quad (3.24)$$

$$A = 20 \log_{10} e^{t/\delta} \quad (3.25)$$

Como em campos distantes pode-se considerar $Z_w \approx \eta_o$, (3.24) pode ser reescrita por:

$$R = 20 \log \left| \frac{(\eta_o + \hat{\eta})^2}{4\eta_o\hat{\eta}} \right| \quad (3.26)$$

onde $\hat{\eta}$ é a impedância intrínseca da blindagem dada por:

$$\hat{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.27)$$

onde, μ e σ são respectivamente a permeabilidade e a condutividade do material.

Para o cálculo dessas perdas em campos próximos, é proposto em (Paul 2006) fórmulas para se obter os valores de R e de A de forma aproximada, uma vez que os cálculos exatos da eficiência da blindagem para esse tipo de campo são extremamente complexos.

Em campos distantes as componentes E e H variam de acordo com o inverso da distância da fonte ao ponto de interesse (r). Para fazer os cálculos para campos próximos, em (Paul 2006) considera-se que as componentes do campo variam aproximadamente de acordo com $1/r^2$ ou $1/r^3$, como mostra a figura 3.15.

A partir das relações entre as componentes do campo eletromagnético e a distância da fonte ao ponto de interesse, é apresentado em (Paul 2006) valores aproximados para as impedância das ondas predominantemente elétricas ($|\hat{Z}_w|_e$) e predominantemente

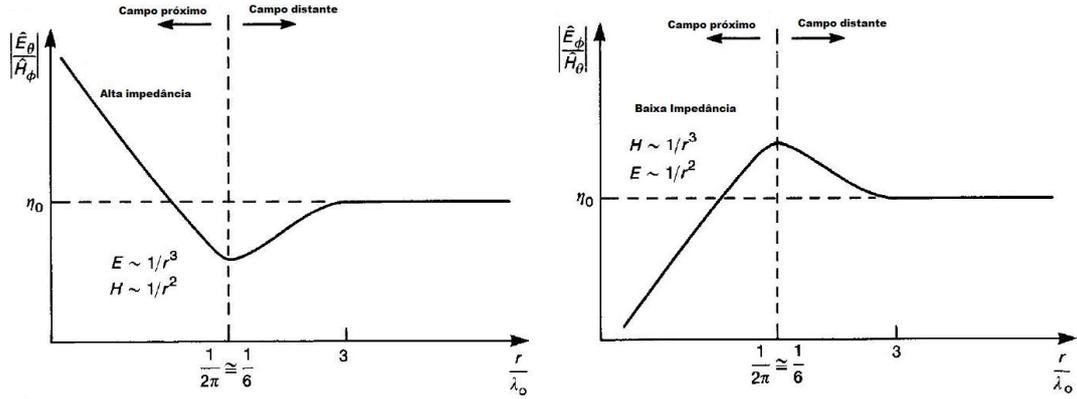


FIGURA 3.15: Impedância de ondas eletromagnéticas em campos próximos (Paul 2006)

magnéticas ($|\hat{Z}_w|_m$), que podem ser calculados através de (3.29) e (3.28) respectivamente.

$$|\hat{Z}_w|_m = 2\pi f \mu_o r = 2369 \frac{r}{\lambda_o} \quad (3.28)$$

$$|\hat{Z}_w|_e = \frac{1}{2\pi f \epsilon_o r} = 60 \frac{\lambda_o}{r} \quad (3.29)$$

Pode-se chegar aos valores aproximados de perdas por absorção e por reflexão substituindo em (3.25) o Z_w calculado em (3.30) e (3.31), obtendo assim:.

- Campos predominantemente magnéticos

$$R_m = 14.57 + 10 \log_{10} \frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \quad (3.30)$$

$$A = 131, 4t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (3.31)$$

- Campos predominantemente elétricos

$$R_e = 322 + 10 \log_{10} \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \quad (3.32)$$

$$A = 131, 4t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (3.33)$$

onde λ_o é o comprimento da onda, r é distância da blindagem à fonte, μ_r é a perme-

abilidade relativa do material, dada por $\mu_r = \mu/\mu_0$, e σ_r é condutividade do material relativa ao cobre, dada por $\sigma_r = \sigma/\sigma_{Cu}$.

Através de (3.30) e (3.31), pode-se observar que a eficiência de uma blindagem por reflexão e por absorção para campos magnéticos diminui a medida que a frequência se aproxima de zero. Por isso blindagem contra campo magnético de baixa frequência é um ponto crítico, uma vez que as perdas por absorção e por reflexão são muito pequenas.

Para conter esse problema, outras técnicas para a blindagem de campos magnéticos em baixas frequências são utilizadas; entre elas, a mais utilizada é o método de desvio do campo magnético, que pode ser visto na figura 3.16. Para que este método funcione é preciso empregar um material ferromagnético com uma permeabilidade relativa muito maior que um, de forma que ele forneça um caminho para o campo magnético, evitando que o campo penetre no interior da blindagem.

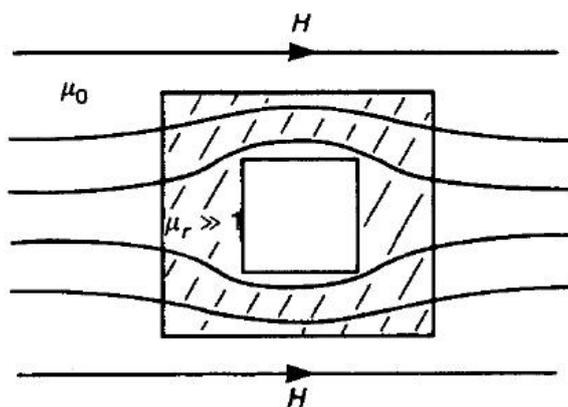


FIGURA 3.16: Método de blindagem desviando o campo magnético

3.3.2 Materiais utilizados para blindagem eletromagnética

Como pôde ser observado na subseção anterior, as perdas por absorção e reflexão de uma blindagem dependem das características de permeabilidade e condutividade do material.

pelos equações (3.30), (3.31), (3.32) e (3.33), observa-se que as perdas por reflexão variam de acordo com a relação σ_r/μ_r , enquanto que as perdas por absorção variam de acordo com a relação $\sigma_r \cdot \mu_r$.

Materiais com valores de σ_r/μ_r mais elevados, como o cobre e a prata, possuem perdas por reflexão elevadas. Já materiais com valores de $\sigma_r \cdot \mu_r$ elevados, como o níquel e o aço, possuem elevadas perdas por absorção. No caso de linhas de transmissão, onde os campos são em baixa frequência, deve-se escolher um material que garanta uma boa blindagem tanto para campos elétricos como para campos magnéticos.

Material	σ_r	μ_r	$\sigma_r \cdot \mu_r$	σ_r/μ_r
Prata	1,05	1	1,05	1,05
Cobre	1	1	1	1
Ouro	0,7	1	0,7	0,7
Alumínio	0,61	1	0,61	0,61
Bronze	0,18	1	0,18	0,18
Níquel	0,2	600	120	0,0003
Aço	0,1	1000	100	0,0001

TABELA 3.6: Valores de σ_r e μ_r de alguns metais

Os robôs apresentados em (Montambault & Pouliot 2006) e (Campos et al. 2003) utilizam o alumínio para a blindagem eletromagnética. Os testes realizados em (Montambault & Pouliot 2006) mostraram que a blindagem funcionou adequadamente para tensões de até $300kV$.

O robô desenvolvido por (Li et al. 2004) utilizou uma blindagem dupla, a primeira contra campos elétricos constituída por uma caixa de cobre e alumínio, a segunda envolvendo a primeira utilizando um material ferromagnético. Esta segunda blindagem utiliza o método de desvio do campo magnético. A blindagem foi testada em linhas de $500kV$, com o robô colocado no cabo guarda e imagens captadas por suas câmeras de vídeo foram enviadas a uma estação no solo. O teste foi bem sucedido, provando assim a eficiência da blindagem.

A tabela 3.6 apresenta as características de alguns materiais utilizados em blindagens eletromagnéticas (Paul 2006).

3.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os principais pontos para o desenvolvimento mecânico de um sistema robótico. Foram abordados aspectos como o sistema de locomoção, a ação do vento quando o robô estiver em ação em uma linha de transmissão e a blindagem eletro-

magnética que deve ser construída para garantir um bom funcionamento da eletrônica embarcada.

O próximo capítulo aborda a eletrônica embarcada necessária para o funcionamento desses sistemas robóticos, detalhando cada componente necessário.

Capítulo 4

Eletrônica Embarcada em Robôs para inspeção de Linhas de Transmissão

Entende-se por eletrônica embarcada todo e qualquer sistema eletro-eletrônico montado em uma aplicação móvel, seja ela um robô, um automóvel, um navio, um avião, um trator etc. Com a evolução da microeletrônica, o emprego da eletrônica embarcada se tornou muito popular e hoje ela pode ser encontrada em inúmeros equipamentos, de um simples controle remoto a máquinas industriais.

Os sistemas embarcados, em geral, possuem microprocessadores, memória de dados, memória de programa e dispositivos de entrada e saída (Ball 2002). Essa descrição de elementos fundamentais de um sistema embarcado é semelhante à descrição de computadores PC para uso geral. Segundo (Berger 2001) as diferenças entre sistemas embarcados e computadores PC são:

1. Sistemas embarcados são dedicados a uma tarefa específica, enquanto computadores PC são projetados para uso geral.
2. Sistemas embarcados podem ser extremamente compactos.
3. Sistemas embarcados são, em sua maioria, projetados para operar em tempo real, enquanto os sistemas operacionais de computadores PC tradicionais não permitem esse tipo de operação.

4. Sistemas embarcados podem utilizar uma grande variedade de processadores com arquiteturas diferentes.
5. Sistemas embarcados têm menos recursos disponíveis que sistemas com computadores PC.
6. Sistemas embarcados geralmente têm restrições de consumo, por serem alimentados por bateria.
7. Sistemas embarcados normalmente devem operar em condições ambientais severas.
8. O desenvolvimento de sistemas embarcados requer métodos e ferramentas especiais para ser bem projetado.

Robôs para inspeção em linhas de transmissão é um dos casos onde o uso da eletrônica embarcada é indicado, devido às suas características de operação em tempo real, limitação de consumo e tamanho reduzido.

Um robô para inspeção de linhas de transmissão deve realizar as seguintes funções: comunicação com uma unidade central, aquisição/processamento de sinais do processo e controle de seu movimento. Geralmente, emprega-se na realização dessas tarefas um sistema eletrônico embarcado composto de: unidade de processamento, sensores, módulo de comunicação, módulo de potência /controle e atuadores.

Essas partes do sistema eletrônico são projetadas para interagir entre si e com o processo, de forma a realizar o objetivo desejado da maneira mais adequada, considerando aspectos econômicos e de segurança.

Na associação dessas partes, duas arquiteturas básicas foram propostas para aplicação em robôs de inspeção de linhas de transmissão:

- Arquitetura simples - possui apenas uma unidade de processamento (Campos et al. 2003)
- Arquitetura multiprocessada - possui duas ou mais unidades de processamento (Zhou et al. 2005).

A arquitetura simples, proposta em (Campos et al. 2003) e representada na figura 4.1, é mais indicada para robôs que desempenham tarefas simples que não exijam

tratamento muito intenso de informações do processo ou em que o tempo para a sua realização não seja crítico, como, por exemplo, inspeção visual de cabos ou instalação de esferas de sinalização em cabos guarda. A realização de tarefas simultâneas, com essa arquitetura, requer uma unidade com grande capacidade de processamento, para que ela consiga atender, eficazmente e dentro das limitações de tempo, as várias atividades que ocorram (aquisição de dados de sensores, controle e tomada de decisões, comando de atuadores, comunicação com a unidade central).

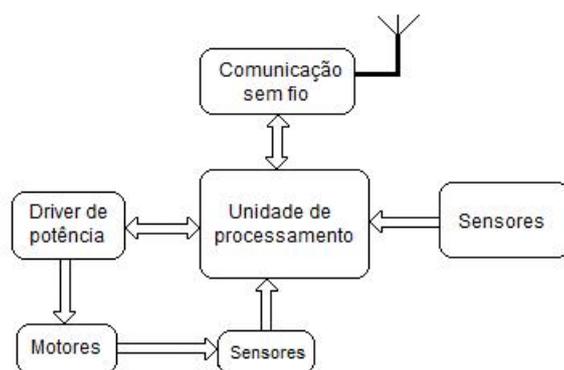


FIGURA 4.1: Eletrônica embarcada com arquitetura simplificada (Campos et al. 2003)

A arquitetura multiprocessada, indicada na figura 4.2 e proposta em (Zhou et al. 2005), é dividida em camadas e permite atender várias tarefas simultaneamente de forma eficiente, separando-as pelas unidades de processamento empregadas. Com isso, a capacidade de processamento de cada unidade não precisa ser muito grande como no caso anterior. No exemplo ilustrado na figura, existem duas unidades de processamento que trocam informações entre si; uma (UP1) está encarregada da interface com os sensores do processo e da comunicação com a unidade central, enquanto a outra (UP2) analisa os sensores internos, executa o algoritmo de controle e comanda os atuadores. Essa arquitetura multiprocessada pode ser dividida em camadas, as três camadas consideradas em (Zhou et al. 2005) são:

1. Camada de supervisão (camada superior)- É responsável pelo recebimento de imagens em tempo real, da localização de falhas e monitoramento da operação do robô.

2. Camada de planejamento e controle (camada intermediária) - É responsável pela aquisição das informações vindas dos sensores externos, pelo controle e pela transmissão de dados entre o robô e a estação em terra.
3. Camada de atuação (camada inferior) - A camada de atuação recebe os dados vindos da camada de intermediária e realiza o comando dos atuadores.

Esse tipo de arquitetura é o mais indicado para robôs de inspeção de cabos de linhas de transmissão, devido à simultaneidade de tarefas e aos requisitos temporais existentes nessa aplicação (na aquisição de sinais, transmissão de dados e execução de controle), e, por isso, ele foi escolhido para a implementação discutida no próximo capítulo.

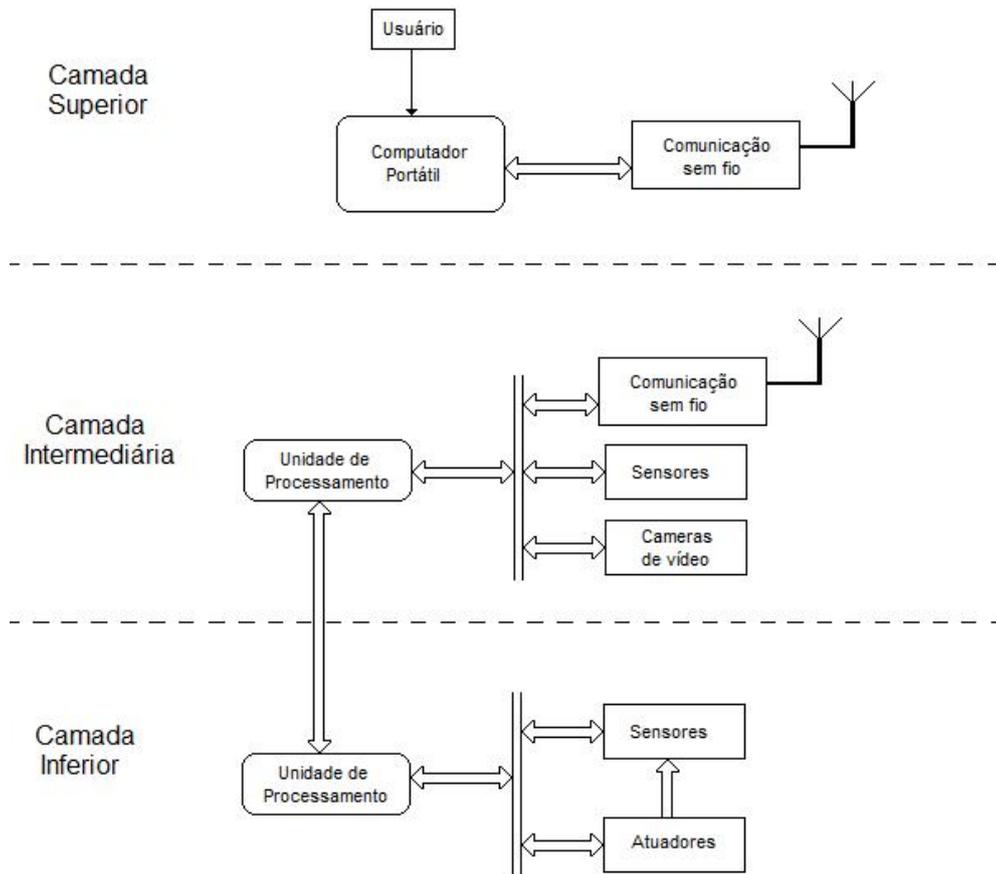


FIGURA 4.2: Eletrônica embarcada dividida em camadas proposta por (Zhou et al. 2005)

A seguir tem-se os principais componentes utilizados na eletrônica embarcada em

robôs para inspeção de linhas de transmissão.

4.1 Unidades de processamento

As unidades de processamento se diferenciam pela sua capacidade de processamento, velocidade, ambiente de desenvolvimento, custo, entre outras características. A seguir são mostradas as características de três grupos de unidades de processamento utilizadas em sistemas embarcados:

- Computadores PC/104
- CompactRIO
- Microcontroladores

4.1.1 Computadores PC/104

Quando o mercado de sistemas embarcados começou a crescer, havia o desejo de se empregar a arquitetura do PC nesses sistemas. Os motivos eram a confiabilidade e a compatibilidade. Porém, haviam problemas com o tamanho da placa e com os slots de expansão, que propiciavam maus contatos. O PC/104 veio em resposta a essa necessidade, criando um padrão de arquitetura, hardware e software compatíveis com um PC tradicional só que em módulos compactos.

O nome PC/104 vem da semelhança com os tradicionais PCs, inicialmente fabricados pela IBM com barramento ISA, e pela quantidade de pinos usados para a conexão de módulos de expansão. Na figura 4.3 pode-se ver um exemplo de computador no padrão PC/104.

O padrão foi criado inicialmente pela Ampro Computers no final da década de 80 e publicado em 1992 com a finalidade de popularizar o padrão PC/104. Até o final de ano de 2007 mais de 160 fabricantes disponibilizavam diversos tipos de módulos no padrão PC/104. Essa grande variedade de módulos permite que, a partir de um módulo principal, o usuário monte um sistema com as mais variadas características. Entre os principais tipos de módulos existentes pode-se destacar:

- Interface analógica



FIGURA 4.3: Computador do tipo PC/104 com módulos adicionais empilhados

- Interface de áudio
- Interface digital
- Comunicação serial e paralela
- Comunicação firewire
- Interface de vídeo
- Leitura de encoders
- Placas de rede
- GPS
- Wireless

As vantagens de se utilizar computadores no padrão PC/104 em sistemas embarcados são:

- Compatibilidade com o padrão dos PCs tradicionais
- Possibilidade de utilizar diferentes sistemas operacionais
- Tamanho compacto
- Grande variedade de fabricantes

Os computadores no padrão PC/104 podem ser indicados para sistemas embarcados que necessitem de um sistema pequeno porém com grande capacidade de processamento. A tabela 4.2 traz uma comparação de alguns módulos de processadores disponíveis no mercado.

