

ROGÉRIO SALES GONÇALVES

**ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR FIO COM PERNAS
DE COMPRIMENTOS VARIÁVEIS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2006

ROGÉRIO SALES GONÇALVES

**ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR FIO COM PERNAS DE
COMPRIMENTOS VARIÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho

UBERLÂNDIA – MG

2006

FICHA CATALOGRÁFICA

G635r Gonçalves, Rogério Sales, 1981-
 Robô móvel suspenso por fio com pernas de comprimentos variáveis /
 Rogério Sales Gonçalves. - 2006.
 116f. : il.
 Orientador: João Carlos Mendes Carvalho.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
 grama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
 Inclui bibliografia.
 1. Robótica - Teses. I. Carvalho, João Carlos Mendes. II. Universida-
 de Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 Mecânica. III. Título.

CDU: 681.3:007.52

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho pelas suas importantes observações, espírito inovador e motivador capaz de despertar o gosto por desafios e pela pesquisa que, ao longo de todos estes anos, além de um excelente orientador demonstrou-se um grande amigo.

À minha noiva, Ana Paula Mázaró Cangâni, pelo incentivo, amor e carinho demonstrado ao longo de todo este trabalho.

Ao jovem Engenheiro Marcio Taschelmayer pela sua ajuda na confecção do hardware e software de controle dos motores passos.

A Capes pelo apoio Financeiro.

A todos os professores do curso de graduação e pós-graduação em Engenharia Mecânica pela minha formação ética e acadêmica.

Finalmente agradeço a todos que de uma forma ou de outra ajudaram na confecção desta dissertação.

SUMÁRIO

RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvii
 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. Considerações Preliminares.....	1
 CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Robôs Montados em Plataformas Terrestres.....	8
2.3. Robôs Móveis Suspensos por Fios.....	11
2.4. Conclusões.....	20
 CAPÍTULO 3 – ANÁLISE CINEMÁTICA DO ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR	
 FIO, COM PERNAS IGUAIS	23
3.1. Introdução.....	23
3.2 Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas Iguais.....	24
3.3 Mecanismo Biela-Manivela-Deslizante.....	26
3.4 Análise Cinemática de um Par de Pernas de Mesmo Comprimento.....	29
3.4.1. Análise Cinemática da Perna Esquerda.....	31
3.4.2. Análise Cinemática da Perna Direita.....	33
3.5. Análise Cinemática do Robô.....	34
3.6. Conclusões.....	38

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DO ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR FIO, UTILIZANDO- SE DE PERNAS DE COMPRIMENTOS DIFERENTES..... 39

4.1. Análise Cinemática do Robô com Pernas de Comprimentos Diferentes.....	39
4.1.1. Análise do Par de Pernas de Comprimentos Diferentes.....	42
4.2. Simulações Numéricas do Robô com Pernas de Comprimentos Diferentes.....	57
4.3. Conclusões.....	60

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA PARA TRANSPOSIÇÃO DE OBSTÁCULOS.....65

5.1. Metodologia para Transposição de Obstáculo.....	65
5.2. Função de Variação do Comprimento das Pernas.....	75
5.3. Simulações Numéricas.....	76
5.3.1. Transposição de Obstáculo que não causa colisão com o pé do robô.....	76
5.3.2. Transposição de obstáculo com uma colisão e este não ocupando a posição de retorno do pé.....	77
5.3.3. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo não ocupando a posição de retorno do pé.....	79
5.3.4. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé.....	81
5.3.5. Transposição para condições em que ocorrem várias colisões.....	85
5.3.6. Caso particular – Obstáculo posicionado ao lado do pé do robô.....	86
5.4. Conclusões.....	87

CAPÍTULO 6 - ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR FIO COM PERNAS VARIÁVEIS – PROJETO E SIMULAÇÃO.....89

6.1. Robô com Pernas Iguais.....	89
6.2. Descrição Geral do Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas Variáveis.....	91
6.2.1. Estrutura Mecânica do Robô.....	91
6.2.2. Sistema de Controle.....	94
6.3. Simulação Gráfica do Robô com Pernas de Comprimentos Variáveis.....	95

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES.....	97
7.1. Conclusões.....	97
7.2. Sugestões de Temas Para Pesquisas Futuras.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	101
ANEXOS.....	107

GONÇALVES, R. S. **Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas de Comprimentos Variáveis**. 2006. 116f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Vários estudos teóricos e experimentais têm sido realizados com o objetivo de desenvolver equipamentos autônomos para a inspeção e manutenção de linhas de transmissão tanto elétricas como de telecomunicações, permitindo não só aumentar a eficiência do processo, mas também reduzir o perigo de acidentes com os funcionários que executam a tarefa. Este tipo de atividade é perfeitamente adequado para os robôs móveis devido a sua capacidade de se locomoverem evitando os obstáculos existentes nos cabos. Cabe salientar que existem diversos dispositivos que podem ser utilizados na manutenção e inspeção dos cabos. Entretanto, eles não dispõem de estabilidade e habilidade adequadas e não são autônomos. Nesta dissertação é apresentado um robô móvel suspenso por fio capaz de locomover-se ao longo de cabos de alta tensão ou de telecomunicações, sendo constituído de quatro pernas de comprimentos variáveis. Este robô é capaz de ultrapassar alguns tipos de obstáculos existentes sobre o fio, independente da posição do obstáculo sobre o fio (limitado às dimensões do projeto do robô). Nesta dissertação foi realizado seu estudo cinemático e foi proposta uma metodologia para transposição dos obstáculos, baseada na colisão do pé do robô com o obstáculo. Simulações numéricas, gráficas e testes práticos permitiram validar o modelo.

Palavras Chave: Robôs Móveis, Robôs com Pernas, Robôs de Inspeção, Linhas de Transmissão.

GONÇALVES, R. S. **A Mobile Robot Suspended by Wire with Variable Length Legs.** 2006. 116f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Some theoretical and experimental studies have been developed in order to produce independent equipment for inspection and maintenance of electric power and telecommunication transmission lines, increasing the process efficiency and reducing the risk of accidents with the employees who execute the task. This activity suits mobile robots because they are able to move avoiding existing obstacles on the cables. This study presents a mobile robot suspended by wire that is able to move along electric power and/or telecommunication transmission lines. Due to its variable length legs, it can avoid different types of obstacles placed at any position on wire, and for being suspended, your stability is guaranteed. The analyzed robot is constituted by a body and four legs with variable lengths. In this dissertation its kinematic model is presented and it has been proposed a methodology to enable the obstacle transposition. The study of the obstacles transposition is defined from the collision of the robot foot with the obstacle. Numerical, graphical simulation and experimental test results are presented to validate the proposed model.

Keywords: Mobile Robots, legged Robots, Inspection Robots, Transmission Lines.

LISTAS DE FIGURAS

2.1. Sinalização de advertência – esfera de sinalização aérea.....	6
2.2. Instalação de esferas de sinalização com o auxílio de helicóptero.....	6
2.3. Instalação de esferas de sinalização por um eletricitista sobre o cabo.....	7
2.4. TOMCAT (http://66.203.92.5/projectexamples/cc_product_design/tomcat.htm).....	8
2.5. Robô com dois braços para manutenção de linhas de alta tensão – Fase I e II (MARUYAMA, 2000).....	9
2.6. Sistema de manipulação (YOKOYAMA et al., 1993).....	9
2.7. Esquema do manipulador (YOKOYAMA et al., 1993).....	10
2.8. Robô ROBTET (http://cela.disam.etsii.upm.es/robotica/proyectos/robtet/).....	10
2.9. a) Sistema Completo; b) Plataforma Manipuladora (FAUCHER et al., 1996).....	11
2.10. Robô Móvel Suspenso por Fio (AOSHIMA; TSUJIMURA; YABUTA, 1989).....	12
2.11. Etapas de transposição de obstáculos em cabos de telecomunicação. a) transposição de poste; b) transposição de terminal de conexões telefônicas (AOSHIMA; TSUJIMURA; YABUTA, 1989).....	12
2.12. Robô Móvel Suspenso por Fio. a) Estrutura do robô; b) Transposição da Torre (SAWADA; KUSUMOTO; MUNAKATA, 1991).....	13
2.13. Robô Móvel dotado de pernas com mecanismo biela-manivela deslizante. (TSUJIMURA; YABUTA; MORIMITSU, 1996) (TSUJIMURA; MORIMITSU, 1997).....	14
2.14. Robô suspenso para remoção de gelo em cabos (MONTAMBAULT; CÔTÉ; LOUIS, 2000).....	14
2.15. Esquema e fase para instalação de esferas de sinalização proposto por RUAUX (1995).....	15
2.16. Configuração do mecanismo para transposição de torres proposto por Souza et al. (2006).....	16
2.17. Protótipo do robô proposto por SOUZA, et. al. (2006).....	16
2.18. Robô Móvel para manutenção de cabos de alta tensão de ferrovias. a) Esquema mecânico; b) Estratégia para transposição de obstáculos (KOBAYASHI; NAKAMURA; SHIMADA, 1991).....	17
2.19. Protótipo do robô móvel suspenso por fio proposto por ZHOU et al. (2005).....	18
2.20. Modelo do sistema robótico proposto (ROCHA, SEQUEIRA, 2004).....	18