Modelos	EINDOS-PB550	Jaguar	Linx
Processador	Pentium MMX 250 MHz	Pentium III 850 MHz	AMD SC520 133 MHz
Memória RAM	256 MB	256 MB	64 MB
Memória de vídeo	64 MB	4 MB	-
Conectores IDE	2 canais	2 canais	2 canais
Comunicação Serial	2 RS232 2 RS232/422/485	1 RS232 1 RS232/422/485	2 RS232 2 RS232/422/485
USB	2 (1.1)	2 (1.1)	-
Interface IrDA	sim	sim	-
Ethernet	10/100	10/100	10/100
Compact Flash	tipo II	-	tipo I e II
Alimentação e consumo	5V 1A	5V 3,37A	5V 0,94A

TABELA 4.1: Módulos CPU no padrão PC/104

Os computadores no padrão PC/104 foram utilizados nos robôs de inspeção em linhas de transmissão desenvolvidos em (Ventrela et al. 2003) e em (Zhou et al. 2005).

4.1.2 Microcontroladores

Os microcontroladores se caracterizam por incorporarem em um mesmo circuito integrado: processador, memórias de programa e de dados além de vários periféricos como contadores, comunicação serial, conversores analógico-digitais, geradores de PWM, como visto na figura 4.4, fazendo com que a aplicação final fique extremamente compactada.

Para a escolha de um microcontrolador adequado, alguns itens devem ser levados em conta, entre eles:

1. Arquitetura de acesso a memória:
 - Arquitetura Von Neumann - utiliza o mesmo barramento para o acesso a memória de programa e a memória de dados.

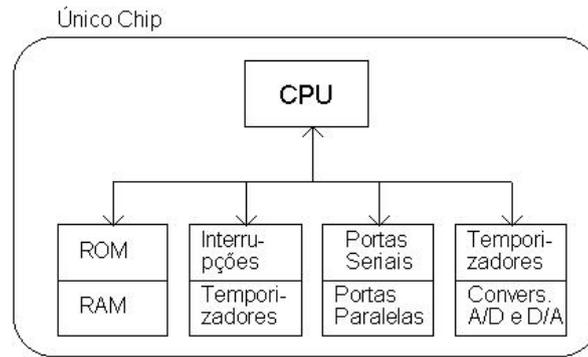


FIGURA 4.4: Diagrama do funcionamento interno de um microcontrolador

- Arquitetura Harvard - Utiliza barramentos separados para o acesso a memória de programa e memória de dados.
2. Set de instruções
 - CISC (*Complex Instruction Set Computer*) - Possui um grande conjunto de instruções, que geralmente implementam funções específicas e de alto-nível. As instruções são processadas lentamente. Ideal para se fazer a programação sem o uso de compiladores.
 - RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) - Possui um conjunto pequeno de instruções básicas e fundamentais. Processa as instruções de maneira mais rápida que um microcontrolador CISC. Ideal para a programação através de compiladores.
 3. Número de bits no barramento de dados (8 bits, 16 bits ou 32 bits). Um microcontrolador com um número maior de bits no barramento de dados é capaz de realizar certas operações em uma menor quantidade de ciclos de máquina do que um microcontrolador com um número menor de bits.
 4. Velocidade do processador.
 5. Numero de periféricos disponíveis no microcontrolador, como por exemplo, conversores A/D, módulos PWM, interfaces de comunicação, etc.
 6. Consumo.
 7. Ambiente de desenvolvimento.

8. Literatura disponível.

Na arquitetura multiprocessada, os microcontroladores são muito indicados para aplicações dentro da camada de atuação devido às suas características de tamanho, baixo custo, baixo consumo e versatilidade. Dependendo do esforço computacional que o sistema requer, pode também ser aplicado como a unidade de processamento da camada de planejamento, principalmente os microcontroladores de 16 e 32 bits. Na tabela 4.2 estão as características de alguns dos microcontroladores mais populares no mercado brasileiro.

Modelo	N de bits	Instruções	Comunicação	Periféricos
PIC18F	8 bits	10 a 16 MIPS	SPI, UART, I2C USB, CAN, Zigbee	PWM, ADC, Comparadores
AVR	8 bits	até 20 MIPS	SPI, UART, Zigbee, USB	PWM, ADC, Driver LCD
dsPIC30F	16 bits	até 40 MIPS	UART, I2C CAN	PWM, ADC, Leitura de encoder
MSP430	16 bits	até 16 MIPS	UART, I2C I2c, IrDA	PWM, ADC, Driver LCD
HC08	8 bits	até 16 MIPS	UART, I2C SPI, CAN	PWM, ADC, Driver LCD
AVR32	32 bits	até 80 MIPS	UART, I2C, CAN SPI, USB	PWM, ADC, DAC SD/MMC, Driver LCD
LPC2000	32 bits	até 150MIPS	UART, I2C, CAN SPI, USB Ethernet	PWM, ADC, DAC SD/MMC, Driver LCD

TABELA 4.2: Comparação entre microcontroladores

4.1.3 Um exemplo comercial: CompactRIO

O CompactRIO é um sistema embarcado de controle e aquisição de dados fabricado pela National Instruments. Ele é formado por um módulo controlador equipado com um processador determinístico em tempo real, um chassi equipado com sistema reconfigurável FPGA e módulos de entrada e saída que se encaixam no chassi, formando assim um sistema compacto, figura 4.5.

Esta configuração possibilita ao usuário agregar ao seu sistema funcionalidades de aquisição e processamento de dados, imagem, controle de movimento e comunicação com instrumentos modulares como placas multímetro, osciloscópios, entre outras. O



FIGURA 4.5: Vista frontal de um sistema CompactRIO

usuário pode desenvolver o seu programa através da programação gráfica do ambiente de desenvolvimento LabView, esse programa é descarregado no CompactRIO, que a partir desse ponto passa a funcionar autonomamente.

Ele pode ser utilizado como a unidade de processamento da arquitetura simplificada, mesmo em sistemas que realizem tarefas mais complexas, uma vez que é equipado com um processador em tempo real de 400MHz, que possui grande capacidade de processamento. Ele é indicado também para sistemas que necessitem de uma aquisição de dados analógicos precisa, pois possui placas de entrada e saídas específicas para aquisição de dado. Pode-se resumir como as principais vantagens do CompactRIO:

- Tamanho reduzido.
- Processador em tempo real
- Programação gráfica via LabView.
- Diversos módulos de entradas e saídas.
- Baixo consumo.
- Capacidade de operar em ambientes hostis.

Os módulos controladores estão listados na tabela 4.3 e na tabela 4.4 tem-se alguns módulos de entrada e saída disponíveis.

Modelo	Velocidade	memória RAM	Memória não volátil	Portas Auxiliares	Alimentação
cRIO-9014	400MHz	128MB	2GB Expansível pela USB	RS232 USB Ethernet	9 a 35 Vdc
cRIO-9012	400MHz	64MB	128MB Expansível pela USB	RS232 USB Ethernet	9 a 35 Vdc
cRIO-9004	200MHz	64MB	512B	RS232 Ethernet	9 a 35 Vdc
cRIO-9002	195MHz	32MB	64GB	RS232 Ethernet	9 a 35 Vdc

TABELA 4.3: Módulos Controladores CompactRIO

Modelo	Função	Características
NI-9219	Medição de corrente	8 canais 200kS/s 16 bits $\pm 20mA$
NI-9403	Entrada e saída digital	8 canais TTL 100ns
NI-9505	Controle de motor DC	Ponte H interna 8A à 30v Interface para encoder Sensor de corrente
NI-9263	Saída de tensão e corrente	4 canais 100kS/s 16 bits $\pm 30v$

TABELA 4.4: Módulos de entrada e saída de dados

4.2 Sensores

O sensor é um dispositivo capaz de converter grandezas físicas em sinais elétricos. Os sensores utilizados em sistemas mecatrônicos podem ser classificados em dois grupos (Rosário 2005):

1. Sensores Internos - São utilizados para determinar estados internos do sistema.
2. Sensores Externos - São utilizados para determinar características externas do ambiente onde o sistema se encontra

A tabela 4.6 apresenta alguns exemplos de sensores de cada tipo.

Externos	Internos
Distância	Posição
Temperatura	Velocidade
Visão	Aceleração
Umidade	Orientação
Luminosidade	

TABELA 4.5: Exemplos de sensores

Os sensores também são classificados de acordo com o tipo de sinal de saída que fornecem:

- Analógico - assume um valor compreendido dentro de uma escala, geralmente fornece uma tensão, ou corrente, proporcional a grandeza a ser medida.
- Digital - Assume um número finito de valores dentro de uma determinada escala.
- Binário - Sinal digital que só pode assumir dois valores, 0 ou 1.

Afim de se definir o sensor mais adequado para cada situação, algumas características devem ser analisadas, tais como:

- Faixa de atuação - Faixa da grandeza a ser medida em que o sensor pode ser utilizado.
- Linearidade - Grau de proporcionalidade entre a grandeza e o sinal de saída.
- Acurácia - Razão entre o valor real e o valor medido pelo sensor.
- Resolução - Grau de precisão do sensor.

Nesta subseção serão apresentados os principais sensores utilizados em robôs para inspeção em linhas de transmissão, listando ainda as possibilidades encontradas no mercado para cada tipo de sensor.

4.2.1 Detecção de obstáculos

A detecção de obstáculos é um ponto chave para o sucesso de aplicações onde se utilizam robôs móveis (Siciliano & Sciavicco 2000). Para o caso de robôs operando em linhas de

transmissão de energia elétrica, os obstáculos que poderão ser encontrados pelo robô estão listados na tabela 3.1.

Os métodos utilizados para a detecção de obstáculos podem ser classificados em dois grupos: métodos que necessitam de contato físico entre o robô e o obstáculo e métodos que não necessitam de contato físico entre o robô e o obstáculo. Os principais métodos utilizados em sistemas robóticos estão listados na tabela 4.6.

Métodos com contato	Métodos sem contato
Chaves de fim de curso	Sonar
Sensores de corrente	sensores infravermelho
Chaves de contato	sensores indutivos
	sensores capacitivos
	Visão

TABELA 4.6: Métodos de detecção de obstáculos

A detecção de obstáculos sempre foi um problema para robôs de inspeção em linhas de transmissão. Em (Komoda et al. 1990), por exemplo não é mencionado nenhum mecanismo para detecção de obstáculos. Já em (Ventrela et al. 2003) a detecção de obstáculos é feita pelo próprio operador na estação base através das imagens geradas pelas câmeras de vídeo. No robô desenvolvido em (Campos et al. 2003) o sensor de obstáculo utilizado é um sensor de toque, que sinaliza assim que o robô encosta na esfera de sinalização. Em (Zhou et al. 2005) a detecção dos obstáculos é feita através de softwares de processamento e reconhecimento de imagens fornecidas pela câmera de vídeo.

A seguir tem-se alguns exemplos de sensores de obstáculos estudados.

4.2.1.1 Sonar

O funcionamento do sonar se baseia no princípio do eco, um sinal ultra-sônico de curta duração é enviado por um transmissor, normalmente na faixa entre $40kHz$ e $52kHz$, esse sinal será refletido no obstáculo e recebido pelo receptor (figura 4.6). O tempo em que o sinal demora a ser recebido pelo receptor é utilizado para o cálculo da distância entre o sonar e o obstáculo.

$$L = \left(\frac{t_r}{2}\right) \cdot v_{som} \quad (4.1)$$

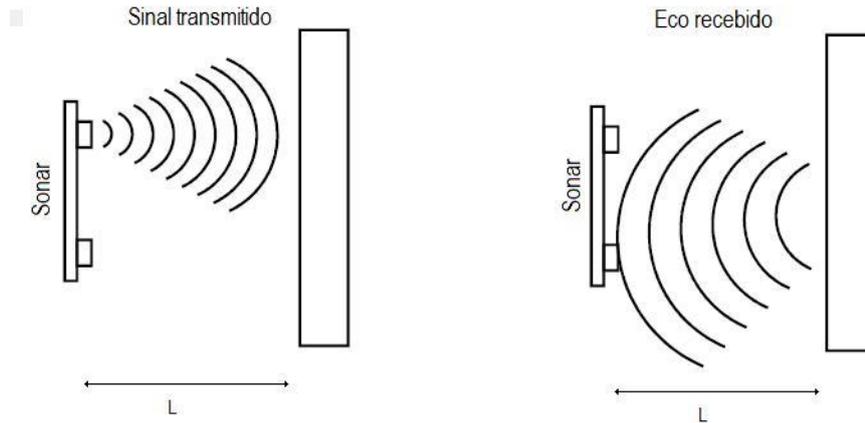


FIGURA 4.6: Princípio básico do funcionamento de um sonar

L = Distância do sonar para o obstáculo

t_r = Tempo que o sinal demora para ser recebido

V_{som} = Velocidade do som no ar, $340m/s$

O sinal de saída desse tipo de sensor pode variar em dois tipos:

- Um pulso de largura proporcional ao tempo em que o eco foi recebido.
- Saída serial dos dados de distância do obstáculo, podendo ser USART ou I2C.

O tipo de sinal irá depender do modelo e do fabricante do sensor, assim como a faixa de atuação do sensor que pode variar entre $1cm$ a $12m$ em média. A tabela 4.7 trás as especificações de alguns sensores do tipo sonar mais comuns no mercado.

Fabricante	Modelo	freq. (Hz)	Alcance	saída
Tato	Módulo Sonar	-	0,20m - 1,50m	Pulso TTL
Devantech	SRF02	40kHz	0,15m - 6m	I2C/Serial TTL
Devantech	SRF05	40kHz	0,01m - 4m	pulso TTL
Devantech	SRF235	235kHz	0,10m - 1,20m	I2C
Polaroid	6500	50kHz	0,15m - 12m	Pulso TTL

TABELA 4.7: Sensores do tipo sonar disponíveis no mercado

4.2.1.2 Sensor Infravermelho

Os sensores óticos utilizam a luz para detectar objetos. Nele uma fonte de luz emite um determinado sinal luminoso que será recebido por um fotodetector. Todos os tipos de sensores óticos funcionam basicamente da mesma forma, a diferença está na maneira em que a fonte de luz e o receptor são configurados e encapsulados. Os sensores mais comuns são:

- Sensores de reflexão - O emissor emite a luz, que incide no objeto a ser detectado. A luz é refletida retornando ao receptor, onde é detectada, como mostra a figura 4.7.
- Sensores de retroreflexão - Este sensor é similar ao sensor de reflexão, o emissor e o receptor são encapsulados juntos. Um refletor localizado a uma certa distância, reflete o sinal luminoso continuamente, quando um objeto atravessa o caminho do feixe o receptor para de receber o sinal, indicando que tem um objeto a sua frente.
- Sensores de ruptura de feixe - Nesse tipo de sensor o emissor e o receptor são encapsulados separadamente, o emissor emite o sinal luminoso que é recebido diretamente pelo receptor, quando um objeto passa pelo caminho do feixe o receptor para de receber o sinal, acusando assim a existência de um objeto.

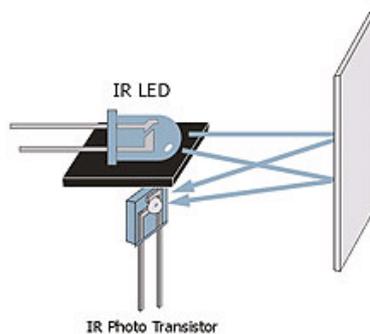


FIGURA 4.7: Princípio de funcionamento de um sensor Infravermelho de reflexão

Para a utilização em robótica móvel o sensor ótico mais indicado é o sensor de reflexão, pelo fato deste não precisar de nenhum outro equipamento fixo. Esse tipo de sensor pode ser facilmente construído utilizando-se apenas alguns LEDs infravermelho e um detector infravermelho.

Os sensores óticos mais comuns não conseguem estimar a distância do obstáculo, são sensores binários que apenas indicam a presença ou não do obstáculo. Existe porém um grupo de sensores óticos infravermelhos mais complexos que conseguem, através do ângulo em que o sinal é recebido, estimar a distância de um obstáculo (figura 4.8).

Como exemplo temos os sensores da linha GP2DXX. São sensores analógicos que fornecem uma tensão proporcional a distância do obstáculo. A tabela 4.14 apresenta as especificações técnicas de alguns componentes dessa linha de sensores.

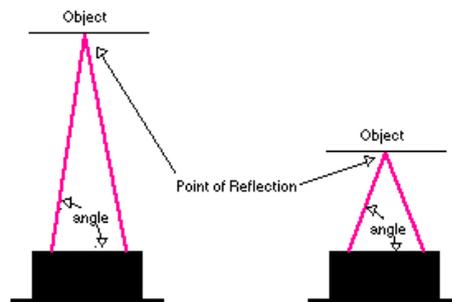


FIGURA 4.8: Princípio de funcionamento da medição de distância com sensor infravermelho

Fabricante	Modelo	Alcance	saída	Alimentação
Sharp	GP2D120	0,04m - 0,30m	Analógica	5v/33mA
Sharp	GP2D12	0,10m - 0,80m	Analógica	5v/33mA
Sharp	GP2D15	0,04m - 0,30m	Analógica (coletor aberto)	5v/33mA
Sharp	GP2Y0D02YK	0,20m - 0,150m	Analógica	5v/33mA

TABELA 4.8: Sensores da família GP2XXX

4.2.1.3 Chaves de toque

O método mais simples de detecção de obstáculos. É um sensor do tipo digital, onde o sinal de saída muda de estado no momento em que o robô encosta-se ao obstáculo. Também chamados de chaves de fim de curso, podem ser encontrados com facilidade no mercado com os mais diversos tipos de graus de proteção, tensões de saída e alimentação.

4.2.2 Posição e velocidade

Sensores de posição e velocidade são muito utilizados em robótica móvel, uma vez que em muitos casos é necessário o controle em malha fechada utilizando valores de posição e velocidade, sejam elas de um sistema robótico, de uma junta ou de um eixo (Siciliano & Sciavicco 2000).

Pode-se classificar os sensores de posição e velocidade em sensores angulares e sensores lineares, tabela 4.9.

Sensores Lineares	Sensores Angulares
LVDT	Encoder
Potenciômetro	Resolver
Sensores indutivos	Potenciômetro de revolução
GPS	

TABELA 4.9: Classificação dos sensores de posição

Os sensores angulares são os mais utilizados em sistemas robóticos (Siciliano & Sciavicco 2000). Já os sensores do tipo GPS se tornaram muito populares em robótica móvel, devido a sua facilidade de utilização. As principais características desses sensores são abordadas a seguir.

4.2.2.1 Encoder Incremental

O encoder incremental é um sensor ótico formado por um disco com um determinado número de janelas que é iluminado por um emissor. Um receptor fica posicionado do outro lado do disco e recebe o sinal infravermelho toda vez que uma janela do disco passa pelo sinal, criando uma serie de ondas quadradas de acordo com o movimento realizado pelo seu eixo. A figura 4.9 ilustra o funcionamento de um encoder incremental.

Normalmente esse tipo de encoder tem pelo menos dois canais de saída, que são chamados de canal A e canal B. Os dois canais são defasados de 90° , essa defasagem varia de acordo com o sentido da rotação, $+90^\circ$ em um sentido e -90° em outro. Com a leitura de apenas um canal tem-se a velocidade, já a leitura dos dois canais ao mesmo tempo permite identificar o sentido da rotação. Um outro sinal, normalmente chamado de canal Z ou canal zero, fornece uma posição absoluta emitindo um pulso por volta, ele pode ser utilizado como uma referência para a determinação da posição angular do

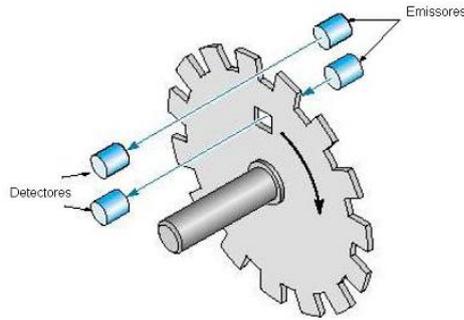


FIGURA 4.9: Funcionamento de um encoder incremental

eixo através do canal A e B.

A resolução de um encoder incremental é dada pelo número de janelas existentes em seus discos, normalmente esse número pode variar de 16 a 5000 janelas, o que nos dá um sinal de 16 a 5000 pulsos por volta. A resolução do encoder, em graus, é dada pela divisão de 360° (uma volta) pelo número de pulsos. Por exemplo, para um encoder que nos fornece um sinal de 256 pulsos por volta temos uma resolução de $1,4^\circ$, ou seja cada pulso significa uma rotação de $1,4^\circ$ no eixo do encoder.

Quando se deseja uma precisão maior do encoder podemos utilizar os sinais em quadratura, lendo os dois canais A e B ao mesmo tempo, dessa forma em um período onde antes existia apenas um pulso pode-se identificar quatro estados diferentes, como mostra a figura 4.10. Utilizando o encoder em quadratura dividimos por quatro a sua resolução, no exemplo anterior do encoder de 256 pulsos por volta, a sua resolução passa a ser de $0,35^\circ$.

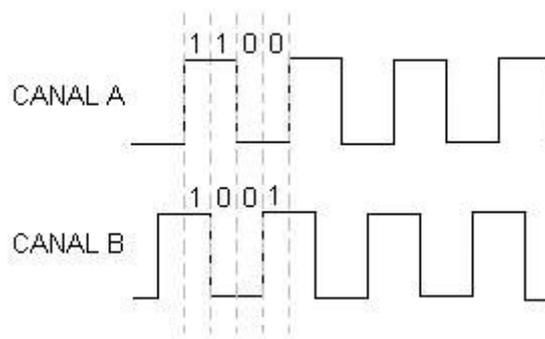


FIGURA 4.10: Sinais de saída de um encoder incremental em quadratura

Existe no mercado uma grande quantidade de fabricantes de encoders incrementais. Na tabela 4.11 alguns modelos de encoders de fabricantes são listados, cada fabricante

possui uma série de modelos com as mais variadas especificações técnicas, cabe ao cliente definir as especificações necessárias para cada aplicação.

Fabricante	Modelo	Pulsos por volta	Canais de saída	Grau de Proteção	Rotação máxima
Hohner	Série 40	1 - 1024	A/B/Z	IP54	3000RPM
Hohner	Série 58	1 - 5000	A/B/Z	IP65	6000RPM
Incon	ENH	30 - 2500	A/B/Z	IP65	6000RPM
Autonics	E50S	1 - 8000	A/B/Z	IP50	5000RPM
HP	HEDS-55XX	50 - 512	A/B	-	3000RPM

TABELA 4.10: Encoders Incrementais

4.2.2.2 Encoder Absoluto

O encoder absoluto, assim como incremental, utiliza a técnica de discos com janelas para identificar a posição angular do eixo. A diferença entre eles é que no encoder absoluto cada posição tem um valor único determinado através de um código de bits dado na saída, enquanto que no encoder incremental a posição é determinada a partir de uma referência dada pelo canal Z ou pela inicialização da leitura do encoder.

Na figura 4.11 é mostrado um típico disco de um encoder absoluto de 8 bits. A resolução de um encoder absoluto está diretamente ligada ao número de bits do seu código de saída. Por exemplo, em um encoder absoluto com 8 bits temos 256 posições diferentes do eixo, isso nos dá uma precisão de $1,4^\circ$.

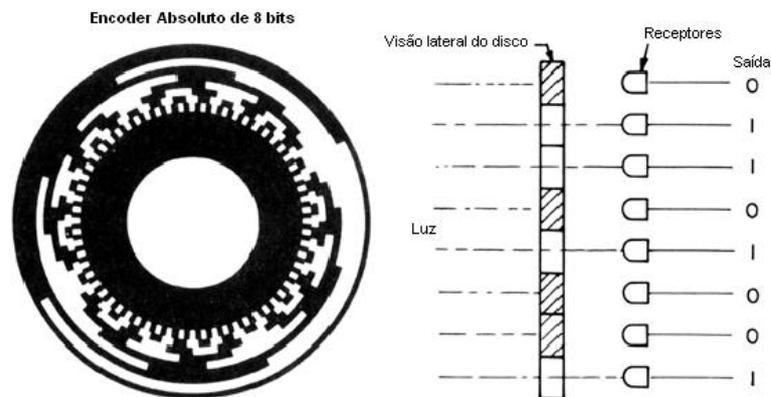


FIGURA 4.11: Funcionamento de um encoder absoluto

Assim como no caso do encoder incremental, os encoders absolutos são fabricados com diversos tipos de especificações, na tabela 4.11 tem-se alguns modelos de encoders

absolutos encontrados no mercado brasileiro.

Fabricante	Modelo	Resolução n° de bits	Interface de saída	Grau de Proteção	Rotação máxima
Hohner	Série 65	8 - 12	Paralela	IP65	600RPM
Bourns	EAW0J-B24	8	Paralela	-	128RPM
Hengstler	AC-58	10-14	Paralela	IP64/IP67	10000RPM
Hohner	Série 64	12	Analógica (0 - 20mA)	IP65	600RPM
Incon	ENR	12	Analógica (0 - 10Vdc)	IP65	-

TABELA 4.11: Encoders Absolutos digitais

4.2.2.3 Sistema de Posicionamento Global - GPS

O GPS (*Global Positioning System*) é um sistema de posicionamento por satélite utilizado para determinação da posição de um receptor na superfície da Terra ou em órbita. O sistema utiliza 24 satélites em órbita da terra e é controlado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, podendo ser usado por qualquer pessoa que possua um receptor GPS. O sistema GPS é formado por três elementos (Tsui 2000):

1. Satélites na órbita da Terra
2. Estações de controle e monitoramento
3. Receptores GPS

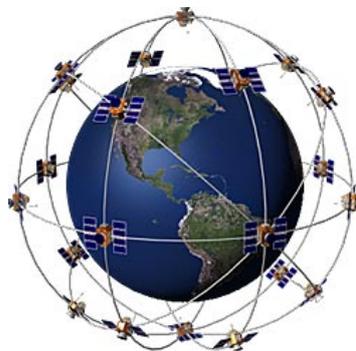


FIGURA 4.12: Rede de satélites utilizados no serviço de GPS em órbita da Terra

O grande problema do GPS era que no início de sua operação, os dados vindos do receptor não tinham uma grande precisão, essa precisão variava em torno de 100

metros. A partir do momento em que entrou em operação para o uso civil o DGPS (*Differential Global Positioning System*) essa precisão aumentou para valores entre 1 metro e 20 metros.

Um receptor GPS estima o seu posicionamento calculando as suas distâncias em relação a três ou mais satélites. A aquisição do sinal e o cálculo da posição e da velocidade duram em média entre 0,1s e 1s. A comunicação entre a unidade de processamento e esse módulo é feita através de uma porta serial e é regida pela norma NMEA 0183. Essa norma, que foi formulada pela *National Marine Electronics Association*, define os sinais elétricos necessários, o formato das sentenças de comandos e a velocidade de transmissão de 4800bps (SiRF 2005). Ao todo são 62 comandos, mas apenas 26 são utilizados pelos módulos GPS.

Os módulos GPS são facilmente encontrados no mercado, na tabela 4.12 temos alguns exemplos de módulos GPS.

Fabricante	Modelo	Precisão	Canais	freqüência de aquisição	Alimentação
Globalsat	ET-318	5m - 10m	20	10Hz	3,3v - 5v / 70mA
Globalsat	ET-286	5m - 10m	12	10Hz	3,3v - 5v / 41mA
	BG-320RGT	5m	12	1Hz	3,8v - 8v / 40mA
	GT-310F	5m	12	1Hz	3,8v - 8v / 60mA

TABELA 4.12: Módulos GPS

4.2.3 Visão

O sistema de visão mais comum em robótica móvel utiliza uma câmera de vídeo gerando imagens que são transmitidas a um monitor ou a um computador para serem processadas. O processamento dessas imagens pode ser feito de forma automática através de programas para reconhecimento de imagens, ou pode ser feito por um operador que analisa as imagens. Existem ainda sensores industriais que fornecem em um mesmo encapsulamento os sensores de visão, que geram a imagem e um processador, que faz a análise das imagens comparando a imagem capturada com uma imagem pré programada.

No robô apresentado em (Zhou et al. 2005) o processamento das imagens é feito através de um computador programado para identificar os obstáculos existentes na

linha. Nos robôs apresentados em (Ventrela et al. 2003), (Montambault & Pouliot 2006) e (Li et al. 2004) as imagens são transmitidas para uma estação base, onde um operador analisa as imagens.

Em todos os casos são utilizadas câmeras de vídeo. As câmeras de vídeo mais populares utilizam dois tipos de princípios para a captura de uma imagem, são eles:

- CCD - Um sensor CCD (Dispositivo de carga acoplada) é constituído por um dispositivo retangular composto de pixels. Devido ao efeito fotoelétrico, quando um fóton atinge a 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.
- CMOS - Um sensor CMOS (Metal complementar de óxido semiconductor) 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.

Segundo (Fossum 1997) sensores CMOS consomem menos energia, ocupam menos espaço e são mais sensíveis a luz. São indicados para aplicações com limitações de espaço onde os requisitos de qualidade de imagem são baixos. São a escolha ideal para câmeras de computadores, brinquedos, câmeras de segurança etc.

Os sensores CCD oferecem qualidade de imagem superior com consumo maior de energia e menor sensibilidade a luz. São indicados para aplicações onde a qualidade de imagem é importante, como câmeras de digitais de fotografia, aplicações médicas e científicas.

Atualmente no mercado existem uma grande variedade de câmeras de vídeo que podem ser utilizadas em sistemas de visão. Elas podem ser divididas em três grupos:

- Câmeras PTZ (Pan-Tilt-Zoom) - São câmeras que através de comandos podem mudar a direção em que a lente está apontada, fazendo movimentos de rotação horizontal e vertical, além de zoom.

- Câmera IP - As câmeras IP vem ganhando cada vez mais espaço, elas são equipadas com uma interface de rede e se conectam diretamente a uma rede de computadores. Podem ser acessada de qualquer computador ligado a essa rede. A conexão pode ser tanto com fio, como sem fio.
- Câmeras comuns - São as câmeras mais utilizadas, elas fornecem sinais analógicos que podem ser ligados a um monitor de vídeo, ou a um computador equipado com entrada de vídeo.

A escolha de uma câmera de vídeo deve levar em conta os seguintes requisitos:

- Resolução necessária
- iluminação mínima
- Sensor utilizado
- Relação sinal/ruído
- Consumo

4.2.4 Sensor de desgaste em juntas

A identificação do desgaste em juntas e grampos pode ser feita através da medição da resistência, como mostra a seção 2.3.1. Para a realização desta medição existe no mercado um sensor fabricado pela Sensorlink Inc. chamado “Ohmstik”. As principais características desse sensor são:

- Mede de 1 a 1400 A
- Opera em tensões de até 500kV
- Mede resistências de 5 a 2500 micro-ohms
- Resolução de 1 micro-ohm.
- Peso de 1,71kg
- Valor da resistência mostrado em um visor de LCD



FIGURA 4.13: Sensor de medição do desgaste de juntas

Em (Montambault & Pouliot 2003) um sensor deste tipo é acoplado ao robô, dessa forma é possível medir a resistência de juntas localizadas no meio do vão. A leitura do valor medido é feita por uma câmera que focaliza o visor e envia as imagens para a base.

4.2.5 Sensor de corrosão em cabos

Como mostrado no capítulo 2, para a identificação de corrosão nos cabos com alma de aço os sensores magnéticos, exposto na seção 2.2.1, e os sensores por corrente parasita, exposto na seção 2.2.2, são os sensores mais indicados para a inspeção robotizada das condições de cabos condutores.

4.2.5.1 Sensores magnéticos

Os sensores magnéticos são bastante populares, pois são muito utilizados para a inspeção de cabos de ancoragem. Atualmente no mercado diversas opções estão disponíveis, a tabela 4.13 lista algumas possibilidades de sensores magnéticos que podem ser adaptados a robôs para a inspeção em linhas de transmissão.

Fabricante	Modelo	Tipo de sensor	Técnica
Zawada NDT	MD120	LF/LMA	Efeito Hall e espiras
Zawada NDT	MD20	LF	Espiras
NDT Technologies	LMA-125	LF/LMA	Espiras e integrador
British Coal	Ropescan	LF/LMA	Espiras e integrador
DMT	RTI 1	LF/LMA	Espiras e integrador
Halec SA	Cable Test Halec	LF	Espiras
AATS	AATS-817	LF/LMA	Efeito Hall

TABELA 4.13: Sensores

Normalmente os fabricantes fornecem um sistema completo, com o sensor e um console para o processamento dos sinais. Os sinais de saída típicos do sensor estão

representados na figura 4.14. Cada tipo de falha tem o seu sinal padrão, como dito anteriormente o sinal LF indica o local da falha, e o sinal LMA indica o grau de intensidade da falha.

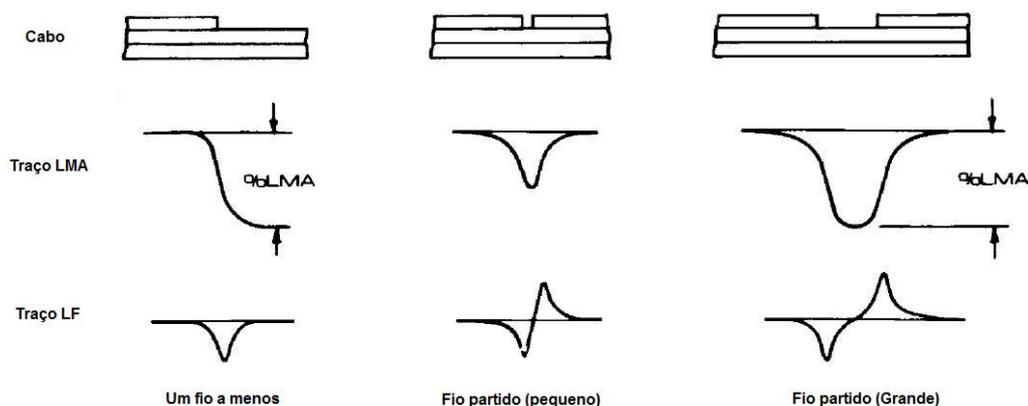


FIGURA 4.14: Sinais de saída do sensor magnético

4.2.5.2 Sensores baseados em corrente parasita

Sensores de corrente parasita estão disponíveis em uma grande variedade de formatos e tamanhos. Os sensores de corrente parasita são classificados pelo modo de operação e pela maneira que as bobinas são dispostas no sensor. Os modos de operação já foram discutidos na seção 2.2.2 e a classificação pela disposição das bobinas, de acordo com (Cartz 1995), pode ser feita em três grupos:

- Sensores de superfície - Tem as bobinas dispostas no eixo perpendicular a superfície inspecionada. Muito utilizada na inspeção de superfícies de aviões e tanques de armazenamento.
- Sensores concêntricos - As bobinas são dispostas no mesmo eixo do objeto inspecionado, envolvendo o objeto. Muito utilizado em inspeção de cabos e tubos.
- Sensores internos - As bobinas ficam dispostas em um eixo paralelo ao do objeto inspecionado de maneira que consiga passar por tubos, fazendo a inspeção de toda a superfície interna dos dutos em apenas uma passada. É utilizado para inspeção de cabos e tubos já instalados.

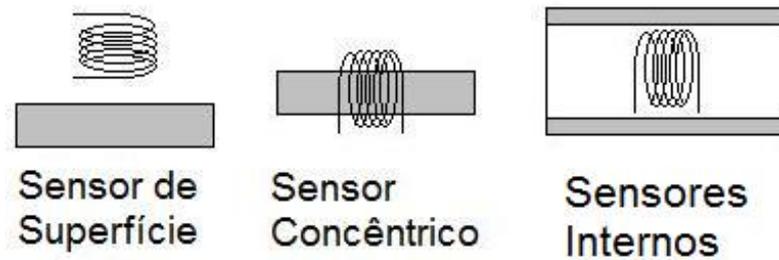


FIGURA 4.15: Classificação dos sensores de corrente parasita pela disposição das bobinas

O sinal de saída típico de um sensor de superfície diferencial pode ser observado na figura 4.16. Esse tipo de sensor pode ser acoplado a um sistema que possua um conversor A/D capaz de adquirir o sinal.

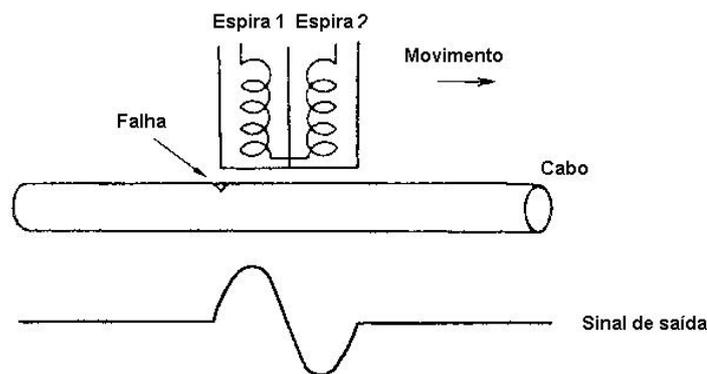


FIGURA 4.16: Sinal de saída de sensores por corrente parasita

Para a inspeção de cabos condutores de linhas de transmissão os tipos de sensores mais indicados são os de superfície e os sensores concêntricos. Devido a versatilidade e a facilidade de construção de sensores deste tipo, diversos fabricantes disponibilizam uma grande variedade de sensores, podendo ainda projetar sensores sob encomenda. Entre os principais fabricantes de sensores de corrente parasita estão:

- Zetec
- Sonsonics
- MTI Instruments

- MAC - Magnetic Analysis Corp.