2.21. Robô móvel : a) Transposição de obstáculos; b) Trajetórias possíveis (ROCHA, SEQUEIRA, 2004).....	19
2.22. Protótipo do robô móvel suspenso por fio apresentado por CAMPOS et al. (2003).....	20
3.1 Configuração geral do robô suspenso por fio com pernas iguais.....	25
3.2 Esquema da vista lateral do robô móvel e seus parâmetros.....	25
3.3. Parâmetros do mecanismo biela-manivela deslizante.....	26
3.4. Fases de movimentação de um par de pernas. Em preto: perna direita; em vermelho: perna esquerda.....	30
3.5. Parâmetros do mecanismo da perna esquerda.....	31
3.6. Parâmetros do mecanismo da perna direita.....	33
3.7. Análise de um passo.....	34
3.8. Trajetória do Centro de Massa para 1 ciclo do robô com pernas iguais. ($c = 330\text{mm}$, $r = 50\text{mm}$, $a = 80\text{mm}$).....	37
4.1. Esquema da Vista Lateral do Robô com pernas de comprimentos diferentes.....	40
4.2 Fases de movimento de um par de pernas quando os comprimentos são diferentes.....	41
4.3. Parâmetros de um par de pernas de comprimentos diferentes, com a perna maior fazendo o voleio.....	42
4.4. Parâmetros de um par de pernas de comprimentos diferentes, com a perna maior aproximando-se do fio.....	44
4.5. Referencial Auxiliar CX_1Z_1 , sobre o pé C da perna maior.....	45
4.6. Parâmetros de um par de pernas de comprimentos diferentes, com a perna menor fazendo o voleio.....	46
4.7. Parâmetros do par de pernas, quando a perna menor está aproximando-se do fio.....	48
4.8. Determinação do deslocamento geral do robô definidos por x_{cm} e z_{cm}	54
4.9. Trajetórias do Centro de Massa ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c=330\text{mm}$).....	58
4.10. Trajetórias do Centro de Massa ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c=330\text{mm}$).....	59
4.11. Trajetórias dos pés do robô ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c=330\text{mm}$).....	60
4.12. Trajetórias dos pés ultrapassando obstáculos ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c=330\text{mm}$).....	61
4.13. Comportamento não desejável para relações diferentes das não ótimas ($a= 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$, $c = d = 390\text{mm}$).....	62
4.14. Detalhe ampliado do comportamento não desejável, da Figura 4.13.....	62
5.1. Representação 3D do Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas de comprimentos	

Variáveis.....	66
5.2. Esquema da Vista Lateral do Robô Móvel com Pernas de comprimentos Variáveis.....	66
5.3. (a) Pernas no início do movimento, referencial sobre o pé C; (b) pé C começa a movimentação acima do fio.....	67
5.4. Processo de transposição de obstáculo.....	69
5.5. Procedimento para o cálculo do raio do obstáculo e do seu centro após uma segunda colisão.....	70
5.6. Processo de transposição de obstáculos, caso de duas colisões.....	72
5.7. Situação em que o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé quando a perna está com seu comprimento normal.....	73
5.8. Procedimento para correção do comprimento da perna no caso do obstáculo ocupar a posição de retornar do pé.....	74
5.9. Transposição de um obstáculo que não causa colisão ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $c = d = 0,33m$).....	76
5.10. Transposição de obstáculo com uma colisão e este não ocupando a posição de retorno do pé. ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $c = 0,33m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03m$).....	77
5.11. Variação do comprimento da perna em função do ângulo θ para a transposição com uma colisão e o obstáculo não ocupando a posição de retorno normal do pé.....	78
5.12. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo não ocupando a posição de retorno do pé. ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $c = 0,33m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03m$).....	80
5.13. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,04m$).....	81
5.14. Transposição de obstáculo com três colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé para o caso em que d_{fm} fosse obtido com $z_c = R$ ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03m$).....	82
5.15. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,04m$).....	83
5.16. Variação dos comprimentos das pernas em função do ângulo θ	84
5.17. Transposição para condições em que ocorrem várias colisões. ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03m$).....	85
5.18. Caso particular – Obstáculo posicionado ao lado do pé do robô.....	86

5.19. Detalhe da Figura 5.18, obstáculo posicionado ao lado do pé do robô.....	87
6.1. Modelo 3D do Robô com Pernas Iguais.....	90
6.2. Protótipo do Robô com Pernas Iguais.....	90
6.3 Protótipo do robô móvel suspenso por fio transpondo um obstáculo no fio.....	91
6.4. Modelo 3D do Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas Variáveis. (a) Vista isométrica; (b) Vista Frontal.....	92
6.5. Protótipo do robô móvel suspenso por fio com pernas de comprimentos variáveis.....	93
6.6. Transposição de obstáculo. a) posição inicial com os quatro pés sobre o fio; b) início do movimento, pés direitos iniciam a trajetória fora do fio; c) pés direitos começam a retornar ao fio, ocorre a colisão; d) a manivela de entrada retorna de $\Delta\theta$; e) a perna do robô tem seu comprimento variado para transpor o obstáculo; f) os pés direitos retornam ao fio, simultaneamente com o encolhimento das pernas direitas; g) os quatro pés estão em contato com o fio com o comprimento normal ($a = 80mm$, $r = 50mm$, $c = 330mm$, $\Delta c = 30mm$, $\Delta\theta = 5^\circ$).....	96

LISTAS DE TABELAS

3.1. Fases de movimentação do pé direito em função do ângulo de entrada.....	30
4.1. Ciclo completo de um par de pernas em função do ângulo de entrada.....	41
6.1. Característica do motor passo utilizado no Robô Móvel com Pernas Variáveis.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

a	medida do segmento OB
A	ponto de união entre a manivela OA e a biela AC
AB	segmento entre os pontos A' e B
AC'	segmento representativo da perna menor do robô
AB	segmento entre os pontos A e B
AC	segmento representativo da perna maior do robô
c	comprimento da perna menor do robô
C	ponto corresponde ao pé do robô da perna maior
C'	ponto corresponde ao pé do robô da perna menor
CXZ	referencial cartesiano XZ posicionado no pé C'
CX_1Z_1	referencial auxiliar
d	comprimento da perna maior do robô
d_f	comprimento final da perna
d_{fm}	comprimento da perna após o cálculo do raio do obstáculo
d_i	comprimento inicial da perna
d_{xf}	comprimento da perna correspondente a coordenada x_f
O	ponto representativo do centro de massa do robô
OA	manivela de entrada direita
OA'	manivela de entrada esquerda
$OABC$	mecanismo biela-manivela-deslizante direito
$OA'BC'$	mecanismo biela-manivela-deslizante esquerdo
OXZ	referencial cartesiano XZ posicionado no ponto O
p_{oc}	deslocamento do centro de massa do robô quando a perna menor está em contato com o fio
p_{ol}	deslocamento do centro de massa do robô quando a perna maior está em contato com o fio
p_{pc}	passo da perna menor

p_{pl}	passo da perna maior
q	coeficiente da equação de primeiro grau que define a variação do comprimento da perna
r	valor correspondente ao comprimento das manivelas de entrada
R	valor do raio do obstáculo
s	coeficiente da equação de primeiro grau que define a variação do comprimento da perna
x_O	posição do centro de massa na direção de x para o pé C em contato com o fio
x_P	posição dos pés do robô na direção de x
x_{cm}	posição do centro de massa do robô na direção de x
x_f	posição de retorno do pé para quando o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé
x_m	valor da coordenada em x do centro do obstáculo
x_C'	coordenada da posição do pé do robô, ponto C' , na direção de x
z_C'	coordenada da posição do pé do robô, ponto C' , na direção de z
x_C	coordenada da posição do pé do robô, ponto C , na direção de x
z_C	coordenada da posição do pé do robô, ponto C , na direção de z
x_O'	posição do centro de massa na direção de x para o pé C' em contato com o fio
z_O'	posição do centro de massa na direção de z para o pé C' em contato com o fio
$x_{oinicial}$	distância, ao longo do fio, da origem do referencial ao ponto O
z_O	posição do centro de massa na direção de z para o pé C em contato com o fio
z_{cm}	posição do centro de massa do robô na direção de z
z_P	posição dos pés do robô na direção de z

Letras gregas

α	ângulo auxiliar
β	ângulo auxiliar
θ	ângulo de entrada do movimento
θ_0	ângulo correspondente aos dois pés do robô em contato com o fio para pernas com comprimentos diferentes
θ_f	ângulo final
θ_i	ângulo inicial
θ_m	ângulo correspondente a posição do centro do obstáculo colocado no fio
σ	parâmetro binário representativo do contato do pé com o fio ou não
ϕ	ângulo auxiliar
ϕ'	ângulo auxiliar
$\Delta\theta$	ângulo de retorno da manivela de entrada

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações preliminares

Com a evolução da sociedade moderna e o desenvolvimento dos grandes centros urbanos a demanda por energia elétrica aumentou com a necessidade de instalação de milhões de linhas de transmissão de energia. Muitas destas linhas estão instaladas em alturas superiores a 150 metros por torres de aço, devendo possuir sinalização adequada e regulamentada por normas específicas para cada país. Estas sinalizações podem variar desde esferas, utilizadas na sinalização diurna, até balizadores utilizados na sinalização noturna. Os equipamentos de sinalização são alocados nas linhas de transmissão sobre rodovias, dutos, rios, lagos, ferrovias, aeródromos e helipontos que normalmente servem como referência para vôo visual. Estes equipamentos necessitam de manutenção como: reparos, limpeza, trocas ou a instalação de novos dispositivos.

Vários estudos teóricos e experimentais têm sido realizados com o objetivo de desenvolver equipamentos autônomos para a inspeção e manutenção de linhas de transmissão tanto elétricas como de telecomunicação, permitindo não só aumentar a eficiência do processo mas também reduzir o perigo de acidentes com os funcionários que executam a tarefa. Este tipo de atividade é perfeitamente adequado para os robôs móveis devido sua capacidade de se locomover evitando os obstáculos existentes nos cabos.

Um robô móvel pode ser visto como sendo um robô que tem uma mobilidade em relação ao ambiente em que está inserido. Ele pode ser classificado considerando vários aspectos tais como: a habilidade de locomoção no ambiente (para ambientes internos ou externos); tipo de locomoção (com rodas, pernas ou esteiras); tipo de direcionamento (síncrono, tipo Ackerman, etc.); flexibilidade do corpo (corpo único, multicorpos flexíveis ou rígidos); finalidade de uso (para ensino, pesquisa, robôs de serviço, etc.); forma

(antropomórfico, tipo inseto, etc.); ambiente que está inserido (espacial, submarino, etc.) e nível de autonomia (teleoperado, totalmente autônomo, etc.) (KELLY, 1996).

Alguns estudos já realizados demonstram que os robôs que se movimentam sobre rodas não são adequados devido à dificuldade de transposição dos obstáculos existentes nos cabos (grampos, emendas, caixas de ligação para cabos telefônicos, etc.). O uso de esteiras atende aos requerimentos impostos às operações. Porém, seu controle e estabilidade não são simples de serem resolvidos (AOSHIMA; TSUJIMURA; YABUTA, 1989). Dentre as diversas arquiteturas de robôs móveis suspenso por fio existentes atualmente, verificou-se que todas elas possuem problemas como: controlabilidade, estabilidade e versatilidade.