4.3 Motores

Os robôs até aqui estudados utilizam motores de corrente contínua para a sua movimentação ao longo do cabo. Nesta seção, serão apresentados os cálculos necessários à especificação de um motor de corrente contínua adequado para o deslocamento do robô. Como já mencionado no capítulo 3, os tipos de arquitetura mecânicas apresentadas são muito parecidos e, em vãos desimpedidos, os seus movimentos são regidos da mesma forma. Assim, para a identificação e o cálculo das forças atuantes em condições uniformes (sem obstáculos), basta considerar os esforços em uma das polias no cabo da linha. São vários os parâmetros que interferem no cálculo dessas forças, entre os quais pode-se destacar o peso total do robô, a velocidade máxima de rotação e o torque do motor.

Levando em conta tais parâmetros e ainda que o trecho a ser percorrido é uma subida, o que exigiria mais do sistema, chega-se ao diagrama da figura 4.17. Nele estão representados o peso, com suas duas componentes, uma paralela e a outra perpendicular ao cabo, o ângulo de inclinação do trajeto e a força que aciona o conjunto.

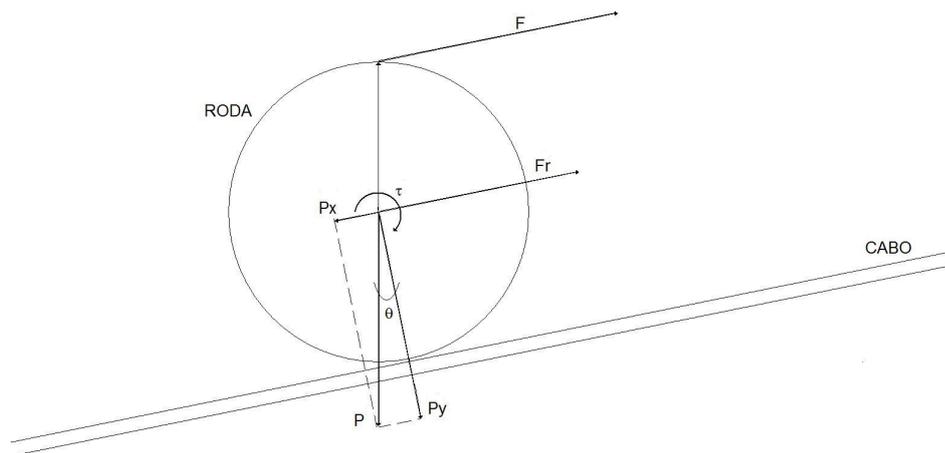


FIGURA 4.17: Diagrama de forças

As forças que interagem na polia da figura 4.17 e o torque resultante do sistema são relacionados pelas equações a seguir:

$$F_r = m \cdot a$$

$$F_r = F - P_x$$

$$P_x = P \cdot \text{sen}(\theta) = m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$\tau = F \cdot r$$

onde,

- F - força relacionada ao torque.
- F_r - força resultante.
- P - peso total.
- P_x - componente do peso paralela ao cabo.
- m - massa total do robô.
- θ - ângulo de subida.
- a - aceleração do robô no ângulo de subida.
- g - aceleração da gravidade.
- r - vetor entre o ponto de rotação e F
- τ - torque total do sistema.

O objetivo, nesse caso, é encontrar um torque que movimente o conjunto com uma determinada velocidade. Essa velocidade é dada por,

$$v = \omega \cdot r \tag{4.2}$$

onde,

- v - velocidade desejada
- ω - velocidade angular

Supondo que o peso e o ângulo são conhecidos, fazendo as substituições cabíveis e considerando o módulo das grandezas, chega-se ao sistema de equações

$$\tau = r \cdot F \quad (4.3)$$

$$v = \omega \cdot r \quad (4.4)$$

Com o valor de v estabelecido, esse sistema possui quatro incógnitas (τ , r , a , w) e duas equações. A sua solução é obtida de forma iterativa, onde se escolhe o valor de duas variáveis e calcula-se as outras duas, até se obter o melhor compromisso entre custo, disponibilidade comercial e um arranjo de elementos (material, peças, equipamentos, etc) capaz de ser implementado.

Com os valores de torque total do sistema e velocidade angular conhecidos, seleciona-se um conjunto formado por um motor e uma redução. Existem no mercado uma série de empresas que fabricam e fornecem esses motores juntamente com as reduções necessárias para atingir o valor do torque necessário, normalmente elas disponibilizam catálogos com os valores de torque, velocidade e eficiência da redução. As equações 4.6 e 4.7 mostram como se deve utilizar esses dados para selecionar um conjunto que fique mais adequado ao que foi especificado.

$$\tau = \tau_m \cdot R \cdot \epsilon \quad (4.5)$$

$$\omega_m = \omega \cdot R \quad (4.6)$$

Onde:

- τ - Torque total do conjunto.
- τ_m - Torque do motor.
- ω - Velocidade angular do conjunto.
- ω_m - Velocidade angular do motor.
- R - Relação da redução

- ϵ - Eficiência da Redução

4.3.1 Acionamento dos motores de corrente contínua

Dois métodos bastante utilizados para o acionamento de motores de corrente contínua são:

- Acionamento através de amplificadores lineares.
- Acionamento através de ponte H.

O acionamento por amplificadores lineares utiliza tensões simétricas para acionar o motor de corrente contínua nos dois sentidos de rotação. A figura 4.18 apresenta um esquema típico de acionamento de motores de corrente contínua por amplificadores lineares. Os transistores, operando na região linear, são acionados um de cada vez, de acordo com a tensão de saída do amplificador operacional.

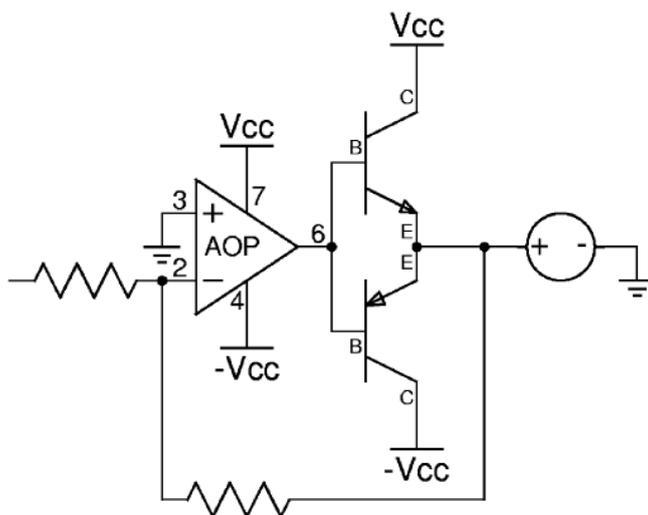


FIGURA 4.18: Circuito típico de acionamento de motores de corrente contínua por amplificadores lineares

O acionamento dos motores de corrente contínua feito através de uma ponte H utiliza sinais modulados por largura de pulso (PWM). Devido à disposição dos componentes componentes da ponte H, torna-se fácil selecionar o sentido da rotação de um motor, apenas invertendo a polaridade sobre seus terminais. Uma ponte H básica é composta por 4 chaves mecânicas ou eletrônicas posicionadas formando a letra *H*, sendo que cada uma localiza-se num extremo e o motor é posicionado no meio.

Para que o motor funcione, basta acionar um par de chaves diagonalmente opostas, o que faz com que a corrente flua do pólo positivo para o negativo atravessando o motor e fazendo-o girar. Para inverter a rotação, desliga-se essas chaves e aciona-se o outro par de chaves, o que faz com que a corrente siga na direção oposta e, conseqüentemente, o sentido da rotação do motor será alterada (figura 4.19). O nível de tensão aplicado no motor é dado pelo sinal PWM, utilizado para o acionamento de pelo menos uma chave de cada par (Crowder 2006).

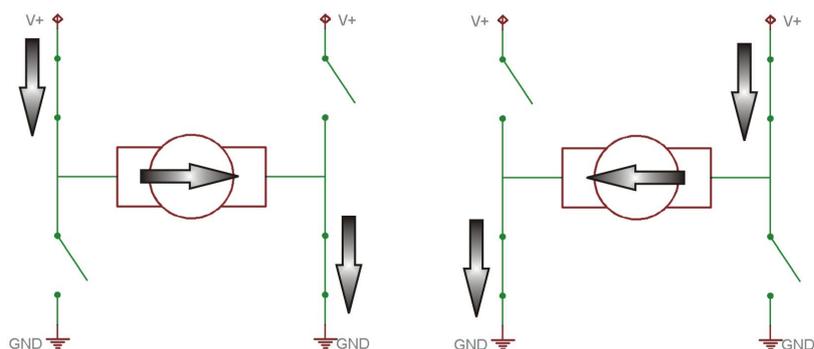


FIGURA 4.19: Representação do funcionamento de uma ponte H para acionamento de um motor de corrente contínua

Segundo é apresentado em (Crowder 2006), as principais características de cada tipo de acionamento são:

- Acionamento PWM + Ponte H
 - Baixa dissipação de potência.
 - Boa imunidade à ruído.

- Acionamento conversor D/A + Amplificador Linear
 - Excelente linearidade
 - Alta dissipação de potência

Na escolha do tipo de acionamento deve-se escolher o que melhor atende as necessidades de cada projeto.

4.3.2 Sensores de corrente

O motor de um robô deve consumir uma energia dentro de uma determinada faixa de valores considerada aceitável, a fim de se evitar danos ao motor e ao circuito de acionamento. Uma maneira de se identificar quando o consumo de energia está muito alto é medindo o valor da corrente que passa pelo motor. Quando essa corrente for muito elevada significa que pode estar ocorrendo uma sobrecarga no motor. Essa sobrecarga, normalmente, tem três causas: quando o robô se depara com um obstáculo que impede o seu movimento, quando o robô está sendo submetido a condições de operação além do recomendado ou quando existe alguma falha nos circuitos eletrônicos do robô. Dessa forma, monitorar a corrente que flui pelo motor se torna imprescindível em um robô, para informar as condições do mesmo e permitir uma atuação corretiva. O sensor de corrente pode então, ser usado como um sensor de anomalia: quando a corrente está em um nível acima do aceitável alguma coisa de errada está acontecendo, indicando que alguma providência deve ser tomada pelo controle do robô.

Os dois métodos de medição de correntes mais utilizados são a medição em shunt e a utilização de sensores de efeito Hall. A medição em shunt é um método invasivo, onde se coloca um resistor em série com o elemento a ser monitorado e pela diferença de potencial da resistência pode-se então identificar o valor da corrente. As desvantagens desse tipo de medição são as imprecisões causadas pela falta de precisão dos resistores e o fato de ser um método invasivo, enquanto a sua vantagem é a facilidade e o baixo custo.

Os sensores de efeito Hall utilizam o efeito descoberto em 1879 por E.H. Hall, que submeteu um condutor elétrico a um campo magnético perpendicular a direção da corrente elétrica. Hall verificou que uma diferença de potencial elétrico aparecia nas laterais deste condutor na presença do campo magnético. Os sensores de efeito Hall garantem uma isolamento entre o condutor por onde passa a corrente e o circuito de medição, o que é muito bom em casos onde o sistema de controle precisa medir altas correntes em um circuito de potência mantendo uma isolamento.

4.4 Transmissão de dados

Para o bom funcionamento de um sistema que opere remotamente é necessário um canal de comunicação confiável entre a base e o sistema. A definição de um canal de comunicação adequado entre a base e o sistema robótico deve levar em conta alguns parâmetros::

1. Quantidade de informação transmitida.
2. Velocidade de transmissão.
3. Alcance máximo.
4. Confiabilidade.

No caso em estudo, pode-se classificar a informação que irá ser transmitida da base para o robô e do robô para a base em três grupos:

1. Dados de controle do robô
2. Dados dos sensores externos do robô
3. Imagens geradas por uma câmera de vídeo

Em (Ventrela et al. 2003) são propostas duas alternativas para a realização dessa comunicação. A primeira é realizada com dois canais de comunicação, um para dados, e outro para vídeo. O canal de dados utiliza um módulo de comunicação RF bidirecional com interface serial, enquanto que o canal de vídeo utiliza um link de vídeo sem fio. Esse método é utilizado também em (Montambault & Pouliot 2006). As vantagens desse método são o baixo custo e, pelo fato dos dois canais serem separados, um problema na transmissão das imagens não afeta o canal de dados.

A segunda proposta é a utilização de apenas um canal de comunicação, que utiliza comunicação wi-fi 802.11 e tem grande capacidade de transmissão de dados, podendo assim ser utilizado tanto para vídeo como para dados. Esse tipo de comunicação é utilizado em (Zhou et al. 2005).

4.4.1 Módulos transceiver RF

Uma comunicação entre dois ou mais pontos pode ser estabelecida através de módulos RF disponíveis no mercado. Esse tipo de módulo normalmente tem uma entrada e saída do tipo serial síncrona ou assíncrona. Eles operam em FHSS (frequency hopping spread spectrum), que é uma técnica de codificação para transmissão digital de sinais. A técnica de spread spectrum consiste em codificar e modificar o sinal de informação executando o seu espalhamento no espectro de frequências. Esse sinal ocupa uma banda maior que a informação original, porém possui baixa densidade de potência e apresenta uma boa relação sinal/ruído.

Os módulos podem também executar algum algoritmo de detecção de falhas na comunicação e, dessa forma obter uma comunicação ponto a ponto entre duas unidades de forma confiável.

A desvantagem desse método é a limitação da taxa de transmissão, ou seja, esse tipo de comunicação é indicado para a transmissão apenas de dados a uma velocidade de no máximo 57600bps. Por outro lado, a grande vantagem desse método de comunicação é a facilidade de operação e o baixo custo.

A tabela a seguir mostra os dados técnicos de dois módulos transceiver RF.

Fabricante	Wenshing	Maxstream
Modelo	TRW-24G	9Xstream
Frequência	2.4GHz	900MHz
modulação	GFSK	
Taxa de transmissão	250Kbps 1Mbps	125 - 65000 bps
Interface	Serial síncrona	CMOS UART até 19200bps
Canais	125	7
Endereços	65536	65536
Detecção de erro	Sim	Sim
Distância máxima	até 150m (campo aberto)	até 32Km (campo aberto)
Alimentação	3,3v 18mA (Rx) 10mA (Tx)	5,0v 50mA (Rx) 140mA (Tx)

TABELA 4.14: Módulos RF transceiver

A distância máxima que pode ser obtida entre os dois pontos irá depender de vários fatores, tais como: Potência do transmissor, antena utilizada e topologia do terreno.

4.4.2 Rede locais sem fio

As redes locais sem fio permitem que computadores e dispositivos eletrônicos se comuniquem entre si. Atualmente a maioria das redes locais sem fio utilizam o protocolo TCP/IP. Este protocolo é dividido em camadas, como mostra a figura 4.20.

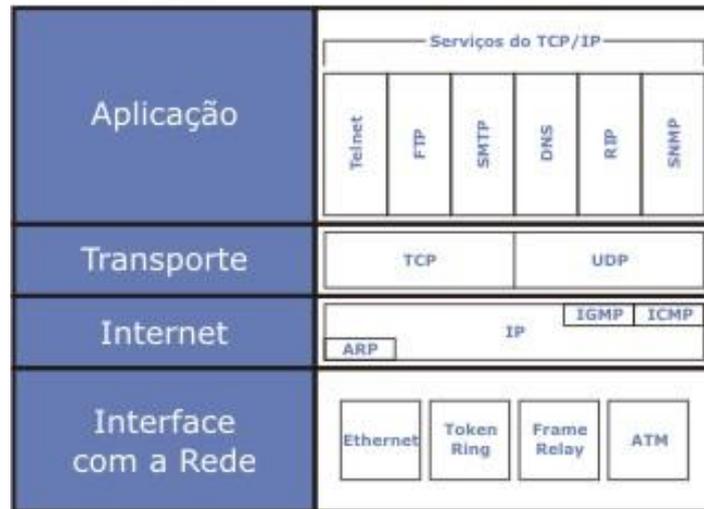


FIGURA 4.20: Divisão em camadas do protocolo TCP/IP

A camada de interface de rede do protocolo TCP/IP irá definir o tipo de conexão que será utilizada. Atualmente a conexão do tipo Ethernet é bastante difundida, ela pode ser definida como uma conexão com fio ou sem fio. No caso de redes sem fio é utilizado o padrão IEEE 802.11. Atualmente, as três versões mais populares do padrão IEEE 802.11 são:

- IEEE 802.11b: Opera a $2,4GHz$ e consegue velocidades de transmissão de até $11Mbps$
- IEEE 802.11g: Opera a $2,4GHz$ e consegue velocidades de transmissão de até $54Mbps$
- IEEE 802.11a: Opera a $5GHz$ e consegue velocidades de transmissão de até $54Mbps$

A figura 4.21 mostra como pode ser implementada uma rede local sem fio em um sistema robótico para inspeção de linhas de transmissão. É necessário que se utilize antenas de alto ganho para aumentar o alcance da rede, uma vez que redes com o

padrão 802.11 não são projetadas para alcançar longas distâncias. Segundo (Ventrela et al. 2003) a utilização de uma antena de $18dB$ na base e uma antena de $6dB$ no robô garantiu uma comunicação segura a distâncias de até $5Km$.

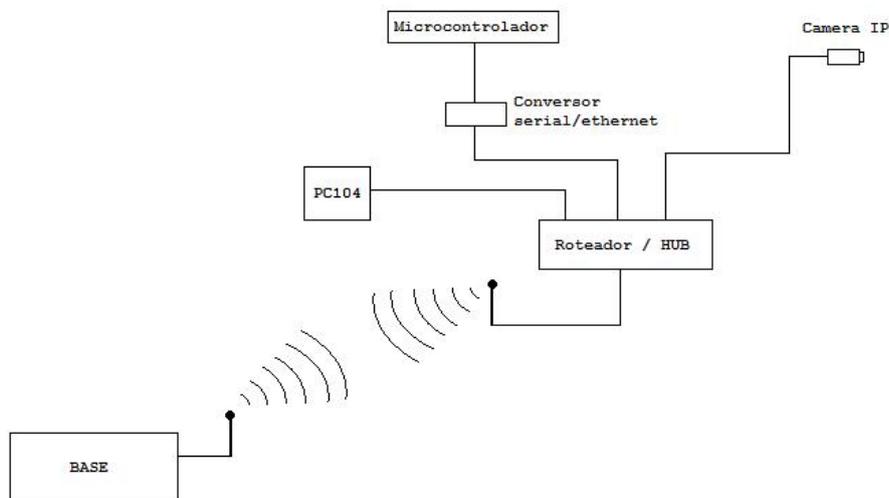


FIGURA 4.21: Exemplo de uma rede local sem fio em um sistema robótico

No caso em estudo, a implementação de uma rede local sem fio traz grandes vantagens ao projeto do sistema robótico. Entre as vantagens pode-se citar a alta velocidade de transmissão, a facilidade de inclusão de novos dispositivos e a confiabilidade. Por outro lado, a desvantagem de se utilizar uma rede local sem fio é o custo elevado e uma complexidade maior no projeto.

4.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais componentes utilizados na eletrônica embarcada em robôs para inspeção em transmissão de energia elétrica. Foram abordados as unidades de processamento, sensores, motores e a comunicação entre a base e o robô. Opções comerciais de cada componente também foram listadas.

Cabe ao responsável pelo projeto do robô a decisão de escolher as melhores opções para cada item, levando-se em conta requisitos como: a tarefa desejada, custo, disponibilidade no mercado, entre outros requisitos.

Capítulo 5

Estudo de caso: Robô para inspeção de corrosão em cabos de linhas de transmissão de energia elétrica

Neste capítulo é apresentado um estudo para construção de um robô de inspeção em cabos condutores de alumínio com alma de aço, empregados em linhas de transmissão de energia elétrica, seguindo os procedimentos descritos nos capítulos anteriores.

O objetivo é o de se obter um robô versátil capaz de fazer a inspeção com as técnicas apresentadas no capítulo 2. De início o robô deverá ser capaz de realizar uma inspeção visual do cabo, e posteriormente deverá ser adicionado um sensor capaz de identificar a corrosão da alma de aço do cabo.

5.1 Definição dos requisitos do projeto

A maioria dos cabos utilizados em linhas de transmissão de energia elétrica sofre uma deterioração gradual e falhas podem ocorrer com o tempo, causando inevitavelmente sérios prejuízos. Para tentar minimizar os riscos de tais falhas e suas conseqüências, normas e códigos de segurança recomendam a realização de inspeções periódicas para determinar as condições reais dos cabos.

A inspeção deve, portanto, identificar com precisão os trechos dos cabos em condições de risco e que devem ser removidos e aqueles que ainda possuem condições de continuar

em serviço, procurando otimizar aspectos de segurança e de economia.

De modo a satisfazer as condições impostas pelo tipo de problema considerado, o robô deve atender os requisitos a seguir:

- Apoio no cabo de linhas de transmissão - O robô deverá ser capaz de se apoiar no cabo condutor de uma linha de transmissão de energia elétrica, para assim ser possível realizar a inspeção.
- Controle de velocidade - A velocidade do robô deve ser controlada pois essa velocidade pode influenciar nos resultados de sensores magnéticos e de corrente parasita.
- Operação remota sem fio - O robô deve ser comandado por um operador em solo.
- Odometria - O robô deve ser capaz de medir a distância percorrida a fim de identificar o local exato da falha.
- Operar com a linha energizada - A utilização do robô com a linha ligada traz grandes benefícios as empresas de transmissão de energia, pois o desligamento de uma linha é sempre uma operação trabalhosa.
- Velocidade máxima - A velocidade máxima requerida do robô é de $40m/min$.

Com os requisitos do projeto estabelecido, a construção do robô teve início, a partir da escolha da sua arquitetura mecânica.

5.2 Definição da arquitetura mecânica

Como visto no capítulo 3, as arquiteturas encontradas na literatura podem ser divididas em dois grupos: as que transpõem obstáculos e as que não transpõem obstáculos. No caso presente, optou-se pelo tipo de arquitetura mais simples (que não transpõe obstáculos), visto que ela atende uma quantidade grande de linhas de transmissão existentes no Brasil, e pode ser implementada mais rapidamente, trazendo benefícios significantes para as empresas de energia elétrica.

De modo a atender os requisitos impostos, procurou-se uma estrutura simples e versátil, com dimensões apropriadas para uso em linhas de transmissão de energia

elétrica e que permitisse modificações no robô sem custos adicionais elevados. Essa idéia resultou em uma estrutura metálica em forma de T invertido, como a mostrada na figura 5.1.

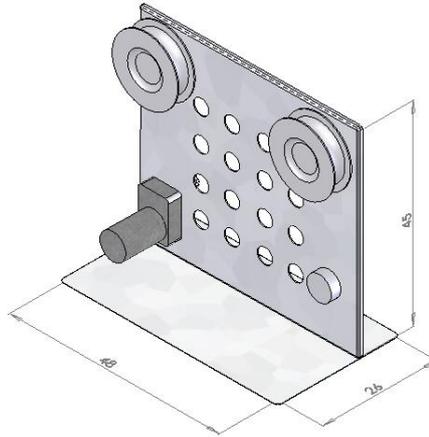


FIGURA 5.1: Estrutura mecânica do sistema robótico desenvolvido no projeto

A estrutura proposta tem espaço para um motor e duas polias que se encaixam no cabo. O motor transmite o movimento para as polias através de uma corrente e de rodas dentadas fixas na estrutura. A base do T invertido serve como prateleira, onde são alocados os diferentes módulos. Caso haja necessidade de mais espaço para outros módulos ou equipamentos, outra prateleira pode ser incluída embaixo da base do T.

A solução encontrada fornece liberdade na disposição dos componentes nas prateleiras, permitindo arranjá-los para se obter o melhor equilíbrio do robô no cabo. As dimensões escolhidas para essa estrutura estão indicadas na figura 5.2.

As polias foram feitas de aço e o seu diâmetro foi selecionado igual a 10cm , para elas caberem na estrutura de forma coerente com os demais elementos e para a velocidade do robô ficar na faixa pretendida. A estrutura foi feita de aço galvanizado e, junto com o motor, pesa 12kg .

O compartimento que abrigará a eletrônica embarcada foi construído a partir de placas de aço com espessura de 1mm , o que de acordo com a tabela 3.6, tem em suas propriedades $\mu_r = 1000$ e $\sigma_r = 0,1$. Segundo as equações apresentadas na seção 3.3, uma blindagem construída com essas características garante uma eficiência de blindagem para campos eletromagnéticos próximos e predominantemente elétricos de:

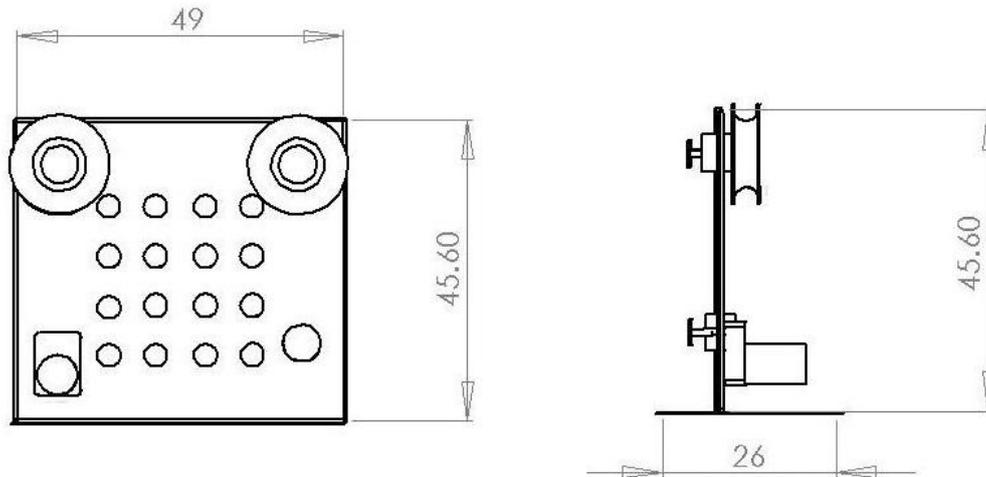


FIGURA 5.2: Vista frontal e lateral do sistema robótico desenvolvido no projeto

- Blindagem por reflexão: $R_e = 229dB$
- Blindagem por absorção: $A_e = 9,78dB$
- Eficiência total da blindagem: $SE = 238dB$

Com esse valor de eficiência o robô foi capaz de suportar, em testes realizados em laboratório, interferências de campos elétricos e magnéticos de fontes de até $100kV$ e $1000A$.

Com a parte mecânica definida, passou-se ao projeto eletrônico e de controle do robô.

5.3 Escolha da eletrônica embarcada

Nessa parte, será discutida a escolha dos circuitos e módulos que compõem o sistema eletrônico e o algoritmo de controle. Serão considerados:

- Sensores externos (interface com o processo)
- Sensores internos (medidas auxiliares)
- Módulos de comunicação
- Unidade de processamento

- Motor e circuito de acionamento.
- Controle do motor

No tipo de aplicação considerada, optou-se pela arquitetura em camadas para a eletrônica embarcada, mencionada no capítulo 4. A arquitetura proposta está representada na figura 5.3. Essa opção se deu devido à facilidade que esta arquitetura apresenta para a inclusão de novas funções, quando comparada com a arquitetura compacta.

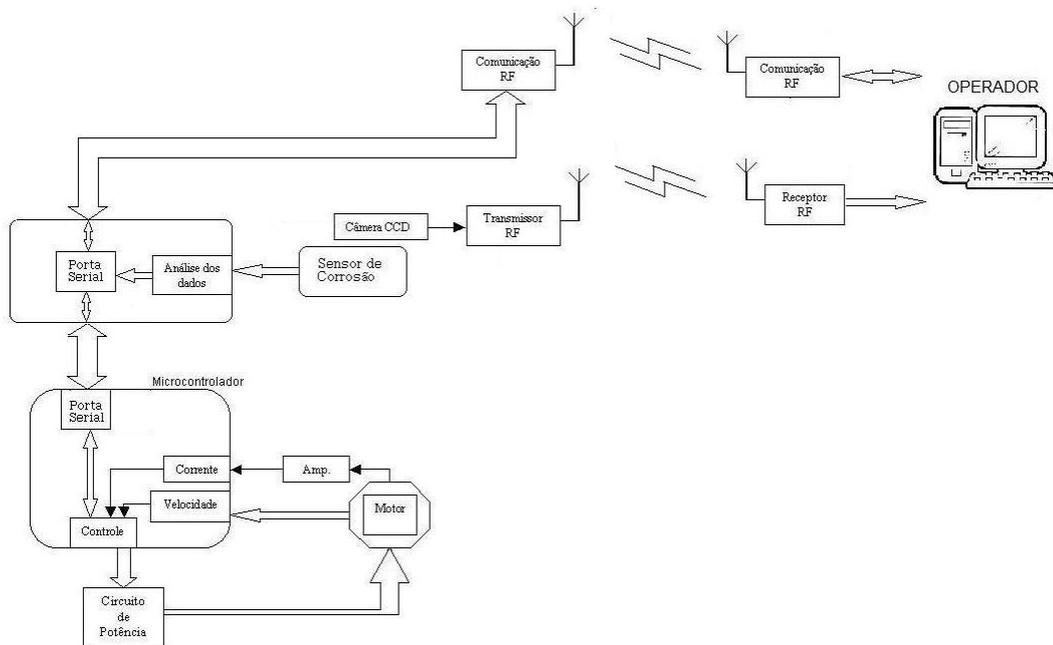


FIGURA 5.3: Eletrônica embarcada dividida em camadas proposta para o projeto

5.3.1 Sensores

Os dois grupos de sensores mencionados na seção 4.2, internos e externos, serão empregados no protótipo. Os sensores internos serão utilizados no controle da velocidade do robô, na sua localização e na medida da corrente elétrica consumida pelo motor. Já os sensores externos fornecerão as informações para a inspeção desejada.

5.3.1.1 Posição e Velocidade

O sensor de velocidade e posição deve ter como características principais tempo de resposta pequeno e precisão adequada. Com base na análise feita na seção 4.2.2, optou-se, para esse sensor, por um “encoder” do tipo incremental.

Para uma velocidade de rotação máxima do motor igual a $95rpm$ e um diâmetro da polia de $10cm$, um “encoder” de 512 pulsos por volta, operando em quadratura, fornece uma precisão em graus, segundo a seção 4.2.2.1, de $0,1757^\circ$, correspondente a $0,15mm$.

5.3.1.2 Detecção de obstáculo

Como visto na seção 4.2.1, a detecção de obstáculos em linhas de transmissão não é uma tarefa fácil. O sensor infravermelho e o módulo sonar não responderam bem aos testes realizados, por isso a utilização desses métodos foi descartada nesse momento. Dessa forma a detecção de obstáculos ficará a cargo do operador na base, que irá receber imagens geradas pela câmera de vídeo instalada no robô.

5.3.1.3 Visão

Para a inspeção visual do cabo ou para a identificação de obstáculos pelo operador, optou-se pela utilização de uma câmera CCD conectada diretamente em um transmissor de vídeo. As imagens são transmitidas para um receptor que é conectado a um computador portátil utilizado para a operação do robô.

Foi escolhida uma câmera CCD colorida bastante popular e muito utilizada em circuitos de vigilância eletrônica, a câmera tem como principais características:

- Fabricante: MULTITOC
- 420 linhas de resolução
- Padrão NTSC
- Baixo consumo

Para a transmissão dessas informações utilizou-se um par transmissor/receptor de vídeo operando a $2.4GHz$ da marca FUJKA. Este par atinge distâncias de até $1,5Km$.

5.3.1.4 Sensor de corrente

O sensor de corrente foi empregado para sinalizar situações de sobrecarga, como as mencionadas na seção 4.3.2, através da medida do valor de corrente do motor, e, assim, permitir procedimentos que reduzam possíveis danos ao robô.

Na sua especificação, foi levada em conta a corrente que o motor consome quando está no seu torque máximo (seção 5.3.4) e a garantia de isolamento entre o esquema de medição, feito por um conversor analógico-digital (A/D), e o circuito de potência do motor. Isso levou a um sensor do tipo Hall, capaz de medir correntes na faixa de $-15A$ a $+15A$, com uma relação tensão x corrente linear (figura 5.4).

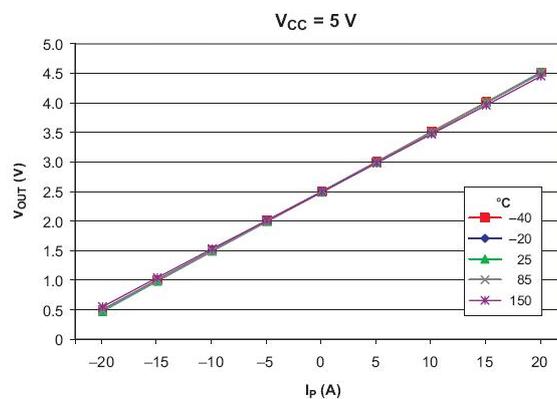


FIGURA 5.4: Gráfico da tensão de saída do sensor de corrente utilizado no projeto

Como o motor especificado irá consumir, em regime máximo de torque, uma corrente no valor de $5A$, o sinal de saída do sensor irá variar entre $2,5V$ e $3V$. Para facilitar a leitura deste valor pelo conversor A/D, foi adicionado um circuito eletrônico (figura 5.5) que fornece uma saída linear onde, $0V$ representa $0A$ e $5V$ representa $5A$.

5.3.2 Unidades de Processamento

As opções apresentadas na seção 4.1 foram utilizadas para a escolha das unidades de processamento do robô. A unidade de processamento I é a unidade da camada intermediária e a unidade de processamento II é a unidade da camada inferior.

5.3.2.1 Unidade de Processamento I

Dentro do presente projeto, a unidade de processamento da camada intermediária deve satisfazer os seguintes requisitos:

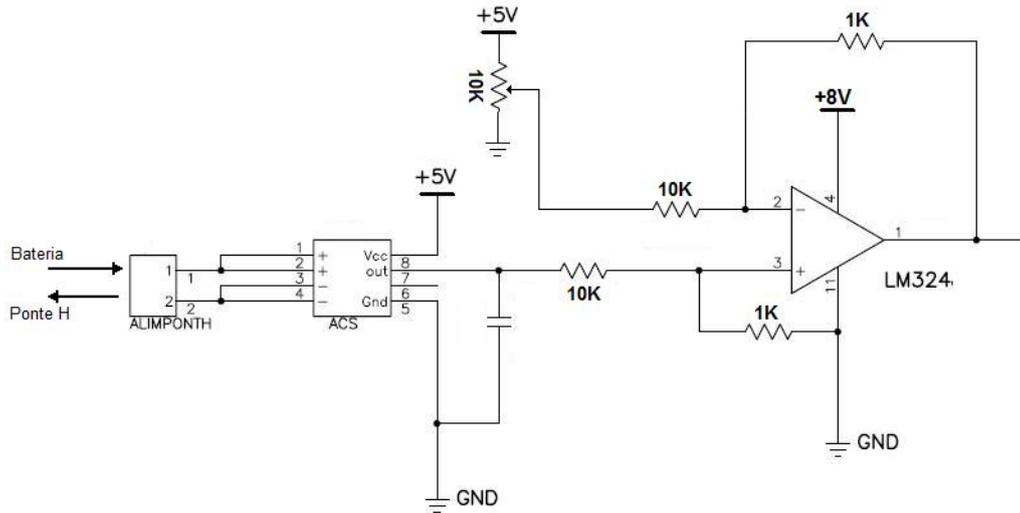


FIGURA 5.5: Circuito utilizado adequar a saída do sensor de corrente à leitura do A/D

- Protocolo de comunicação com a base.
- Protocolo de comunicação com a camada inferior.
- Leitura do sensor de corrosão.

Para a leitura do sensor de corrosão a unidade deve ser capaz de ler os dados fornecidos pelo sensor de corrosão (seja ele magnético ou de corrente parasita) com um período de amostragem de pelo menos $4mS$. Esta leitura deverá ser realizada através de um conversor analógico-digital.

O protocolo de comunicação com a base e com a camada inferior são protocolos simples, não exigindo muito esforço computacional da unidade de processamento.

Dentre as opções apresentadas no capítulo 4, a escolha por microcontroladores de $16bits$ se mostrou mais adequada, pois conseguirá atender todos os requisitos do projeto com um baixo custo, baixo consumo de energia e economia de espaço. Sem dúvida, a utilização de computadores PC/104, ou de sistemas CompactRIO, também iriam atender todos os requisitos do projeto, porém significariam um aumento no custo e na complexidade do projeto.

O modelo de microcontrolador escolhido foi o dsPIC30F3013, uma vez que ele atende a todos os requisitos necessários, tais como:

- Duas portas de comunicação serial assíncrona.

- Conversor analógico/digital de 12 bits.
- Aquisição de dados pelo conversor A/D de até 200kS/s.
- 40 MIPS (mega instruções por segundo).

5.3.2.2 Definição da Unidade de Processamento II

A unidade de processamento da camada II será responsável pelo controle do motor. Ela deve ser capaz de realizar as seguintes tarefas:

- Comunicação com a camada superior
- Leitura do encoder
- Leitura do sensor de corrente
- Controle da velocidade
- Acionamento do motor

A unidade escolhida foi um microcontrolador PIC18F452. Essa escolha levou em conta vários fatores, entre eles:

- Baixo custo
- Compilador C acessível
- Velocidade de 16 MIPS (mega instruções por segundo)
- Dispõe dos periféricos necessários: porta serial (UART), módulo PWM, contadores e Conversores analógico/digital.

5.3.3 Definição dos módulos de comunicação sem fio

Na seção 4.4 viu-se duas opções de comunicação entre o robô e a base. Para a escolha do sistema de comunicação foi levado em conta os seguintes parâmetros:

- Transmissão de dados
 - Dados de controle do robô

- Dados do sensor de corrosão
 - Sinal de vídeo
- Alcance Máximo - $10Km$ para dados de controle e $1Km$ para as imagens.
 - Velocidade de transmissão - $19200Kbps$

As duas soluções apresentadas na seção 4.4 foram consideradas. A primeira delas é a utilização de módulos de comunicação serial por rádio frequência, a figura 5.6 mostra como essa comunicação deve ser implementada no caso em estudo. A segunda opção é a utilização de uma rede local sem fio, que pode ser vista na figura 5.7.