Os robôs móveis providos de pernas são mais versáteis do que os robôs com rodas e/ou esteiras e podem se movimentar evitando os obstáculos e, no caso de ser suspenso, o seu próprio peso auxilia no seu equilíbrio. Assim estudos tem sido realizados com o intuito de construir um robô que permita a transposição de qualquer tipo de obstáculo presente no fio, independentemente de sua posição, que apresente alta estabilidade, alta versatilidade bem como baixa complexidade de controle.

Neste trabalho são apresentados os resultados do estudo de um robô móvel suspenso por fio para ser utilizado na manutenção de linhas de energia e/ou de telecomunicações. Este robô tem a capacidade de transpor alguns tipos de obstáculos, como por exemplo grampos e esferas de sinalização, independentemente de sua posição e que seja de fácil controle.

O texto está assim organizado: no capítulo 2 está apresentada uma revisão, abordando as formas convencionais de realizar a manutenção em cabos de alta tensão, os robôs móveis existentes e suas aplicações em manutenção/instalação de redes, assim como suas vantagens e desvantagens.

O capítulo 3 descreve a origem do mecanismo da perna do robô em estudo e sua análise cinemática. É realizada a análise cinemática para o robô constituído de pernas iguais com o objetivo de verificar o comportamento da trajetória da sua plataforma, verificando sua estabilidade.

No capítulo 4 é realizado o estudo do robô com pernas diferentes e de comprimentos fixos. É verificado o comportamento da trajetória da sua plataforma e das trajetórias dos seus pés, assim como a transposição de obstáculos.

O capítulo 5 apresenta a análise cinemática do robô com pernas de comprimentos variáveis. É realizado o estudo do comportamento do robô quando da transposição de obstáculos sobre o fio. É apresentada também a metodologia para transposição dos obstáculos baseada na colisão do pé do robô com o obstáculo. Simulações numéricas e gráficas são apresentadas com o objetivo de comprovar a validade da metodologia desenvolvida.

No capítulo 6 é apresentado o protótipo do robô construído possuindo pernas iguais bem como o resultado de um teste experimental com o robô ultrapassando um obstáculo. Neste capítulo também é apresentado o projeto do robô com pernas variáveis, suas características dimensionais, seu sistema de controle e uma simulação gráfica do robô proposto ultrapassando um obstáculo, aplicando a metodologia proposta no capítulo 5.

As principais conclusões desta dissertação são apresentadas no capítulo 7. Neste capítulo são incluídas também as sugestões de temas para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

Neste capítulo serão analisados diversos equipamentos desenvolvidos para manutenção de cabos de alta tensão e de telecomunicação, suas características, vantagens e desvantagens. Além disso, são apresentadas considerações sobre as formas usuais de manutenção de cabos de alta tensão.

Inúmeras são as tarefas necessárias de manutenção de cabos de alta tensão e/ou de telecomunicações tais como a inspeção detalhada dos cabos, visualizando a integridade física e mecânica quanto aos defeitos e descargas atmosféricas, verificando a necessidade de manutenção de emergência ou programada; inspeção visual dos cabos condutores; espaçadores; isoladores de porcelana ou de vidro; torres; instalação ou troca de esferas de sinalização aérea no cabo com a linha ligada; serviços de emenda do cabo; limpeza; reparos e instalações de novas linhas, entre outras.

Novas abordagens estão sendo pesquisadas em todo mundo para automatizar o processo de inspeção e manutenção em linhas de transmissão. Os principais avanços incluem a identificação e mapeamento dos locais onde possam existir falhas em cabos, através de equipamentos de GPS (Global Positioning System), utilização de câmeras sofisticadas para visualizar imagens, utilização de sensores e equipamentos de aquisição de dados, processamento das imagens obtidas por sensores através de software e, por fim, a aplicação de robôs (RUBIN,2000).

Dentre as tarefas destaca-se a instalação de novos equipamentos de sinalização ou sua manutenção como, por exemplo, as esferas de sinalização aérea. Estas sinalizações são instaladas seguindo normas específicas para cada país. No Brasil, a norma que regulariza a instalação da sinalização de advertência aérea é a NBR 7276 (NBR 7276, 1993). A Figura 2.1 apresenta um tipo de sinalização utilizada em cabos por meio de esferas.



Figura 2.1. Sinalização de advertência – esfera de sinalização aérea.

Este tipo de atividade, troca de esferas de sinalização, tem sido realizada por um eletricitista/técnico que fica preso a um helicóptero por cabos de aço próximo à linha de alta tensão, conforme a Fig. 2.2. Outra forma de instalação destes equipamentos é por meio de um eletricitista movendo-se por um trolley ou por si só ao longo do fio, conforme Fig. 2.3, representando um alto risco de acidentes, envolvendo vidas humanas e a possibilidade de black-outs.



Figura 2.2. Instalação de esferas de sinalização com o auxílio de helicóptero.



Figura 2.3. Instalação de esferas de sinalização por um eletricista sobre o cabo.

A imagem surpreende alguns motoristas. Perto das rodovias federais e estaduais, em linhas de transmissão de energia elétrica, dezenas de homens trabalham pendurados por cabos de aço a alturas que podem variar entre dez e quarenta metros. São técnicos eletricitistas que têm o risco como rotina e o cuidado e a atenção como obrigação. Responsáveis pela manutenção de cerca de 95 mil quilômetros de cabos que transportam a energia pelo Brasil, eles, muitas vezes, trabalham em linhas energizadas (linhas vivas) por onde passam de 69 mil a 750 mil Volts. De acordo com dados do Ministério do Trabalho e Emprego o setor elétrico emprega 120 mil trabalhadores. Estima-se que cerca de dois mil técnicos brasileiros estão habilitados para trabalhar com linhas vivas. Os eletricitistas de linhas vivas são responsáveis pelo funcionamento dos 95 mil quilômetros de cabos, sendo 72 mil quilômetros do sistema interligado nacional e 23 mil quilômetros do sistema isolado (HENRIQUE; CAVALCANTE; OLIVEIRA, 2005). Além disso, os custos envolvidos são altos. Por exemplo, a instalação de uma esfera de sinalização com o auxílio de helicóptero fica em torno de U\$ 500,00 (CAMPOS, et. al., 2003).

Com o intuito de diminuir o risco de acidentes envolvendo vidas humanas, diminuir a possibilidade de black-outs e automatizar a manutenção de cabos de alta tensão e de telecomunicações foram desenvolvidos diversos sistemas automáticos. Estes sistemas são, na realidade, unidades robóticas que podem ser divididos em dois grandes grupos: robôs montados em uma plataforma terrestre, e robôs que são acoplados no próprio cabo. Os itens seguintes descrevem vários destes mecanismos, fornecendo suas configurações, vantagens e delimitações.

2.2 Robôs Montados em Plataformas Terrestres

Companhias de energia elétrica têm investigado o uso de sistemas robóticos para manutenção de cabos de alta tensão utilizando-se de uma plataforma terrestre desde a metade da década de 80, particularmente companhias de energia do Japão, Espanha e dos Estados Unidos têm desenvolvidos sistemas semi-autônomos para estas tarefas (PARKER; DRAPER, 1999). Um dos primeiros sistemas foi o TOMCAT (Teleoperator for Operations, Maintenance, and Construction using Advanced Technology) (FOSTER-MILLER, 2005). Seu conceito básico foi demonstrado em 1979 (DUNLAP, 1986), sendo montado na plataforma de um caminhão do tipo Munk, e contendo um sistema de visão para controle humano. Pode ser utilizado para troca de isoladores e inspeções visuais de torres. A Figura 2.4 mostra um exemplo deste robô.



Figura 2.4. TOMCAT (http://66.203.92.5/projectexamples/cc_product_design/tomcat.htm).

Um outro exemplo de robô com plataforma terrestre foi desenvolvido pela Kyushu Electric Power Co., Japão (MARUYAMA; MAKI; MORI, 1993) (NIO ; MARUYAMA, 1993) (YANO, et al., 1995) (NAKASHIMA; YANO; MARUYAMA; YAKABE, 1995). Este robô semi-autônomo, operado por um técnico do caminhão, é constituído por dois sistemas de braços robóticos, sensores e câmeras. Ele pode ser utilizado para a trocas de componentes, como isoladores, ou para instalação de novas linhas. Na Figura 2.5 é apresentado um esquema deste robô em sua primeira e segunda fases (MARUYAMA, 2000). Posteriormente, na fase III o robô evoluiu permitindo a execução de algumas tarefas totalmente autônomas (TAKAOKA, et. al, 2001).

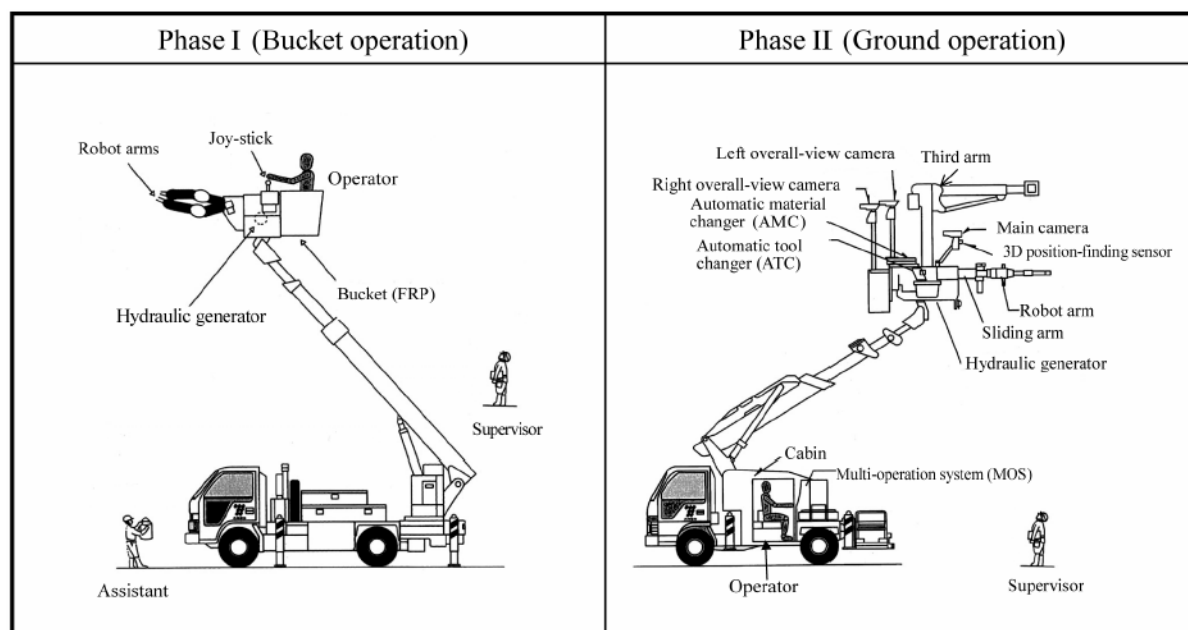


Figura 2.5. Robô com dois braços para manutenção de linhas de alta tensão – Fase I e II (MARUYAMA, 2000).