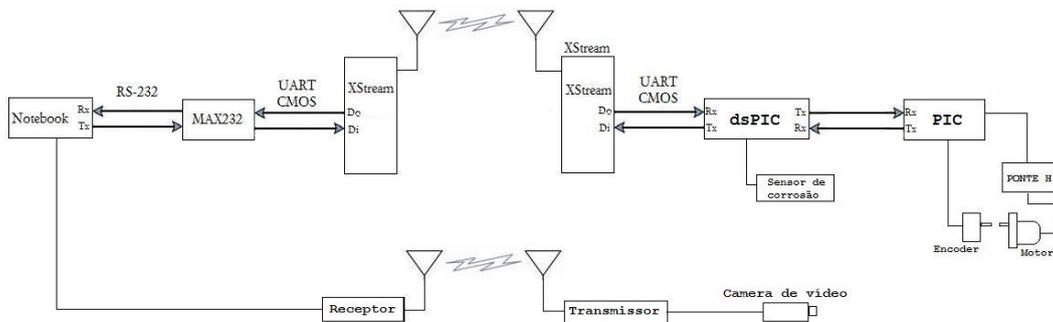


FIGURA 5.6: Funcionamento da comunicação entre a eletrônica embarcada e a base com o uso de dois canais de comunicação

Apesar da implementação de uma rede sem fio trazer várias vantagens ao projeto, tais como a facilidade de inclusão de um novo dispositivo e a alta taxa de transmissão de dados, a velocidade de transmissão dos dados estaria limitada pela velocidade da comunicação serial entre o microcontrolador e o conversor serial/ethernet. Por isso, optou-se pela utilização de dois canais de comunicação, um para a comunicação do microcontrolador com a base e outro para a transmissão de imagens da câmera de vídeo.

Para o canal de dados foi escolhido o transceiver da MAXSTREAM especificado na tabela 4.13. Com ele é possível se obter um canal de comunicação de dados entre o robô e a base.

Como a comunicação será do tipo ponto a ponto, a utilização desse módulo se torna bem simples. Depois de configurado os endereços de cada módulo, os endereços

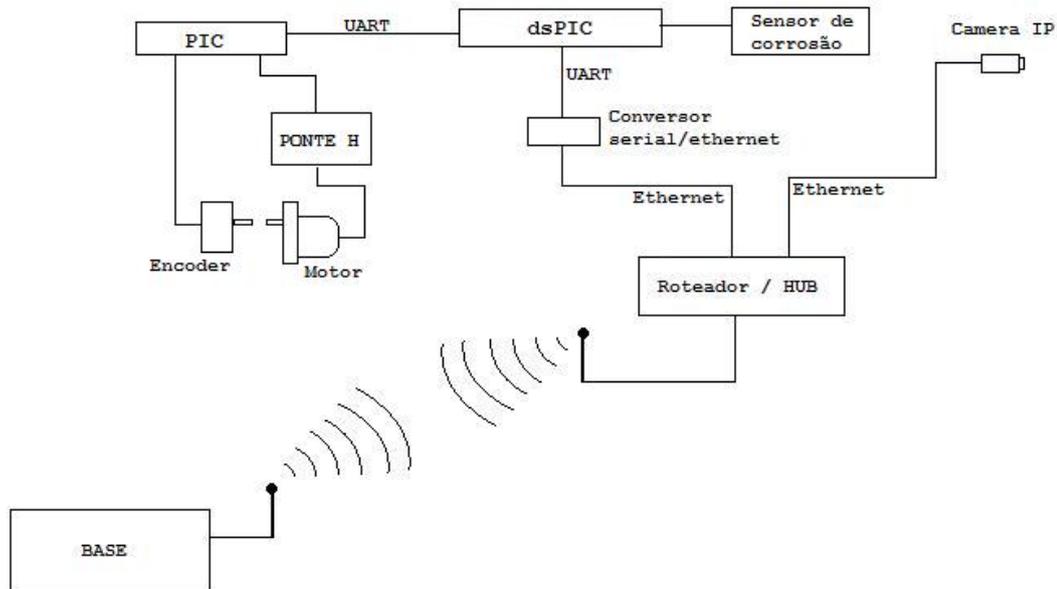


FIGURA 5.7: Funcionamento da comunicação entre a eletrônica embarcada e a base utilizando rede local sem fio

de destinos dos dados enviados e a interface, a comunicação entre os dois módulos se torna transparente, ou seja o sinal transmitido de um lado é recebido do outro lado.

O módulo possui uma memória não volátil que armazena a última configuração realizada, dessa forma só é necessário configurá-lo uma vez. A configuração pode ser feita através do programa X-CTU, disponibilizado pelo fabricante.

A comunicação com a câmera de vídeo já foi abordada na seção 5.3.1.3.

5.3.4 Definição do Motor

Na escolha do motor que melhor atendesse os requisitos do projeto, utilizou-se o procedimento apresentado no capítulo 4. Considerando que o peso total do robô (estrutura, motor, polias, módulos e sensores) será no máximo $25kg$, a sua velocidade estará limitada em $30m/min$, e que a inclinação do cabo não ultrapassará 20° , pode-se especificar um motor com a redução necessária para movimentar o robô, de acordo com o procedimento descrito na seção 4.3. Assim fazendo, chegou-se às características seguintes:

- Velocidade angular máxima - 127 rpm
- Torque máximo - 3,9 Nm

- Alimentação - 12 Vcc

Foi escolhido, então, um motor comercial que mais se aproximasse dessas características, resultando em:

- Velocidade angular máxima - 160 rpm
- Torque máximo - 4,0 Nm
- Alimentação - 12 Vcc

Para o acionamento do motor foi utilizado uma ponte H, descrita na seção 4.3. Como a previsão é de que o motor consuma correntes acima de 4A, optou-se pelo desenvolvimento de uma ponte H própria ao invés da utilização de circuitos integrados prontos. A placa projetada tem as seguintes características:

- Capacidade para altas correntes
- Circuito de tempo morto ajustável
- Sinais de entrada:
 - Sinal PWM
 - Sinal de sentido de rotação do motor
 - Pino de habilitação
- Isolamento da placa de controle por opto-acopladores

A ponte utiliza MOSFETs do tipo N na parte de baixo, e MOSFETs do tipo P na parte de cima. O acionamento dos MOSFETs da parte de baixo é feito através do driver IR4427, enquanto que os MOSFETs da parte de cima são acionados diretamente pelo circuito de tempo morto, quando a tensão V_{GS} se torna negativa (figura 5.9).

Para a alimentação, optou-se pela utilização de baterias recarregáveis de Ni-Cd. Para garantir maior segurança e independência, utilizou-se duas baterias. A primeira bateria fornecerá energia ao motor e ao circuito da ponte H, enquanto que a segunda bateria será utilizada para a alimentação do circuito de controle, câmera de vídeo e

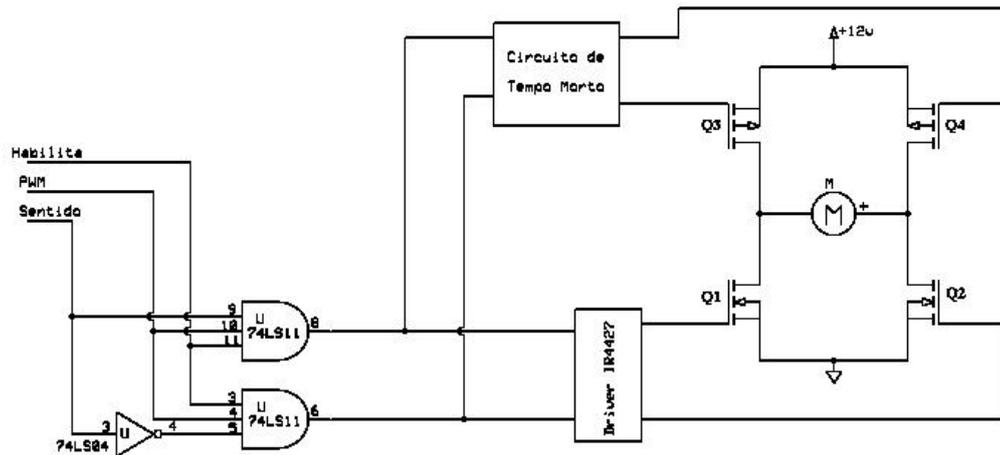


FIGURA 5.8: Diagrama da ponte H

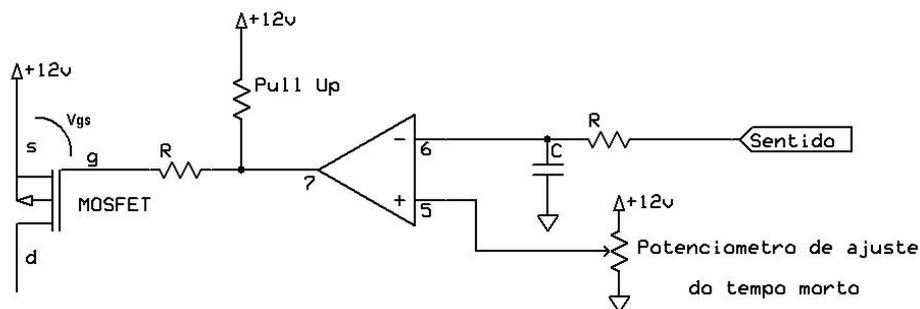


FIGURA 5.9: Circuito de tempo morto

transmissão de dados. Dessa forma o circuito de controle fica totalmente isolado do circuito de potência, uma vez que a ponte H é isolada através de opto-acopladores.

O cálculo da capacidade das baterias foi feito levando-se em conta que o robô deverá operar 5 horas direto sem a necessidade da troca de baterias. Como o motor consome uma corrente máxima de 3A, as baterias escolhidas foram:

1. Bateria I - Bateria selada Ni-Cd de 18Ah
2. Bateria II - Bateria selada Ni-Cd de 2,3Ah

garantindo assim, um funcionamento de 6 horas do robô, sem a necessidade de recarga da bateria.

5.4 Controle de velocidade do motor

Como dito anteriormente a principal função da unidade de processamento II será o controle do motor, para isso, além dos cálculos do controle e do acionamento PWM, ela terá que ler o valor fornecido pelo encoder.

A leitura do encoder é feita diretamente pela unidade de processamento utilizada, no caso um microcontrolador PIC. Os canais A e B são ligados nos pinos de entrada do PIC, que faz uma verificação da mudança nos estados dos pinos a cada $142\mu s$. Esse período de amostragem foi escolhido porque a velocidade máxima do motor será de $15rad/s$, assim o encoder de 2048 pulsos fornece um sinal com frequência de $3276Hz$.

Para que o controle do motor possa ser realizado de maneira correta é preciso, primeiro, levantar a função de transferência do motor, para em seguida definir o controlador que será utilizado, uma vez que o motor selecionado para o projeto não fornece os dados necessários. A seguir tem-se o levantamento experimental da função de transferência do motor, a escolha do controlador e a implementação do mesmo.

5.4.1 Identificação dos parâmetros do motor

O robô irá utilizar um motor de corrente contínua, em geral motores desse tipo são controlados pela tensão aplicada na sua armadura e possuem um circuito equivalente como o da figura 5.10.

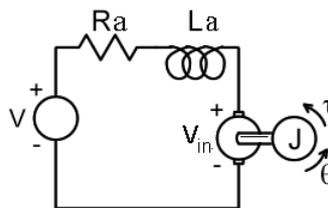


FIGURA 5.10: Circuito equivalente do motor de corrente contínua

Onde R_a é a resistência de armadura, L_a é a indutância de armadura, e_a é a força contra eletromotriz e v_{in} é a tensão de entrada na armadura do motor. A equação do motor que relaciona a corrente de armadura, i_a , com a tensão de entrada, é dada por:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a = v_{in} \quad (5.1)$$

O motor apresenta também a equação de equilíbrio dinâmico:

$$J_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + b_0 \frac{d\theta}{dt} = K_1 i_a \quad (5.2)$$

onde J_0 é a constante de torque do motor.

A força contra eletromotriz em função da posição do motor é dada por

$$e_a = K_2 \frac{d\theta}{dt} \quad (5.3)$$

onde K_2 é a constante de força contra eletromotriz do motor.

Substituindo (5.2) e (5.3) em (5.1) de maneira a eliminar i_a e aplicando a transformada de Laplace:

$$\frac{(sL_a + R_a)(J_0 s^2 \theta(s) + b_0 s \theta(s))}{K_1} + K_2 s \theta(s) = V_{in}(s) \quad (5.4)$$

onde a variável de Laplace s é dada por $s = j\omega + \sigma$.

A função de transferência do motor, relacionando a posição do eixo com a tensão da armadura é dada por:

$$\frac{\theta(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_2}{s(s^2(L_a J_0) + s(R_a J_0 + L_a b_0) + R_a b_0 + K_2 K_1)} \quad (5.5)$$

O valor da indutância de armadura do motor, se comparada com os demais parâmetros do motor, pode ser considerada desprezível. Deste modo a relação entre a tensão na armadura e a posição do eixo do motor pode ser reescrita como

$$\frac{\theta(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_2}{s(s(R_a J_0) + R_a b_0 + K_2 K_1)} \quad (5.6)$$

A relação entre a tensão na armadura e a velocidade do eixo do motor, ω , pode ser obtida diretamente de (5.6), uma vez que essa velocidade é a derivada da posição. Assim tem-se:

$$\frac{\omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K}{sT + 1} \quad (5.7)$$

onde o ganho do motor K é dado por

$$K = \frac{K_2}{R_a b_0 + K_1 K_2}$$

e a constante de tempo T é igual a

$$T = \frac{R_a J_0}{R_a b_0 + K_2 K_1}$$

Portanto, a velocidade do motor, em função da sua tensão de armadura, fica caracterizada por um modelo de primeira ordem com constante de tempo T e ganho K . Basta calcular os valores desses parâmetros, a partir das constantes elétricas e mecânicas do motor, para se ter o modelo.

Esse cálculos, no entanto, nem sempre são possíveis, de serem efetuados, pois alguns dos motores adquiridos no mercado não trás as informações elétricas e mecânicas necessárias para tal. Isso obriga a determinar as valores dos parâmetros K e T do motor de maneira experimental.

Para identificar os parametros do motor dois processos podem ser utilizados:

- Método de resposta ao degrau - Método muito utilizado em sistemas de primeira ordem, sua grande vantagem é a facilidade de aplicação.
- Método de mínimos quadrados - Método mais geral que pode ser aplicados a sistemas discretos de ordens superiores.

A seguir são apresentados os resultados utilizando-se esses dois métodos.

5.4.1.1 Método pela resposta ao degrau

Um sistema de primeira ordem com ganho 1 e constante de tempo T , apresenta o comportamento ilustrado na figura 5.11, quando submetido a um degrau unitário. Nessa figura, estão destacados os instantes correspondentes a 1, 2 e 3 constantes de tempo e os valores de suas amplitudes de saída, respectivamente 63,2%, 86,5% e 95% da amplitude final de saída, no caso, 1.

Os parâmetros de um sistema de primeira ordem desconhecido podem então, ser determinados, experimentalmente, aplicando-se um degrau unitário na sua entrada e

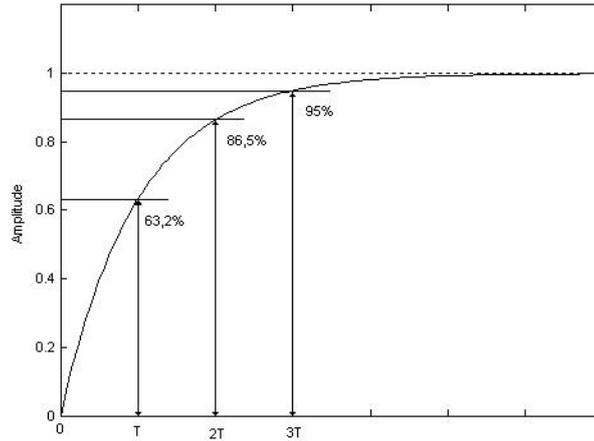


FIGURA 5.11: Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem

medindo-se:

1. A amplitude final de sua saída.
2. O tempo decorrido, a partir da aplicação do sinal de entrada, para a saída alcançar 63,2%, ou 86,5% ou 95% do seu valor final.

Foi aplicado a armadura do motor um degrau de tensão de $8,4v$. A leitura da velocidade foi realizada a cada $3ms$, tempo adequado para o levantamento pretendido.

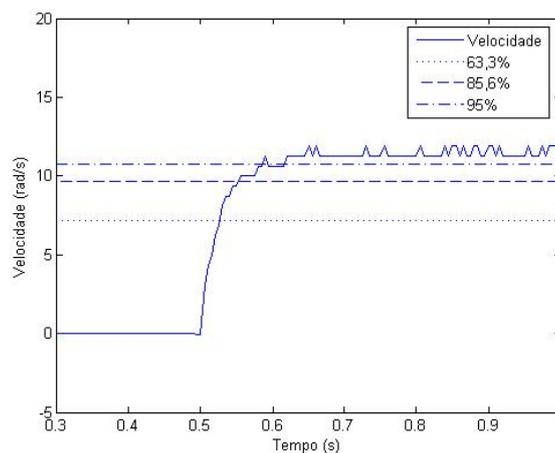


FIGURA 5.12: Resposta ao degrau aplicado no motor de corrente contínua utilizado

Os dados de velocidade e de tempo obtidos, para estas condições, forneceram a resposta ilustrada no gráfico da figura 5.12 e os valores listados na tabela 5.1, onde $\omega_f = 11,3rad/s$ é a velocidade final atingida pelo motor.

Velocidade(ω)		Tempo	
rad/s	ω_f (%)	s	n° de constantes de tempo (T)
7,574	63,2	0,025	1
10,366	85,6	0,055	2
11,385	95	0,086	3

TABELA 5.1: Resultado obtido com a resposta ao degrau aplicado no motor

O valor de T foi calculado usando uma média aritmética das constantes de tempo da tabela 5.1.

$$T = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_i = \frac{0,055 + \frac{0,073}{2} + \frac{0,086}{3}}{3} \cong 0,027 \quad (5.8)$$

Já o ganho K é obtido através do teorema do valor final (Ogata 2003).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = s \lim_{s \rightarrow 0} \Omega(s) \quad (5.9)$$

Onde:

$$\Omega(s) = \frac{K}{Ts + 1} V_{in}(s)$$

Como $\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \omega_f = 11,3$, e $V_{in}(s) = \frac{8,4}{s}$, obtém-se de (5.9):

$$11,3 = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K}{Ts + 1} \frac{8,7}{s}$$

$$K = 1,355$$

Assim a função de transferência do motor é dada por:

$$\frac{\Omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1,355}{0,027s + 1} = \frac{49.63}{s + 36.9} \quad (5.10)$$

Ou seja, um sistema de primeira ordem, estável em malha aberta e com um pólo em -36.9 .