No Japão foi desenvolvido um outro sistema montado em um caminhão do tipo Munk, onde o operador dos manipuladores fica posicionado em uma cabine no topo do braço do caminhão, tendo sido desenvolvido para troca de isoladores e para auxiliar na construção de linhas de alta tensão. Este sistema é constituído por dois manipuladores seriais de 6 graus de liberdade cada, sendo controlados por joystick. Na Figura 2.6 é apresentado o esquema do sistema e, na Fig. 2.7, o esquema do manipulador (YOKOYAMA et al., 1993).

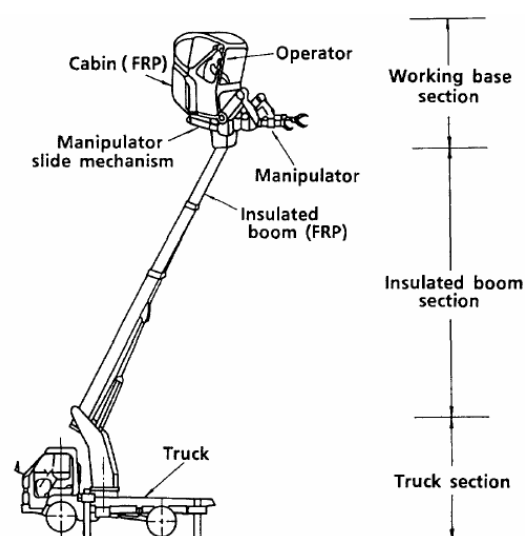


Figura 2.6. Sistema de manipulação (YOKOYAMA et al., 1993).

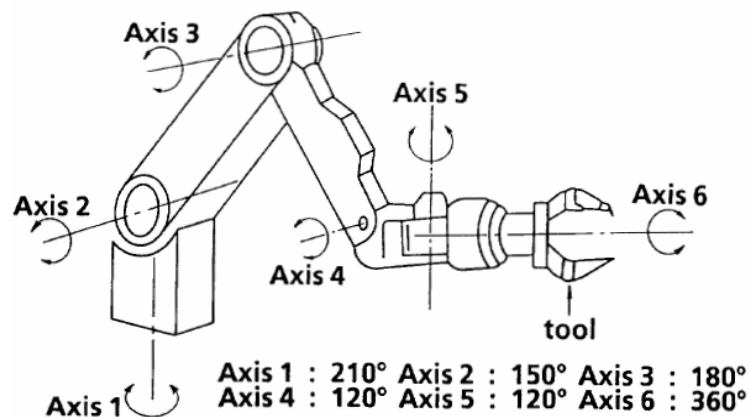


Figura 2.7. Esquema do manipulador (YOKOYAMA et al., 1993).

Na Espanha foi desenvolvido o ROBTET (ROBot para Trabajos En Tension), que teve início em 1994, sendo um sistema semi-automático composto por várias câmeras e, como os anteriores, é montado na plataforma de um caminhão do tipo Munk (ARACIL, et al., 1995) (SANTAMARIA, et al., 1997) (HERNANDO, et al., 1999) (SÁNCHEZ, et al., 2000). Este sistema pode ser utilizado por exemplo, para substituição dos isoladores e para inspeções visuais. Na figura 2.8 é apresentado um exemplo do ROBTET.



Figura 2.8. Robô ROBTET (<http://cela.disam.etsii.upm.es/robotica/proyectos/robtet/>).

No Canadá foi desenvolvido um sistema teleoperado para manutenção do sistema de distribuição de alta tensão da hidroelétrica de Québec, que consiste em um sistema teleoperado montado em um braço articulado de um caminhão e operado da própria cabine do caminhão (FAUCHER et al., 1996). Na Figura 2.9 é apresentado este sistema e os componentes da plataforma de manipulação.

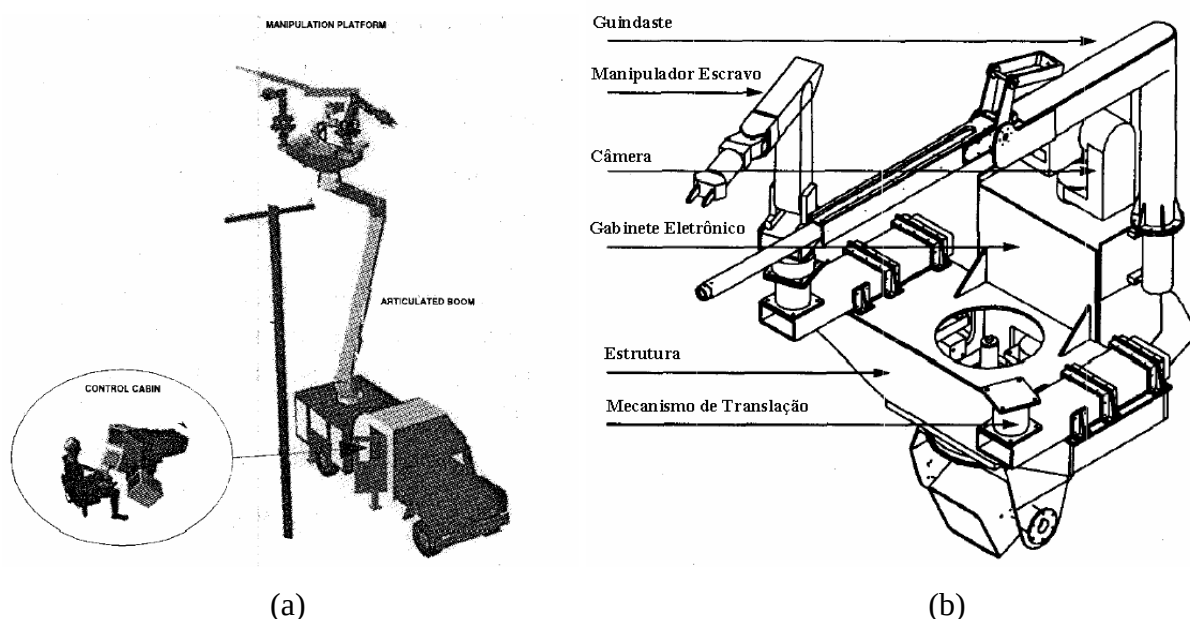


Figura 2.9. a) Sistema Completo; b) Plataforma Manipuladora (FAUCHER et al., 1996).

Todos os robôs descritos anteriormente possuem como delimitações a pouca mobilidade para realização de vários tipos de tarefas de manutenção como, por exemplo, a troca de esferas de sinalização quando estas estão colocadas em alturas não compatíveis com estes mecanismos. Estes robôs são basicamente aplicados para reparos de isoladores.

2.3 Robôs Móveis Suspensos por Fios

Os robôs que se movimentam em cabos, podem ser analisados em função de três parâmetros: a complexidade do controle, a estabilidade de locomoção e a versatilidade. A complexidade do controle está relacionado com o número de graus de liberdade (g.d.l) do robô e, conseqüentemente, com o número de atuadores. Em geral, quanto maior o número de g.d.l maior a complexidade do controle. A estabilidade de locomoção está relacionada com a capacidade do robô locomover-se ao longo do fio, de forma segura e “suave”, sem que o robô possa cair do fio. Versatilidade diz respeito a característica do robô que permite a transposição de diferentes tipos de obstáculos presentes no fio, independentemente de sua posição no fio. Assim, espera-se para este tipo de robô, a associação de uma alta estabilidade de locomoção associada a uma baixa complexidade de controle e que seja versátil o suficiente para permitir a transposição de diferentes obstáculos.

Dentre os estudos realizados com robôs móveis suspensos por fio destaca-se: o robô de múltiplas unidades (AOSHIMA; TSUJIMURA; YABUTA, 1989), que possui uma estabilidade de locomoção alta pelo fato de usar muitos atuadores e por isto, a sua complexidade de controle é bastante alta. Na Figura 2.10 é apresentado um esquema deste robô. Ele é bastante versátil devido ao fato de ser constituído por seis unidades básicas, sendo que cada unidade possui três graus de liberdade, permitindo sua movimentação ao longo do fio e a transposição de diversos obstáculos em fios de telecomunicações. Além do controle complexo, este robô possui um consumo de energia elevado.

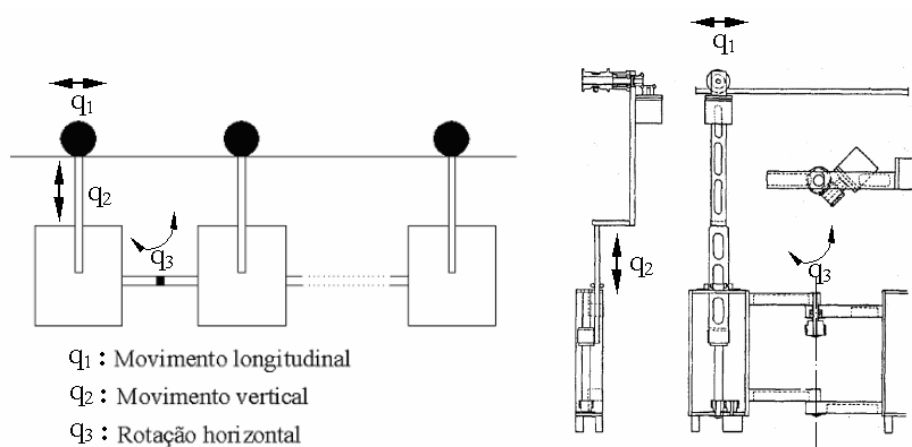


Figura 2.10. Robô Móvel Suspenso por Fio (AOSHIMA; TSUJIMURA; YABUTA, 1989).

Na Figura 2.11 são apresentadas as etapas de transposição de um poste e de uma caixa de terminais de conexões telefônicas para o robô de múltiplas unidades.

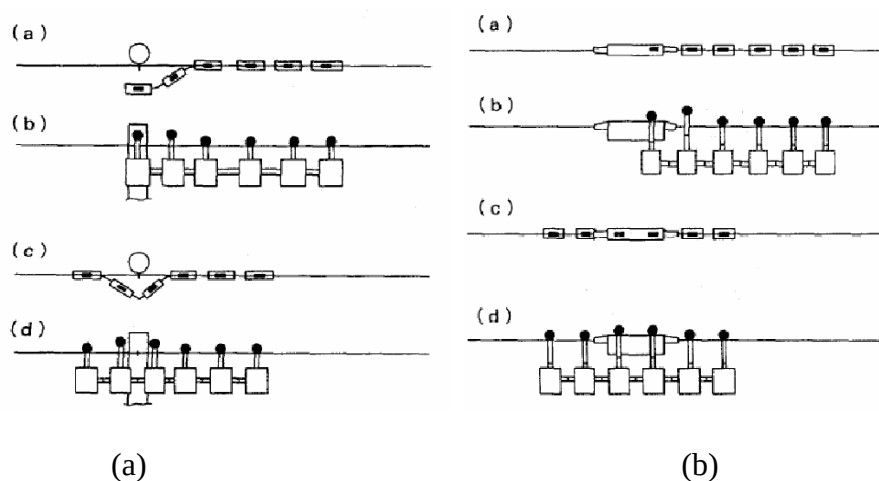


Figura 2.11. Etapas de transposição de obstáculos em cabos de telecomunicação. a) transposição de poste; b) transposição de terminal de conexões telefônicas (AOSHIMA; TSUJIMURA; YABUTA, 1989).

Outro robô estudado consiste no tipo “self guide” (SAWADA; KUSUMOTO; MUNAKATA, 1991). Neste caso, tanto a estabilidade de locomoção como a complexidade de controle são baixas, Fig. 2.12. Este robô possui como características construtivas uma guia de 3 metros e um peso aproximado de 100 Kg. Estas dimensões se justificam pelo tipo de solução adotada, visto que ele é capaz de ultrapassar torres de alta tensão. Além das desvantagens construtivas, que dificultam até seu posicionamento sobre o fio de alta tensão, ele possui um alto consumo de energia.

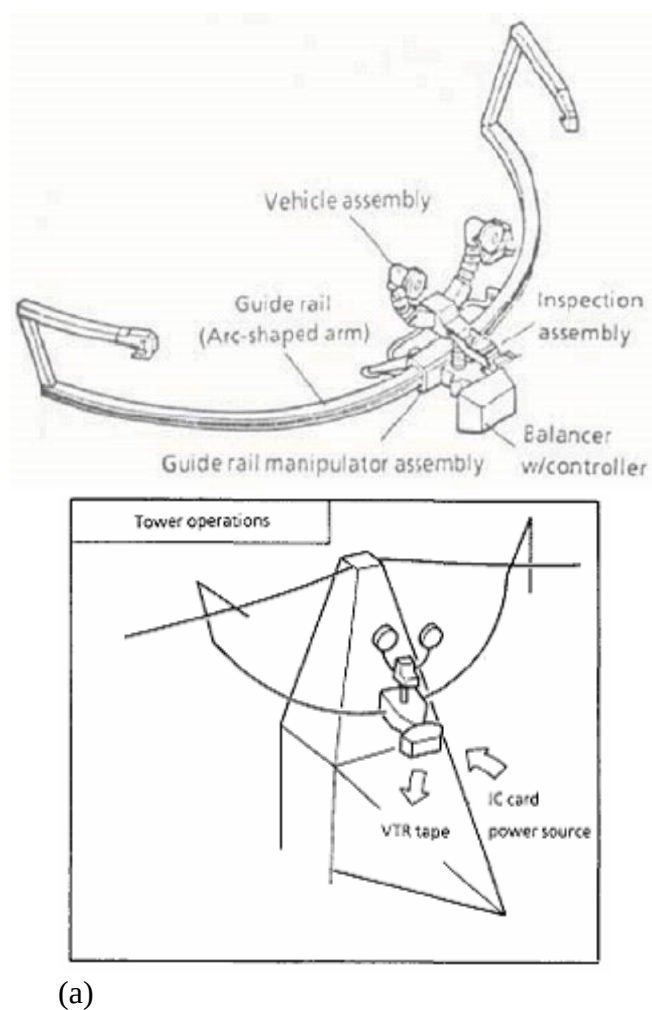


Figura 2.12. Robô Móvel Suspenso por Fio. a) Estrutura do robô; b) Transposição da Torre (SAWADA; KUSUMOTO; MUNAKATA, 1991).

Estudos realizados pela equipe de Tsujimura mostraram a viabilidade da utilização de um mecanismo biela manivela deslizante (slider-crank) na construção de um robô móvel com quatro pernas, que se move suspenso por fio. Nestes trabalhos foram obtidas as relações entre os segmentos do mecanismo que constituem as pernas do robô, para este mover-se de forma

estável e com velocidade constante (TSUJIMURA; YABUTA, 1988) (TSUJIMURA; YABUTA; MANABE, 1993), (TSUJIMURA; YABUTA; MORIMITSU, 1996) e (TSUJIMURA; MORIMITSU, 1997).

Entretanto, o uso do robô da equipe do Tsujimura é restrito para um tipo de obstáculo: grampos nas linhas de telecomunicações que possuem pequenas dimensões, não sendo capaz de transpor outros obstáculos como, por exemplo, caixas de terminais telefônicas. A Figura 2.13 representa o esquema deste robô.

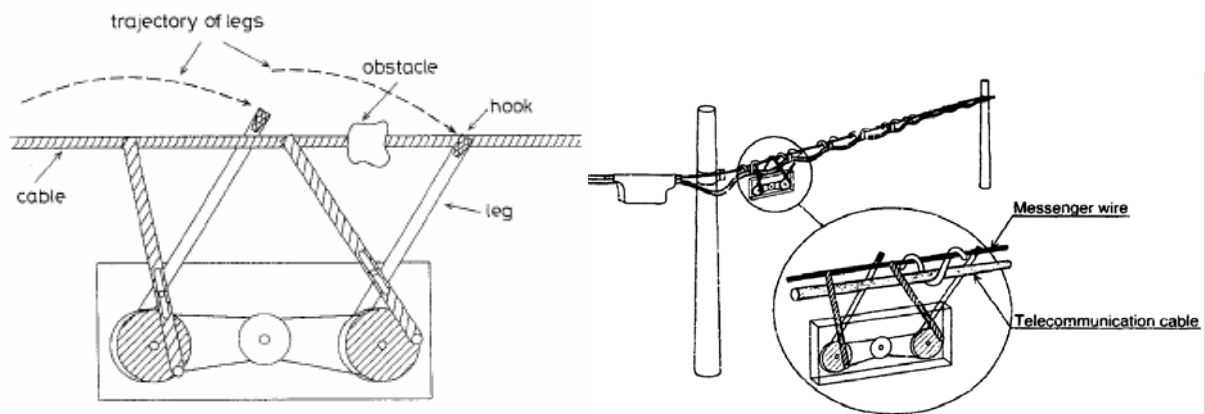


Figura 2.13. Robô Móvel dotado de pernas com mecanismo biela-manivela deslizante. (TSUJIMURA; YABUTA; MORIMITSU, 1996) (TSUJIMURA; MORIMITSU, 1997)

Outro robô desenvolvido tem como finalidade a remoção mecânica de gelo de cabos aéreos porque tanto o acúmulo de gelo como de sujeiras nos cabos, causam perdas elétricas. Ele possui uma câmera que pode ser operada remotamente e a remoção do gelo é feita por um conjunto de laminas de aço. A Figura 2.14 apresenta o robô e sua aplicação, tendo sido aplicado em linhas desenergizadas (MONTAMBAULT; CÔTÉ; LOUIS, 2000).

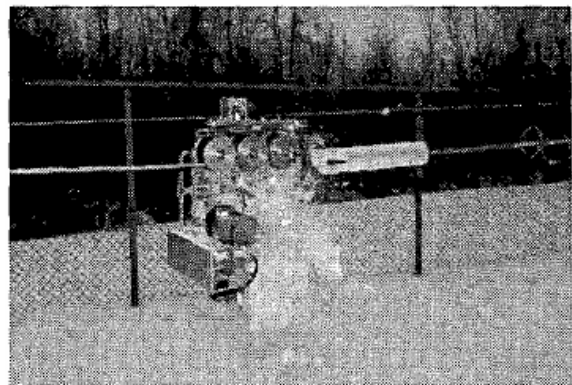
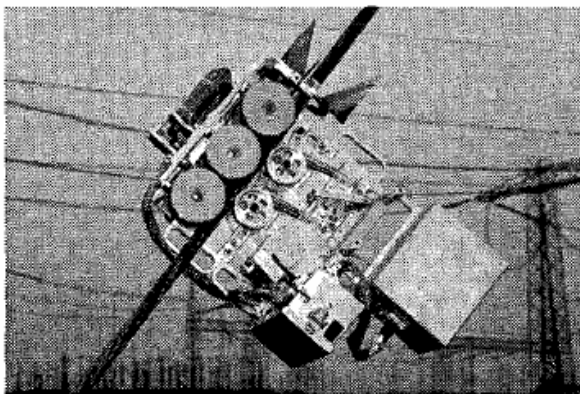


Figura 2.14. Robô suspenso para remoção de gelo em cabos (MONTAMBAULT; CÔTÉ; LOUIS, 2000).

Na França, Ruaux (1995) propôs o esquema de um robô móvel suspenso por fio para instalações de equipamentos de sinalização em cabos de alta tensão. Na Figura 2.15 é apresentada a idealização deste robô, com as etapas propostas para instalação da esfera de sinalização. A grande delimitação do uso deste robô seria a necessidade de fabricação de esferas específicas para ele, além de suas dimensões físicas.