5.4.1.2 Método de Identificação por Mínimos Quadrados

No item anterior fizemos a identificação de um sistema de primeira ordem através da resposta a um degrau. Agora iremos utilizar um método mais geral, que pode ser

aplicado em sistemas de ordem superior (Åström & Wittenmark 1997).

O método dos mínimos quadrados pode ser usado para identificar parâmetros desconhecidos de sistemas discretos como o sistema a seguir:

$$y(k) = -a_1y(k) - \dots - a_ny(k - n + 1) + b_1u(k) + \dots + b_mu(k - m + 1) \quad (5.11)$$

onde os parâmetros a serem identificados são:

$$\theta = \begin{bmatrix} a_1 & \dots & a_n & b_1 & \dots & b_m \end{bmatrix}^T$$

Para isso é preciso achar os valores da matriz θ que minimizam a função perda:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2$$

onde,

$$\epsilon_i = y_{k_i} + a_1y(k_i) - \dots + a_ny(k_i - n + 1) - b_1u(k_i) - \dots - b_mu(k_i - m + 1)$$

Considerando:

$$\Phi = \begin{bmatrix} y(k_1) & \dots & y(k_1 - n + 1) & u(k_1) & \dots & u(k_1 - m + 1) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(k_N) & \dots & y(k_N - n + 1) & u(k_N) & \dots & u(k_N - m + 1) \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_N \end{bmatrix}^T$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_2 & \dots & \epsilon_N \end{bmatrix}^T$$

é possível reescrever a função perda da seguinte forma:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \|\epsilon\|^2$$

onde

$$\epsilon = y - \Phi\theta$$

De acordo com o teorema da solução dos mínimos quadrados retirado de (Åström & Wittenmark 1997), a matriz θ que minimiza a função perda:

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y \quad (5.12)$$

Para que $(\phi^T \phi)$ seja não singular, temos que garantir que a entrada do sistema seja suficientemente rica.

Aplicando este método ao presente caso, o motor DC utilizado no projeto pode ser representado pela função discreta:

$$y(k) = -ay(k-1) + bu(k-1) \quad (5.13)$$

Neste caso os parâmetros a serem estimados são $\theta = \begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}^T$. Aplicando o procedimento geral, temos as matrizes Φ e y :

$$y = \begin{bmatrix} y(2) & y(3) & \dots & y(N) \end{bmatrix}^T \quad \Phi = \begin{bmatrix} -y(1) & u(1) \\ -y(2) & u(2) \\ \vdots & \vdots \\ -y(N-1) & u(N-1) \end{bmatrix}$$

Aplicou-se na entrada uma sequência de pulsos de $8.4v$. A medida da velocidade de rotação do motor foi realizada a cada $5ms$, sendo armazenada logo em seguida. Foi utilizado um número de amostras $N = 700$.

A velocidade $y(k_i)$ e a entrada $u(k_i)$ foram inseridos em um algoritmo que utiliza (5.12) para o cálculo da matriz θ . O resultado obtido foi:

- $a = -0,826$
- $b = 0,229$

Fornecendo assim a equação discreta:

$$y(k) = 0,826y(k-1) + 0,229u(k-1) \quad (5.14)$$

com $h = 0,005s$.

Os dois modelos foram simulados no Matlab e forneceram respostas bastante parecidas com a resposta experimental. O gráfico da figura 5.13 apresenta as respostas dos dois modelos identificados e a resposta experimental obtida.

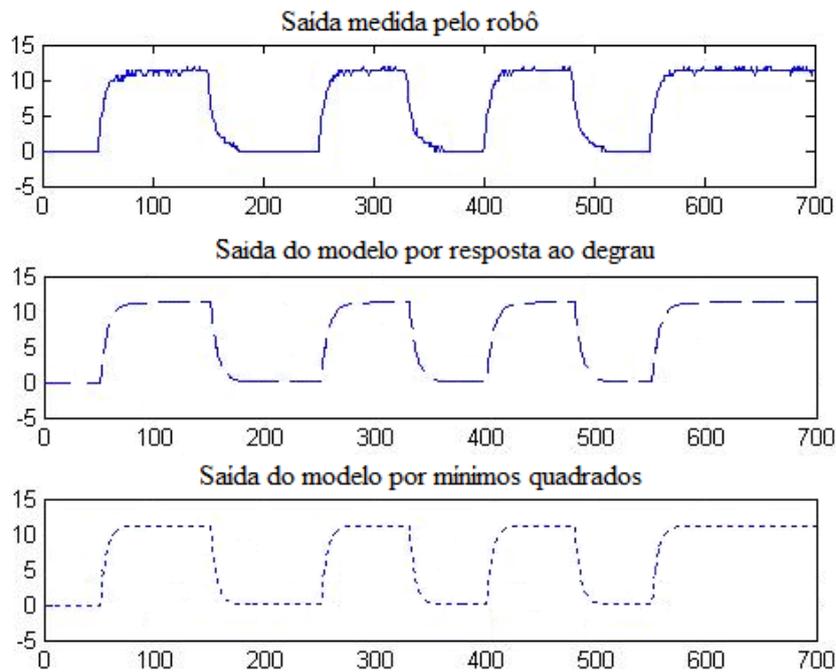


FIGURA 5.13: Comparação entre os dois modelos do motor DC identificados

Para a definição do controlador iremos utilizar o modelo contínuo do motor identificado pelo método de resposta ao degrau.

5.4.2 Controlador de velocidade do motor

Controlar a velocidade de um motor DC é uma tarefa relativamente simples, normalmente esse tipo de controle é feito por um controlador PI. A função que caracteriza um controlador PI é dada por:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} \right) \quad (5.15)$$

Deve-se então escolher valores de K_p e T_r de maneira a garantir que o sistema responda conforme as especificações. No caso é desejável que o sistema tenha um baixo sobre-sinal e um tempo de subida grande, dessa forma evitamos mudanças bruscas de velocidade, o que poderia causar solavancos no robô. Para a escolha dos valores de K_p e T_r , utilizou-se o método de alocação de pólos. Para isso definiu-se uma função característica que garantisse um tempo de subida de dois segundos, o polinômio característico desejado é dado por:

$$A_{cl} = (s + 44)(s + 2) = s^2 + 46s + 88 \quad (5.16)$$

O sistema em malha fechada tem o seguinte polinômio característico:

$$A_0 = s^2 + (36,9 + 48,63K_p)s + 48,63\frac{K_p}{T_r} \quad (5.17)$$

Fazendo $A_{cl} = A_0$ tem-se:

$$48,63\frac{K_p}{T_r} = 88 \quad (5.18)$$

$$36,9 + 48,63K_p = 46 \quad (5.19)$$

Os valores encontrados de K_p e T_r foram:

- $K_p = 0,1871$
- $T_r = 0,1034$

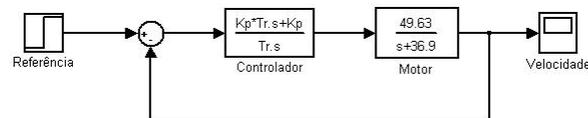


FIGURA 5.14: Controle do motor em malha fechada simulado no MATLAB

Dessa forma o controlador descrito em (5.20) obteve a resposta a uma referência em degrau ilustrada na figura 5.15

$$C_{PI}(s) = 0,1871 \left(1 + \frac{1}{0,1034s} \right) \quad (5.20)$$

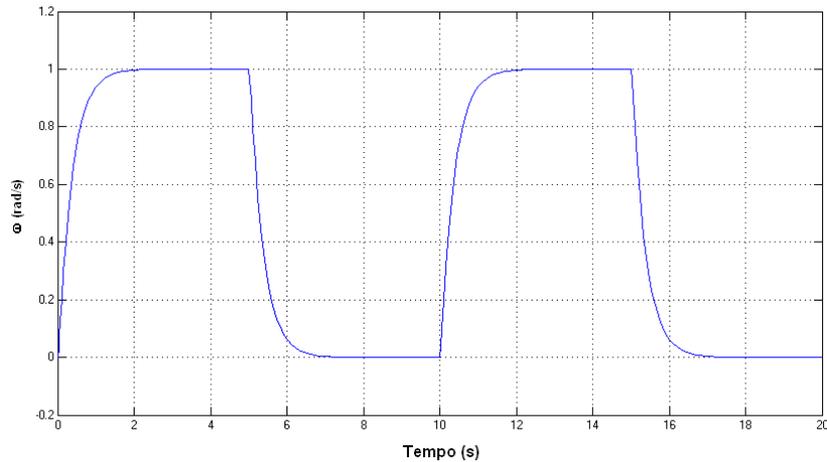


FIGURA 5.15: Simulação da resposta do sistema utilizando o controlador projetado em malha fechada

O sistema em malha fechada com realimentação unitária tem a função de transferência dada por (5.21). O sistema tem coeficiente de amortecimento $\xi > 1$ e pólos em -44 e -2 .

$$G(s) = \frac{9,09s + 88}{s^2 + 46s + 88} \quad (5.21)$$

Segundo (Ogata 2003) para sistemas de segunda ordem em que $\xi > 1$ (sistemas super amortecidos), a existência de dois pólos reais e distantes garantem que o sistema tenha um comportamento semelhante ao de um sistema de primeira ordem, isso porque a exponencial referente ao pólo mais distante do eixo imaginário decai muito mais rápido que a exponencial referente ao pólo mais próximo ao eixo imaginário. Assim é possível aproximar o comportamento desses sistemas com o comportamento de um sistema de primeira ordem com o pólo mais próximo da origem.

5.4.3 Implementação do controlador

O controlador escolhido será implementado na unidade de processamento II, que será um microcontrolador PIC18F452, dessa forma é necessário realizar a discretização do controlador. O primeiro passo para uma discretização eficiente é a escolha do período de amostragem h .

Segundo (Åström & Wittenmark 1997) o período de amostragem de um sistema

com comportamento de um sistema de primeira ordem deve seguir a seguinte regra:

$$h = \frac{T}{N}$$

Onde T é a constante de tempo do sistema e N deve variar entre 4 e 10. No presente caso, a constante de tempo do sistema em malha fechada considerado foi $T = 0,448$, e escolheu-se $N = 10$.

$$h = 0,044s$$

Com o período de amostragem definido, deve-se agora discretizar o controlador. Existem varias técnicas de discretização, optou-se pela utilização da técnica de discretização bilinear, conhecida como Tustin, onde a variável complexa z , dada por $z = e^{sh}$, pode ser aproximada por:

$$z = \frac{1 + (sh/2)}{h - (sh/2)} \quad (5.22)$$

ou

$$s = \frac{2(z - 1)}{h(z + 1)} \quad (5.23)$$

Aplicando essa aproximação no controlador descrito no subitem anterior chega-se a:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0,227z - 0,147}{z - 1} \quad (5.24)$$

Que pode ser reescrito como:

$$u(k) = 0,227e(k) - 0,147e(k - 1) + u(k - 1) \quad (5.25)$$

A partir de (5.25) desenvolve-se o algoritmo da implementação do controlador, que pode ser visto a seguir, onde e_a representa $e(k - 1)$ e u_a representa $u(k - 1)$:

1. Calcular velocidade
2. $e = REF - Vel$
3. $u = 0,23e - 0,15e_a + u_a$

4. $u_a = u$
5. $e_a = e$
6. $u > 0$?
 - (a) SIM - sentido = 1
 - (b) NÃO - sentido = 0
7. $PWM = \frac{100|u|}{12}$
8. Carrega PWM
9. Volta para 1.

A figura 5.16 apresenta um diagrama em blocos do sistema de controle do motor implementado no projeto.

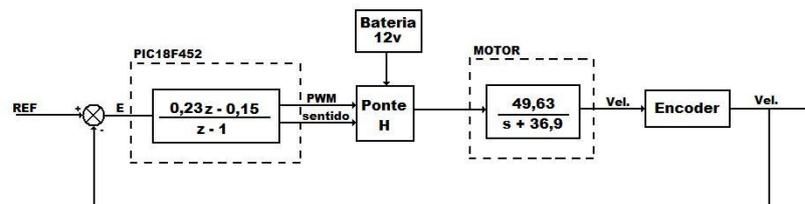


FIGURA 5.16: Diagrama do sistema de controle implementado no projeto

O resultado obtido com o controlador implementado pode ser observado no gráfico da figura 5.17.

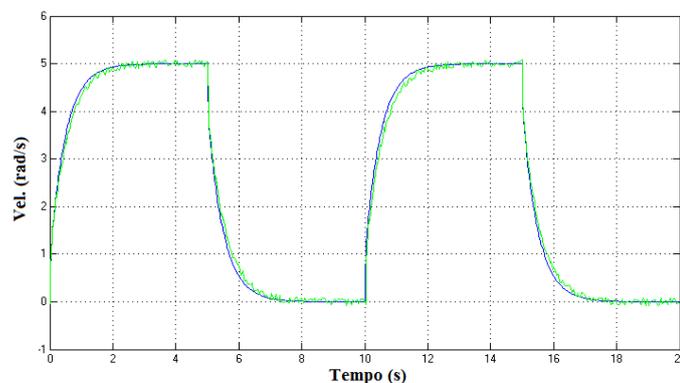


FIGURA 5.17: Comparação entre o resultado obtido e o resultado simulado

5.5 Interface com o usuário

O estação base para controle do robô é formada por um computador portátil, o transmissor RF, o transmissor de vídeo e uma bateria que alimenta os transmissores (figura 5.18).



FIGURA 5.18: Estação base para o controle do robô

Para o controle da velocidade do robô, utilizou-se um programa desenvolvido dentro do ambiente GUI do Matlab e para a visualização das imagens de vídeo, utilizou-se o programa fornecido pelo fabricante do conversor vídeo/USB (figura 5.19).



FIGURA 5.19: Tela do programa desenvolvido para a interface do usuário com o robô

A comunicação com o transmissor RF é feita pela porta serial e o usuário pode,

através do programa, controlar a velocidade de referência do robô e pode desligar ou ligar o motor, ativando ou desativando a ponte H. Na tela é exibido ainda um gráfico com as velocidades medidas pelo o robô. O controle do sentido para o qual o robô se desloca é dado pelo sinal da velocidade de referência, com velocidades positivas o robô se desloca por um sentido e com velocidades negativas ele se desloca pelo sentido contrário. Para garantir um melhor funcionamento do robô, o usuário só pode enviar ao robô velocidades abaixo de $160RPM$.

O programa envia quatro tipos de dados diferentes ao robô e recebe dois tipos de dados diferentes, são eles:

- Comandos enviados ao robô:
 - Desabilita a ponte H - O computador envia para o robô o dado 0xBF
 - Habilita a ponte H - O computador envia para o robô o dado 0xC0
 - Envia velocidade positiva - O computador envia ao robô dois bytes. O primeiro deles 0xC1 para indicar que o dado a seguir é referente ao módulo da velocidade com sinal positivo, e em seguida envia um byte com o módulo da velocidade de referência.
 - Envia velocidade negativa - O computador envia ao robô dois bytes. O primeiro deles 0xC2 para indicar que o dado a seguir é referente ao módulo da velocidade com sinal negativo, e em seguida envia um byte com o módulo da velocidade de referência.
- Dados recebidos pelo computador:
 - Dado de velocidade positiva medida pelo robô - Quando a velocidade medida pelo robô é positiva, o computador recebe do robô dois bytes, o primeiro deles 0xC3 indicando que o próximo byte é o dado referente ao módulo da velocidade medida com sinal positivo, em seguida o computador recebe o dado referente ao módulo da velocidade.
 - Dado de velocidade negativa medida pelo robô - Quando a velocidade medida pelo robô é positiva, o computador recebe do robô dois bytes, o primeiro deles 0xC4 indicando que o próximo byte é o dado referente ao módulo da

velocidade medida com sinal positivo, em seguida o computador recebe o dado referente ao módulo da velocidade.

5.6 Confiabilidade do sistema robótico

Geralmente, um sistema robótica deve possuir um determinado grau de confiabilidade, para garantir o seu funcionamento de forma considerada adequada mesmo em situações inesperadas. Por isso, ele deve ser capaz de identificar e tratar possíveis falhas no seu funcionamento. Conseguir identificar a causa desses erros e decidir a ação a ser tomada para tentar corrigi-los ou reduzir o seu impacto, antes que atinjam grandes proporções, é uma forma de aumentar o grau de confiabilidade desses sistemas.

De acordo com o seu objetivo o sistema, ao identificar uma falha, pode: Funcionar em modo reduzido, sinalizar que existe erro, identificar e corrigir o erro ou desligar preventivamente. Em algumas aplicações, pontos mais críticos são duplicados para evitar que o equipamento pare em caso de defeito nessas partes.

No estudo presente, a confiabilidade do sistema foi direcionada para evitar falhas no seu funcionamento que pudessem ocasionar problemas no sistema onde ele está aplicado. O robô procura, então, corrigir algumas falhas identificadas em seus elementos.

Tais falhas foram separadas em três grupos, para simplificar a sua identificação e a ação corretiva correspondente, conforme visto na figura 5.20.

- Falha no Sistema de Comunicação

Para saber se o sistema de comunicação está funcionando corretamente, a base envia regularmente código para o robô. Se o robô não identificar este código dentro de um intervalo de tempo pré-determinado, a comunicação está com problema. Da mesma maneira, se o robô receber dados inesperados é porque existe problema na comunicação. .

A solução adotada, nesse caso foi reiniciar todo o procedimento de comunicação e verificar se o diálogo entre as duas unidades passa a funcionar corretamente. Em caso afirmativo retorna-se a operação normal. Caso o erro persista, toda a eletrônica é reiniciada , caso o erro ainda persista, desliga-se o robô mantendo-o parado na posição em que se encontra.

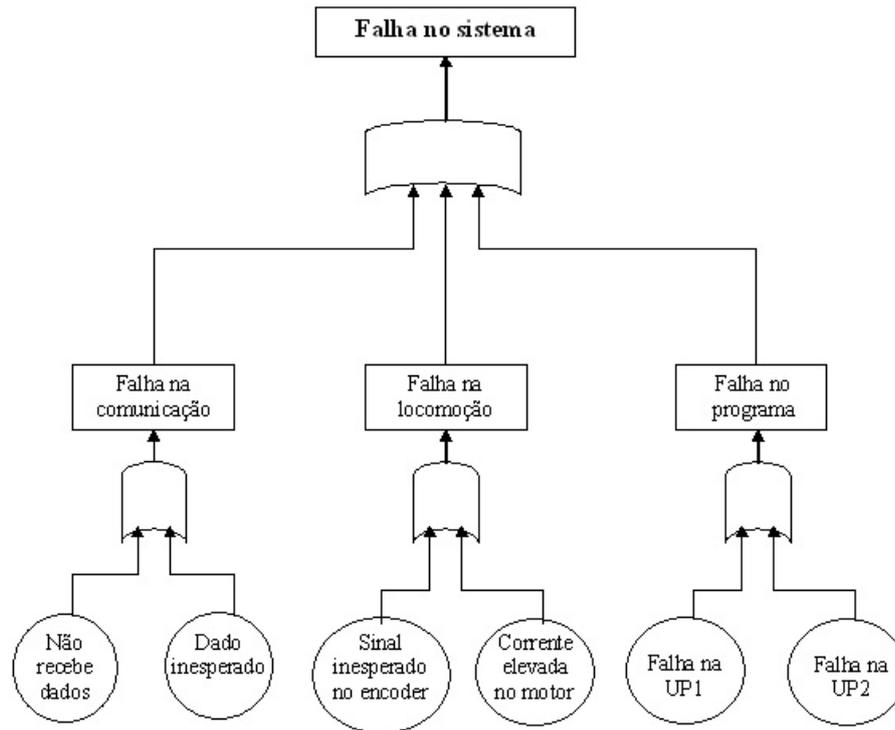


FIGURA 5.20: Árvore de falhas do sistema robótico projetado

- Falha no Sistema de Locomoção

As falhas no sistema de locomoção podem ser identificadas de duas maneiras, a primeira delas, o sensor de corrente instalado no circuito de acionamento do motor acusa uma corrente acima do limite considerado aceitável, indicando problemas na operação do motor. Na segunda, os dados do encoder apresentam valores muito discordantes do aceitável, sinalizando que algum problema está ocorrendo com o motor ou com o próprio sensor.