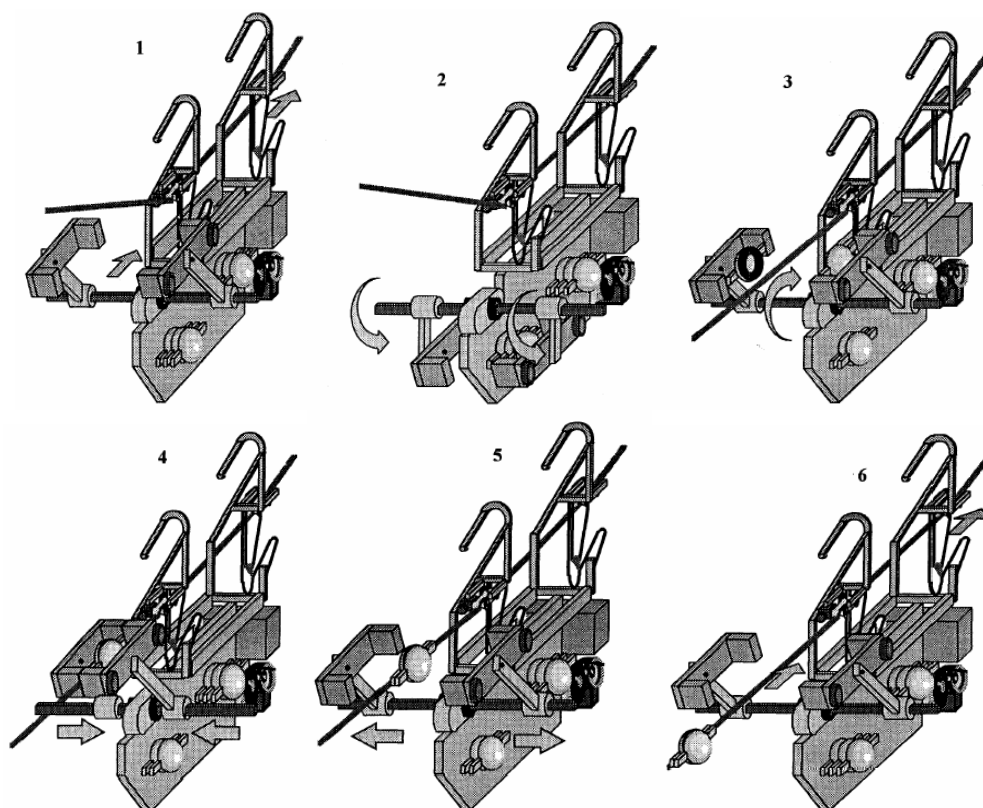


Figura 2.15. Esquema e fase para instalação de esferas de sinalização proposto por RUAUX (1995).

Outro robô foi desenvolvido no Brasil para inspeção visual dos cabos de alta tensão e de equipamentos presentes tais como: cabos condutores, espaçadores, isoladores de porcelana ou de vidro, torres, vegetação sobre a linha, etc (SOUZA, et. al., 2004) (SOUZA, et. al., 2006). Este robô utiliza rodas como sistema de tração, que basculam quando da ultrapassagem dos isoladores das torres, existindo um fuso abaixo do robô que é o responsável pelo balanceamento das massas. Na Figura 2.16 é apresentado o esquema do robô e, na Fig. 2.17, o protótipo construído.

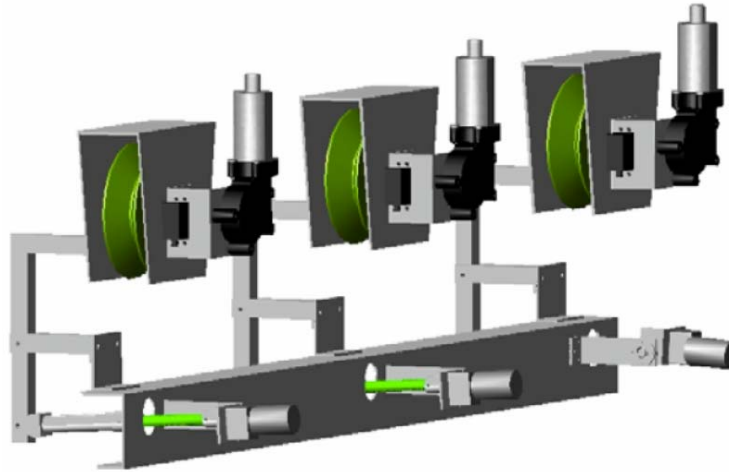


Figura 2.16. Configuração do mecanismo para transposição de torres proposto por SOUZA et al. (2006).



Figura 2.17. Protótipo do robô proposto por SOUZA et al. (2006).

Peungsungwal et al. (2001) apresentaram um robô autônomo para inspeção de linhas de alta tensão que pode utilizar a tensão induzida da linha de alta tensão para mover-se. Neste caso, ele teria uma fonte permanente de energia. O sistema do robô consiste em quatro partes: retificador da tensão induzida, unidade de movimentação, unidade de inspeção-câmera e unidade de transmissão das imagens. Este robô foi projetado para inspeção e movimentação entre duas torres, não sendo capaz de ultrapassar obstáculos.

Destaca-se também o robô desenvolvido pela equipe de Kobayashi para aplicação na manutenção de cabos de alta tensão de ferrovias que possuem diversas irregularidades como ramos de alimentação, isoladores, grampos e outros (KOBAYASHI; NAKAMURA; SHIMADA, 1991). Este robô utiliza uma estrutura de múltiplos carros com articulações entre eles e arquitetura de controle biológica. Ele é composto por seis pares simétricos de carros conectados, onde, cada carro, com exceção do último, possui dois motores: um para movimentação e outro para o controle da articulação de conexão. Na movimentação normal, ambos os lados dos carros estão conectados sendo as rodas feitas de borracha. Para movimentação foi utilizado o conceito de sistemas biológicos autônomos, ou seja, um sinal é emitido pelo primeiro carro e transmitido para o seguinte com um atraso e assim sucessivamente. Na Figura 2.18 é apresentado o esquema mecânico do robô e a estratégia para transposição de obstáculos no fio.

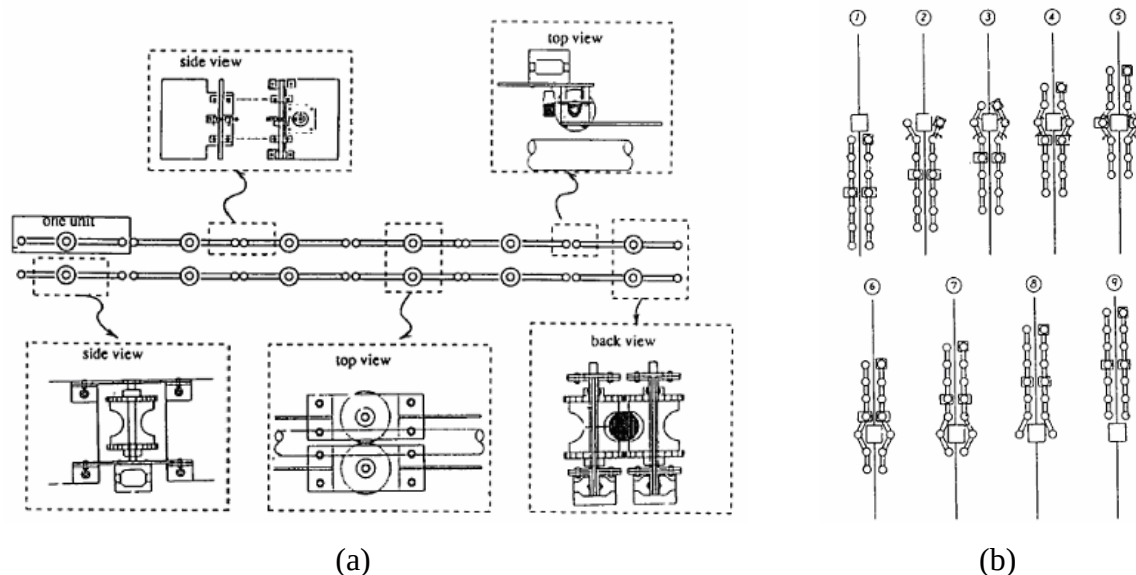


Figura 2.18. Robô Móvel para manutenção de cabos de alta tensão de ferrovias. a) Esquema mecânico; b) Estratégia para transposição de obstáculos (KOBAYASHI; NAKAMURA; SHIMADA, 1991).

Em trabalho recente ZHOU et al. (2005) propôs um robô “capaz de negociar” com vários tipos de obstáculos que podem ser encontrados ao longo das linhas de alta tensão. O robô projetado é versátil, sendo capaz de ultrapassar torres por exemplo. É dotado de uma câmera e que transmite os dados através de um sistema de comunicação sem fio. Este robô é constituído por cinco partes: mecanismo de movimentação (vehicle driving mechanism),

sistema de parada (brake system assembly), braços flexíveis, garras (palm gripper open-close assembly), fonte de alimentação/sistema de controle. Possui 16 eixos de movimento para garantir a flexibilidade requerida para a movimentação do robô. O robô tem um comprimento de 1,2 metros e massa aproximada de 45 Kg. Este robô possui controle complexo e está apresentado na Fig. 2.19.

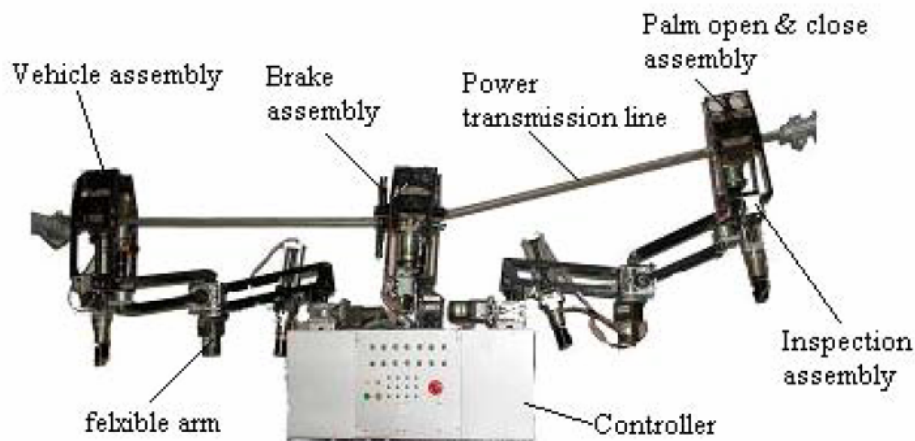


Figura 2.19. Protótipo do robô móvel suspenso por fio proposto por ZHOU et al. (2005).

Em Portugal, ROCHA e SEQUEIRA (2004) utilizaram como base o movimento de vermes que contraem e expandem seu corpo para o desenvolvimento de um robô móvel para mover-se ao longo de cabos de alta tensão. O robô proposto é composto por duas garras (pinças), três articulações rotativas e dois segmentos. O passo de locomoção tem duas fases diferentes. Na primeira fase do passo, o ponto 1 permanece fixo e a garra 3 move-se ao longo do fio, Fig. 2.20. As articulações 1 e 2 movimentam os segmentos a_1 e a_2 na mesma direção. Quando o braço está próximo da posição de singularidade (segmentos quase alinhados) o ponto 3 passa a ser o ponto fixo e o movimento dos atuadores de 1 e 3 são invertidos. Portanto, inicialmente o mecanismo alonga-se (linha contínua) e, após, o mecanismo encolhe (linha tracejada), conforme Fig. 2.20.

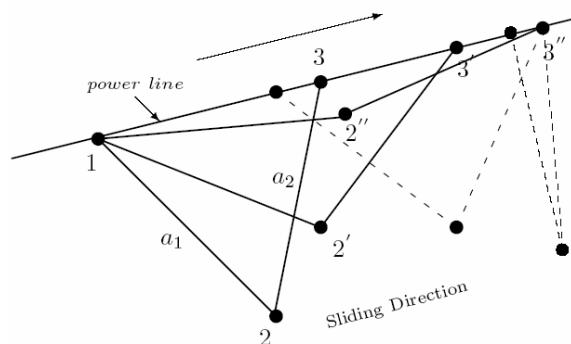


Figura 2.20. Modelo do sistema robótico proposto (ROCHA, SEQUEIRA, 2004).

A Figura 2.21 ilustra a metodologia para transposição de uma esfera de sinalização e algumas formas possíveis para o controle da trajetória de transposição. Assim, quando próximo do obstáculo a garra 3, Fig. 2.20, deixa o fio para permitir a transposição do obstáculo, enquanto a garra 1 permanece no fio e movimenta todo o mecanismo. Ultrapassado o obstáculo a garra 3 volta a fixar-se no fio. É um estudo preliminar teórico pois não foram definidas quantas unidades utilizar. Neste trabalho também foi considerado a influência dos ventos na simulação.

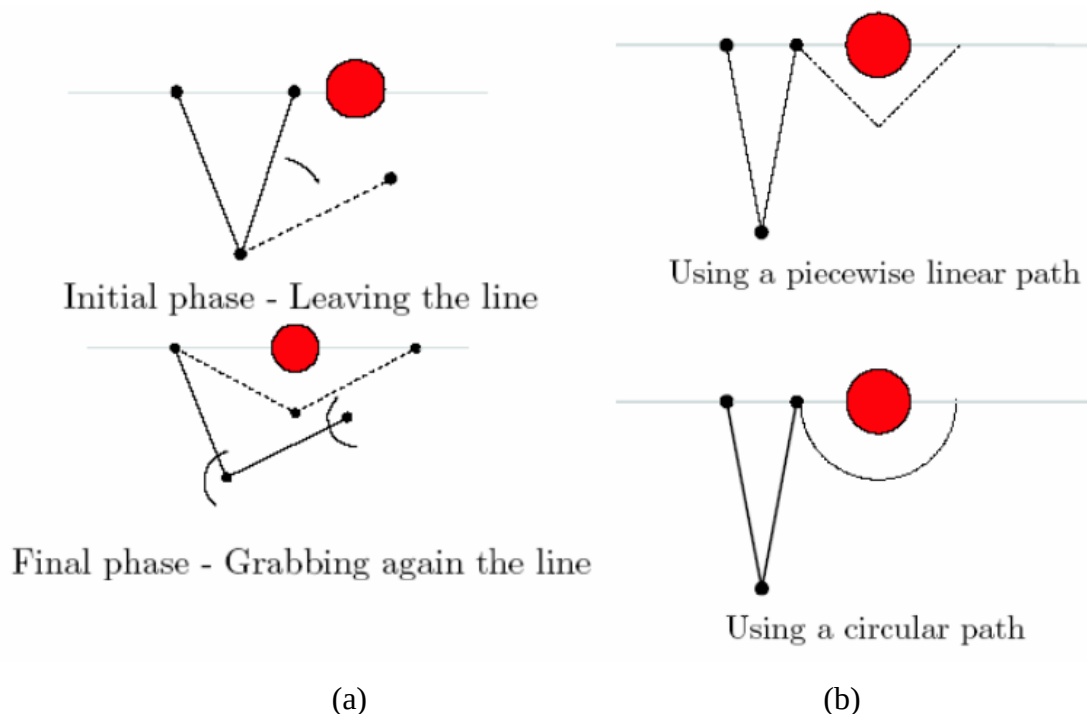


Figura 2.21. Robô móvel : a) Transposição de obstáculos; b) Trajetórias possíveis (ROCHA, SEQUEIRA, 2004).

Outro exemplo de robô móvel suspenso por fio foi desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais (CAMPOS et al., 2003). Este robô semi-autônomo foi projetado para fazer a instalação ou substituição de esferas de sinalização. Ele é posicionado sobre o fio por técnicos e comandado por controle remoto, não sendo capaz de transpor obstáculos presentes no fio. Na Figura 2.22 é apresentado o protótipo construído.

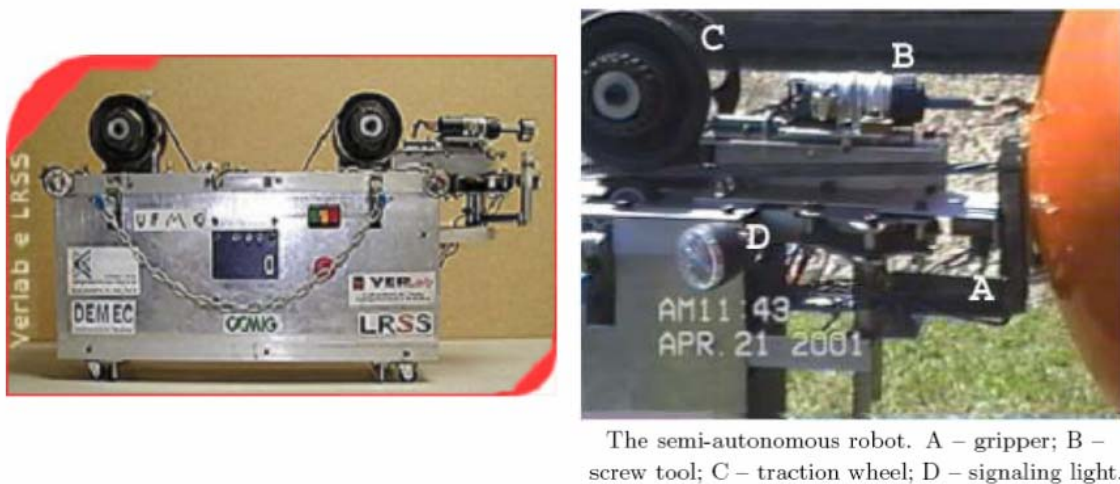


Figura 2.22. Protótipo do robô móvel suspenso por fio apresentado por CAMPOS et al. (2003).

2.3. Conclusões

Conforme exposto, espera-se para um robô de inspeção/manutenção de redes aéreas de energia e/ou telecomunicação que tenha uma alta estabilidade de locomoção associada a uma baixa complexidade de controle e que seja versátil o suficiente para permitir ultrapassar diferentes tipos de obstáculos.

Estudos realizados demonstram que os robôs que se movimentam sobre rodas não são adequados devido à dificuldade de transposição dos obstáculos existentes nos cabos (grampos, emendas, caixas de ligação para cabos telefônicos, etc.). O uso de esteiras atende aos requerimentos impostos às operações. Porém, seu controle e estabilidade não são simples de serem resolvidos (AOSHIMA; TSUJIMURA; YABUTA, 1989).

Assim o robô móvel suspenso por fio, modelado e simulado nesta dissertação, teve o seu sistema de locomoção baseado no trabalho da equipe do Tsujimura (TSUJIMURA;

YABUTA; MANABE, 1993) utilizando-se de pernas constituídas por mecanismo do tipo biela manivela deslizante. O uso de pernas facilita a transposição de obstáculos presentes no fio e, no caso do robô ser suspenso por fio, o próprio peso do robô auxilia na sua estabilidade. Com o objetivo de aumentar a versatilidade da perna do robô constituída pelo mecanismo biela manivela deslizante é acrescentado um grau de liberdade a cada perna. Este grau de liberdade permite a variação do comprimento da perna o que possibilita a transposição de diferentes tipos de obstáculos, independentemente da posição do obstáculo no fio. Neste caso, o obstáculo deve ter um volume específico. Neste trabalho o volume do obstáculo é baseado em uma esfera. Deve-se ressaltar que inicialmente o robô está previsto para transposição de obstáculos em linha reta entre torres ou postes de telecomunicações.

CAPÍTULO III

ANÁLISE CINEMÁTICA DO ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR FIO, COM PERNAS IGUAIS

3.1. Introdução

As pernas dos robôs móveis, em sua grande parte, são constituídas a partir de estruturas seriais com dois ou três segmentos (BÜHRLE; CORDES, 1996) e (ZIELINSKA; HENGE, 2002) possuindo duas ou três articulações. O uso de muitas articulações dificulta o controle em tempo real da estrutura. As pernas dos robôs móveis podem também ser baseadas em cadeias cinemáticas fechadas, como o paralelogramo, que permitem descrever trajetórias com 1 grau de liberdade. Nesse caso, as dimensões do mecanismo são escolhidas de tal forma que se possa obter um passo com um perfil aproximadamente semi-elíptico, que é a forma convencional para o perfil de um passo artificial (SONG et al., 1984) e (OTTAVIANO; LANNI; CECCARELLI, 2004). Assim o uso de mecanismos articulados de cadeia fechada na constituição das pernas dos robôs permite a utilização de um menor número de graus de liberdade.

No final da década de 80 foi proposto por Tsujimura (TSUJIMURA; YABUTA, 1988) (TSUJIMURA; YABUTA; MANABE, 1993), (TSUJIMURA; YABUTA; MORIMITSU, 1996) e (TSUJIMURA; MORIMITSU, 1997), a utilização do mecanismo biela-manivela-deslizante (slider-crank) como alternativa para confecção da perna de um robô que pudesse ser aplicado na manutenção de cabos de telecomunicações no Japão. O uso deste mecanismo articulado permitiu a confecção de uma perna de robô com um grau de liberdade para sua movimentação, o que facilita o controle do mesmo. Porém, o robô proposto por Tsujimura apresenta baixa versatilidade, conforme apresentado no Capítulo II.