Para tentar solucionar esse problema, todo o circuito eletrônico de acionamento do motor é reiniciado, e o seu comportamento é testado novamente. Tendo os problemas cessados, retorna-se a operação normal, com os erros continuados o robô é desligado e permanece parado.

- Falha nas Unidades de Processamento

As falhas nas unidades de processamento podem ser identificadas com testes periódicos feitos pela própria unidade. Caso seja constatado algum defeito no procedimento regular implementado, as unidades de processamento são reinici-

adas e um novo teste é realizado. Caso o defeito tenha sido corrigido, volta-se a operação normal, em caso contrário o robô é desligado e permanece parado.

O fluxograma do tratamento de falhas está representado na figura 5.21. Conforme mencionado, pode-se notar nessa figura, que se ao final do tratamento os erros persistirem, o robô será desligado, permanecendo parado na posição em que se encontra, afim de evitar danos ao sistema analisado.

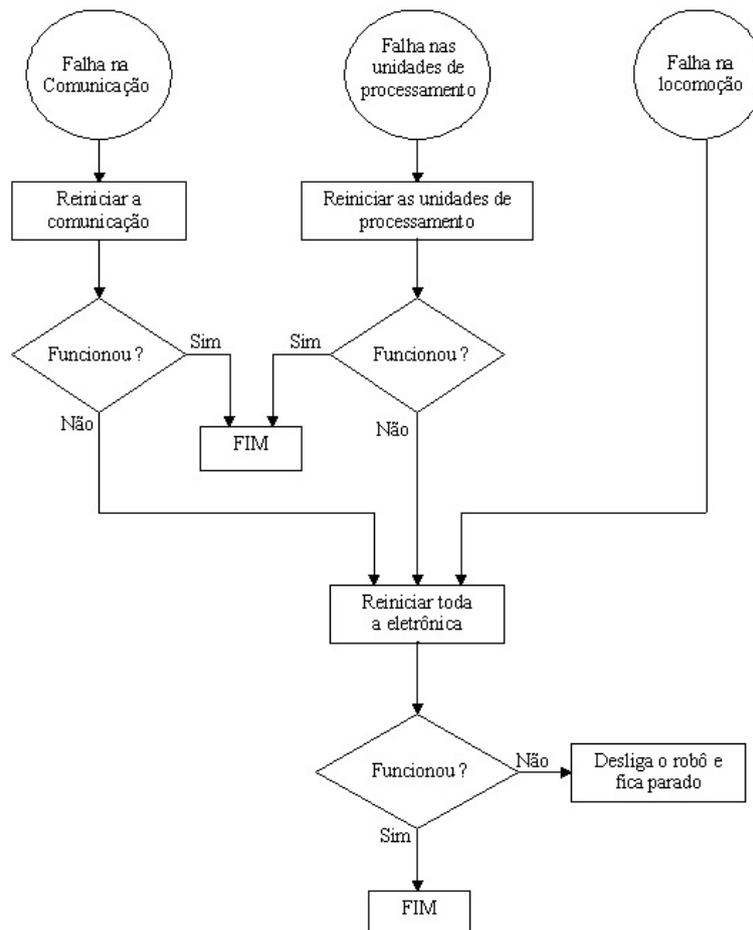


FIGURA 5.21: Fluxograma do tratamento das falhas no robô

Além das falhas que foram mencionadas, os testes em campo irão mostrar se o robô terá algum problema de temperatura do interior do compartimento blindado. Caso os testes indiquem que a temperatura naquele ambiente fique acima de 50° , será preciso controlar a temperatura no interior do robô, evitando assim o mal funcionamento de algum componente da eletrônica embarcada.

5.7 Testes e resultados

Uma vez concluída a construção do protótipo, ele foi submetido a vários testes para verificar o seu desempenho. Esses testes foram divididos em etapas, onde se verificou tarefas distintas que robô deveria atender.

O primeiro teste realizado tratou da comunicação sem fio entre o robô e a base. Ele consistiu em se transmitir uma seqüência de dados conhecida da base para o robô e receber de volta essa seqüência do robô para a base, variando a distância entre as duas unidades. Os resultados mostraram que par transmissor/receptor funcionou corretamente, em distâncias que variaram de poucos metros até 500 metros de distância, sem que se notasse erros nos dados transmitidos e recebidos.

O teste seguinte se preocupou com a movimentação do robô no cabo: partida, parada, variação de velocidade, mudança de sentido de deslocamento e medida da velocidade. O robô foi apoiado em um cabo ACSR de uma polegada esticado em um vão de 100 metros, figura 5.22. A base enviou os comandos correspondentes para a realização do teste.

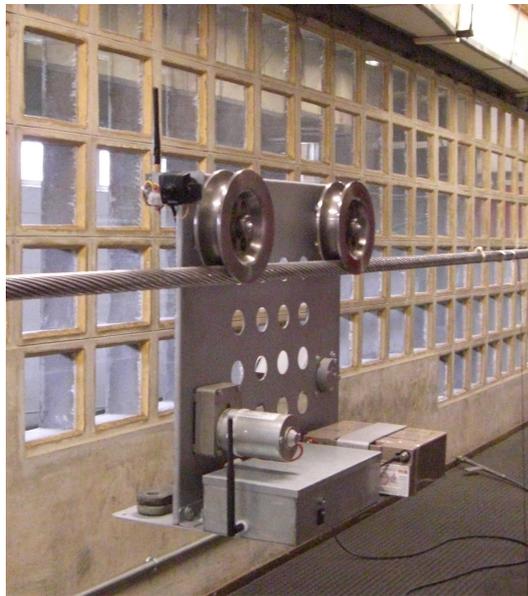


FIGURA 5.22: Teste de movimentação do protótipo desenvolvido para inspeção em linhas de transmissão

O robô respondeu adequadamente a todos os comandos. As mudanças foram executadas prontamente e com suavidade, e a velocidade estipulada foi mantida constante, indicando que o algoritmo de controle implementado estava com seus parâmetros ajus-

tados adequadamente.

Este segundo teste serviu, também, para mostrar que a estrutura mecânica escolhida suportou o peso dos módulos utilizados, e conseguiu ainda deslocar uma carga de $8kg$, representativa de um sensor de inspeção de cabos, encontrando-se em equilíbrio durante as manobras citadas.

O terceiro teste cuidou da inspeção visual do cabo feita por uma câmera de vídeo acoplada na estrutura do robô. As imagens captadas foram enviadas para um receptor localizado na base e mostraram com nitidez a superfície do cabo durante o movimento do robô. Um exemplo de imagem recebida pela base pode ser observado na figura 5.23.



FIGURA 5.23: Cabo condutor visto pela câmera de vídeo do robô

Os dois testes seguintes, de alta tensão e de alta corrente, serviram para verificar a imunidade a interferência eletromagnética da blindagem empregada nos circuitos da eletrônica embarcada. O robô foi colocado em um cabo de linhas de transmissão, inicialmente desenergizado, figura 5.24.

No teste de tensão, o robô transmitia uma forma de onda de acordo com o dado enviado pela base, essa forma de onda era mostrada na tela do computador. Com uma corrente baixa, a tensão no cabo foi, então, aumentada gradativamente até o valor de $100kV$ e o sinal recebido pela base foi continuamente monitorado. Nenhuma mudança foi detectada nas formas de onda, elas permaneceram a mesmo estando o cabo com tensão ou sem tensão. Este teste serviu, também, para verificar que a estrutura do robô não apresentou arcos de tensão entre suas partes, quando submetido a tensões



FIGURA 5.24: Teste de interferência no robô submetido a alta tensão e alta corrente elevadas.

No teste de corrente, o procedimento foi semelhante. Só que agora a tensão permaneceu praticamente nula, e a corrente foi sendo aumentada gradativamente até atingir o valor de 1000A. Como no caso anterior, não houve erro na recepção do sinal enviado do robô para base.

Esses testes mostraram que a blindagem empregada conseguiu evitar satisfatoriamente a interferência eletromagnética em circuitos eletrônicos do robô, permitindo o seu funcionamento em ambientes onde esse tipo de ruído esteja presente, como é o caso de linhas de transmissão.

Estão programados para junho de 2008 os testes a serem realizados em linhas de transmissão. Os testes serão realizados em linhas de 138kV operadas pela CHESF.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho abordou os principais aspectos da construção de um sistema robótico para inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica. Diversos tipos de inspeção foram apresentados e a inspeção de cabos condutores de linhas de transmissão foi enfatizada. Os métodos geralmente empregados nesse tipo de inspeção foram discutidos e, a partir de então, definidos os requisitos de projeto, tanto mecânico quanto elétrico-eletrônico, de um robô controlado remotamente que empregasse alguns desses métodos.

A estrutura mecânica proposta se mostrou versátil, podendo acomodar os módulos e equipamentos necessários para executar a tarefa desejada. Embora não consiga transpor obstáculos, ela atende uma quantidade grande de linhas de transmissão existentes, a sua construção é simples e robusta e tem custo baixo. O estudo e as simulações do efeito do vento sobre essa estrutura realizados indicaram que ela está adequada para as condições encontradas no território brasileiro. Os efeitos de interferência eletromagnética analisados apontaram para uma blindagem da eletrônica empregada que se mostrou altamente eficiente, não sendo detectado nenhum problema no funcionamento dessa eletrônica, quando submetida a campos eletromagnéticos elevados ($100kV$ e $1000A$).

A avaliação de diversos circuitos eletrônicos conduziu a um sistema de eletrônica embarcada com arquitetura em camadas, que possibilitou uma implementação de baixo custo e grande flexibilidade para executar as tarefas desejadas e incluir funções novas, se necessário. Esse sistema permitiu a interação entre camadas, aquisição de sinais provenientes do processo, envio de comandos, comunicação de dados e controle de

dispositivos.

O algoritmo de controle desenvolvido permitiu controlar a velocidade do robô de forma eficiente, mantendo-a estável pelo tempo desejado, e fazer as mudanças de velocidade e de sentido de deslocamento prontamente e de modo suave. Durante os desenvolvimentos, foram implementados circuitos de proteção e apontados procedimentos que visam garantir o funcionamento seguro do robô.

Os resultados experimentais, conseguidos com o protótipo construído, mostraram que o robô foi capaz de realizar a inspeção de cabos de linhas de transmissão, empregando a técnica visual com uma câmera de vídeo acoplada à sua estrutura, comandado remotamente e, ao mesmo tempo, adquirir um sinal de teste conhecido. Esses resultados indicaram que ele poderá utilizar outras técnicas, como a magnética ou de corrente parasita, para fazer a inspeção, empregando os sensores adequados. Os resultados mostraram, também, que o robô executou a inspeção de maneira rápida, segura e eficaz, o que pode trazer redução dos custos envolvidos nesse tipo de serviço.

6.1 Propostas de trabalhos futuros

O robô construído atendeu os requisitos para fazer a inspeção em cabos condutores de linhas de transmissão, apresentando um desempenho satisfatório ao executá-la com rapidez e segurança. No entanto, alguns desenvolvimentos poderiam ser feitos, contribuindo para melhorá-lo ainda mais.

A utilização de sensores de corrosão de cabos de aço acoplado ao robô, por exemplo, permitiria uma inspeção mais precisa das condições dos cabos, sendo uma proposta sugerida. O desenvolvimento de algoritmos computacionais, que conseguissem reconhecer diferentes tipos de falhas, baseado nos sinais dos sensores, e classificá-los segundo uma escala de risco, é outra linha de investigação que desperta interesse.

Estudar uma forma de detectar obstáculos existentes nos cabos e desenvolver mecanismos para o robô e os sensores que sejam acoplados ao cabo ultrapassá-los, autonomamente, formam outra proposta de trabalho de interesse. A análise e implementação de outras técnicas de controle de velocidade e a sua comparação, em termos de desempenho, com aquela empregada é mais uma proposta possível.

Estudar a aplicação do sistema desenvolvido em outras áreas como, petrolífera

e mineração, por exemplo, verificando as adaptações necessárias e a sua viabilidade técnica e econômica é outro trabalho de interesse.

Referências Bibliográficas

- Aracila, R., Pefina, L., Femea, M., Jimneza, L. & Barrientosa, A. (1995), 'Robtet: A new teleoperated system for live-line maintenance', *6th IEEE Int. Conf. on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance* pp. 205–211.
- Åström, K. J. & Wittenmark, B. (1997), *Computer Controlled Systems: Theory and Design*, 3rd edn, Prentice-Hall.
- Ball, S. (2002), *Embedded Microprocessor Systems - Real World Design*, 3rd edn, Butterworth-Heinemann College.
- Berger, A. (2001), *Embedded Systems Design: An Introduction to Processes, Tools, and Techniques*, 1st edn, CMP Books.
- Bishop, R. (2005), *Mechatronics: An Introduction*, CRC.
- Blessmann, J. (1998), *Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento*, 1st edn, Editora da Universidade/UFRGS.
- Campos, M., Pereira, G., Vale, S., Bracarense, A., Pinheiro, G. & Oliveira, M. (2003), 'A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines', *IEEE Transactions on Power Delivery* **18**(4), 1581–1582.
- Cartz, L. (1995), *Nondestructive Testing: Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current*, 1st edn, ASM International.
- Comte, C. & Lacasse, R. (2003), 'Applicability of resistance and temperature measurements for the characterization of full tension compression splices', *IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance* pp. 95–102.
- Crowder, R. (2006), *Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control*, Newnes.
- Ficchi, R. (1971), *Practical design for Electromagnetic Compatibility*, 1st edn, Hayden Book Company.
- Fossum, E. (1997), 'Cmos image sensors: Electronic camera on a chip', *IEEE Transactions on Electron Devices* **44**, 1689–1698.

- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2004), *Fundamentals of Physics*, 7th edn, IE-Wiley.
- Havard, D., Bellamy, G., Buchan, P., Ewing, Horrocks, D., Krishnasamy, S., Motlis, J. & Yoshiki-Gravelsins, K. (1992), ‘Aged ACSR conductors part I - testing procedures for conductors and line items’, *IEEE Transactions on Power Delivery* **7**, 581–587.
- Ishino, R. & Tsutsumi, F. (2004), ‘Detection system of damaged cables using video obtained from an aerial inspection of transmission lines’, *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004* pp. 1857–1862.
- Komoda, M., Kawashima, T., Minemura, M., Mineyama, A., Aihara, M., Ebinuma, Y., Kanno, T. & Kiuchi, M. (1990), ‘Electromagnetic induction method for detecting and locating flaws on overhead transmission lines’, *IEEE Transactions on Power Delivery* **5**(3), 1484–1490.
- Kreith, F. & Berger, S. (1999), *Fluid Mechanics*, 1st edn, CRC Press.
- Li, T., Lijin, F. & Hongguang, W. (2004), ‘Development of an inspection robot control system for 500kV extra-high voltage power transmission lines’, *SICE Annual Conference in Sapporo* pp. 1819–1824.
- Litzenberger, G. (2007), World robotics, in ‘World Robotics Press Conference, october, 2007’.
- Maruyama, Y. (2000), ‘Robotics applications for hot-line maintenance’, *Industrial Robot: An International Journal* **27**(5), 357–365.
- Montambault, S. & Pouliot, N. (2003), ‘The HQ linerover: contributing to innovation in transmission line maintenance’, *IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance* **6**, 33–44.
- Montambault, S. & Pouliot, N. (2006), ‘Linescout technology: Development of an inspection robot capable of clearing obstacles while operating on a live line’, *IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006* .
- Moran, M., Shapiro, H., Munson, B. & DeWitt, D. (2002), *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*, 1st edn, John Wiley & Sons.
- Moscato, L., de Souza, A., Santos, M., Filho, W. V., Ferreira, G. & Ventrella, A. (2003), Inspection robot for high-voltage transmission lines, in ‘ABCMS Symposium Series in Mechatronics’, Vol. 1, pp. 1–7.
- Ogata, K. (2003), *Engenharia de Controle Moderno*, 4th edn, Prentice-Hall.
- OhmStik (2006), *OhmStik - Operators Manual*, Sensorlink Corporation. Manual do equipamento.

- Oliveira, V. & Lages, W. (2007), Comparação entre duas classes de robôs bracejadores subatuados utilizando controle preditivo baseado em modelo, *in* ‘VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, outubro de 2007, Florianópolis, Brasil’.
- ONS (2006), *Dados relevantes 2006: operação do Sistema Interligado Nacional*, ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- Paul, C. (2006), *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2nd edn, John Wiley & Sons.
- Rosário, J. (2005), *Princípios de Mecatrônica*, 1st edn, Pearson Brasil.
- Ryam, H. M. (1994), *High voltage engineering and testing*, 1st edn, The Institution of Electrical Engineers.
- Sawada, J., Kusumoto, K., Maikawa, Y., Munakata, T. & Ishikawa, Y. (1991), ‘A mobile robot for inspection of power transmission lines’, *IEEE Transactions on Power Delivery* **6**, 309–315.
- Siciliano, B. & Sciavicco, L. (2000), *Modelling and Control of Robot Manipulators*, 2nd edn, Springer.
- SiRF (2005), *NMEA Reference Manual*, SiRF Technology Inc.
- Snell, J. & Renowden, J. (2000), ‘Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines’, *IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings* pp. 135–144.
- Tsui, J. (2000), *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach*, 1st edn, John Wiley & Sons.
- Ventrela, A., Moscato, L., de Souza, A., dos Santos, M., Filho, W. V. & Ferreira, G. (2003), ‘Robô móvel aplicado à inspeção em linhas de transmissão’, *Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica* **1**, 1015–1020.
- Weischedel, H. (1985), ‘The inspection of wire ropes in service: A critical review’, *Materials Evaluation* **43**(13), 1592–1605.
- Weischedel, H. (1998), ‘Electromagnetic wire rop inspection - resolution is important’, *Materials Evaluation* **56**(11), 1297–1301.
- Zhou, F., Wang, J., Li, Y. & Xiao, H. (2005), ‘Control of an inspection robot for 110kv power transmission line based on expert system design methods’, *IEEE Conference on Control Applications* **28**, 1563–1568.