Assim, neste capítulo será apresentado a configuração do robô móvel suspenso por fio, dotado com pernas iguais, e que utiliza o mecanismo biela-manivela deslizante. Este estudo tem como objetivo verificar o comportamento do robô com pernas iguais. Para o desenvolvimento deste robô, primeiramente é apresentada a análise do mecanismo biela-manivela deslizante constituinte da perna do robô. Posteriormente, foi realizado o estudo cinemático do robô considerando suas pernas tendo o mesmo comprimento.

3.2 Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas Iguais

A escolha do tipo de cadeia cinemática do robô móvel dotado de pernas para a aplicação na manutenção de cabos de telecomunicação ou/e de alta tensão, baseou-se principalmente nas características de estabilidade, simplicidade, versatilidade e controlabilidade. De forma a simplificar a construção e o controle, é necessário que o robô disponha do menor número possível de articulações motorizadas, devendo as pernas, neste caso, ter movimentação sincronizada.

A partir destas características, definiu-se que a estrutura do robô móvel deve ser composta por quatro mecanismos do tipo “biela-manivela-deslizante” (slider-crank) com movimentação sincronizada. Desta forma, pode-se utilizar o mesmo motor para o acionamento das quatro pernas cuja movimentação é realizada através de correias sincronizadoras (correias dentadas). Assim, o robô é dotado de dois pares de pernas idênticas, dianteira e traseira, acionadas por um só motor de corrente contínua, Fig. 3.1.

Cada par de pernas é composto por dois mecanismos biela-manivela-deslizante $OABC$ e $OA'BC'$ como representado na Fig. 3.2. Para análise apresentada neste Capítulo, o robô possui pernas de comprimentos iguais. O ângulo de entrada do movimento θ é definido como sendo o ângulo entre o segmento OA' , manivela de entrada, e a linha horizontal no sentido do movimento anti-horário. A fase entre o segmento OA e o segmento OA' é π radianos. Os pés correspondem aos pontos C (pé direito) e C' (pé esquerdo).

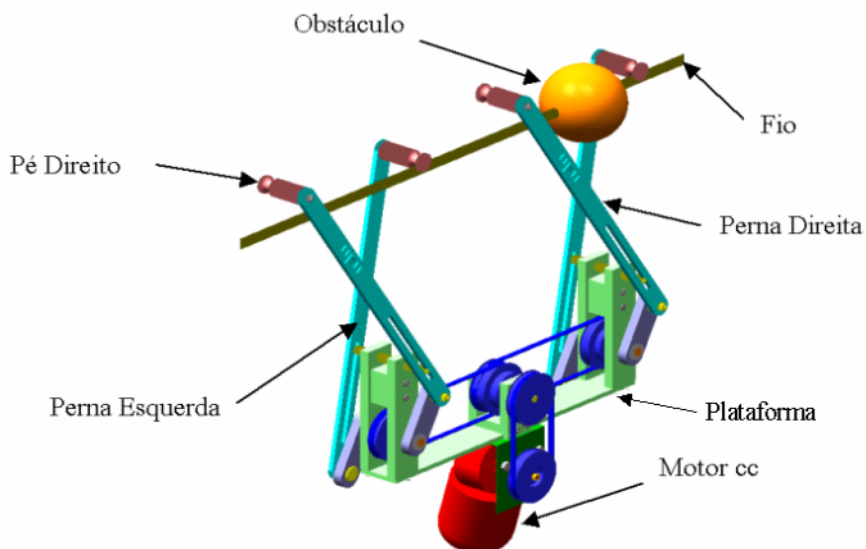


Figura 3.1 Configuração geral do robô suspenso por fio com pernas iguais.

Assim, o robô tem duas pernas direitas e duas pernas esquerdas onde cada perna do mesmo lado tem o mesmo movimento. A estabilidade é assegurada pelo contato com o fio, a cada instante, dos pés do mesmo lado. O esquema da vista lateral do robô é apresentada na Fig. 3.2, onde os pés esquerdos estão em contato com o fio. Os segmentos $AC=A'C'$, OA e OB são denotados por c , r e a , respectivamente. Na Figura 3.2, a perna direita está na fase de movimentação para transposição. No texto, esta fase é denominada apenas por “perna de transposição”.

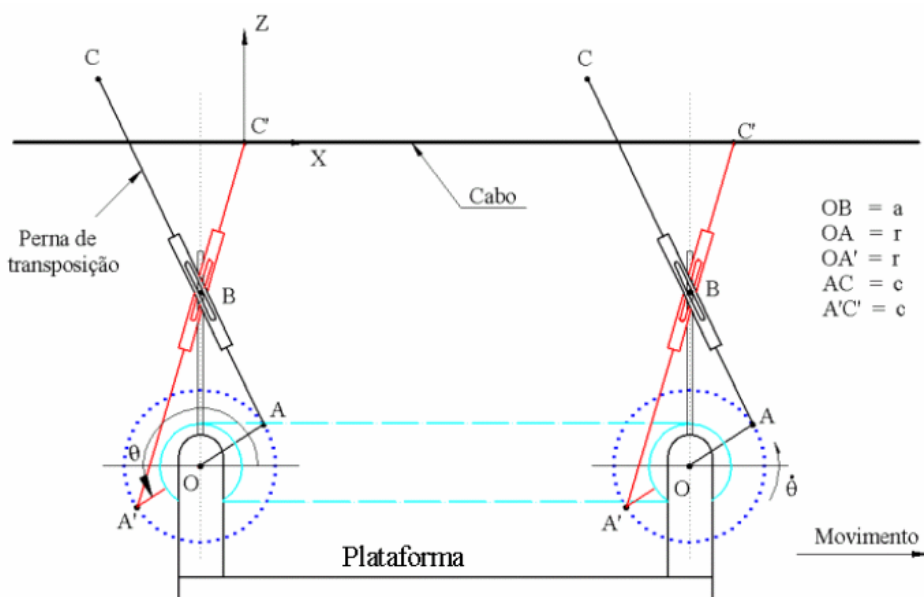


Figura 3.2 Esquema da vista lateral do robô móvel e seus parâmetros.

Para a análise do robô, considerando as pernas iguais, primeiramente é realizada a análise do mecanismo biela-manivela deslizante constituinte da perna do robô. Depois, é realizada a análise de um par de pernas e, finalmente, é realizada a análise do robô.

3.3 Mecanismo Biela-Manivela-Deslizante

O esquema do mecanismo biela-manivela-deslizante com os parâmetros utilizados na modelagem cinemática, é apresentado na Fig. 3.3. O ponto O representa o eixo de entrada do movimento de rotação; o ponto A , a articulação entre a manivela OA e a biela AC ; a biela AC , perna do robô, é guiada no ponto B .

Com a variação do ângulo θ , devido à movimentação da manivela de entrada OA , o ponto C , extremo da biela descreve uma trajetória no espaço de trabalho, definido pelo referencial cartesiano OXZ . As coordenadas do ponto C são definidas por x_c e z_c , e podem ser calculadas como apresentado a seguir.

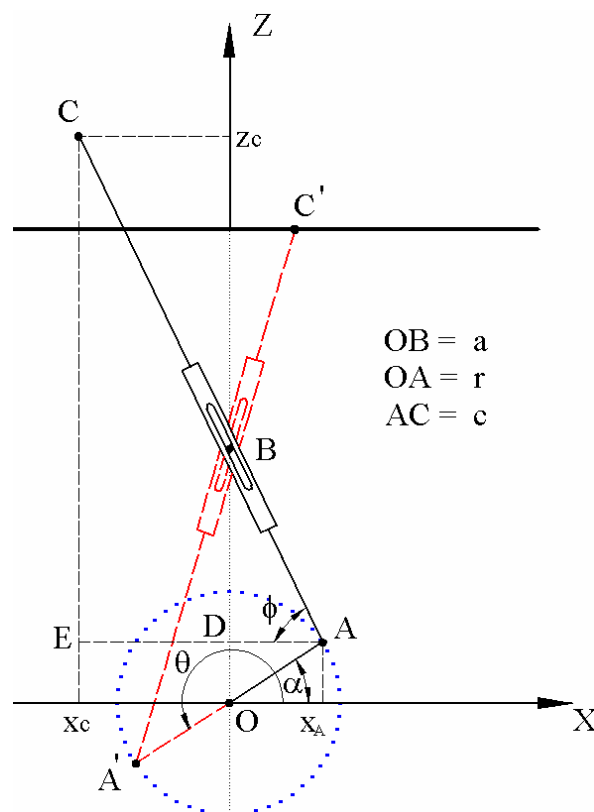


Figura 3.3. Parâmetros do mecanismo biela-manivela deslizante.

As equações gerais foram escritas para um ângulo α , Fig 3.3. Posteriormente, este ângulo α , é relacionado com o ângulo θ que define o movimento de rotação da manivela.

A partir da Fig. 3.3 pode-se escrever a coordenada x_c como:

$$x_c = -OA.\cos\alpha + AE \quad (3.1)$$

Considerando os triângulos ACE e ABD, pode-se obter o cosseno do ângulo ϕ que, pela sua igualdade obtém-se:

$$AE = \frac{AC.OA.\cos\alpha}{AB} \quad (3.2)$$

Do triângulo OAB tem-se:

$$AB = \sqrt{a^2 + r^2 - 2.a.r.\sin\alpha} \quad (3.3)$$

Substituindo as Eqs. (3.2) em (3.3) em (3.1) obtém-se a coordenada x_c , correspondente ao pé C ou seja:

$$x_c = OA.\cos\alpha \left(\frac{AC}{\sqrt{OA^2 + OB^2 - 2.OA.OB.\sin\alpha}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Ou ainda,

$$x_c = r.\cos\alpha \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2.a.r.\sin\alpha}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

De forma análoga pode ser obtida a coordenada z_c , que é dada por:

$$z_c = \frac{a.c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2.a.r.\sin\alpha}} + \left(1 - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2.a.r.\sin\alpha}} \right) r.\sin\alpha \quad (3.6)$$

Da Figura 3.3 tem-se que a relação entre α e θ :

$$\alpha = \theta - \pi \quad (3.7)$$

que, substituindo nas Eqs. (3.5) e (3.6) obtém-se:

$$x_c = -r \cdot \cos \theta \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

$$z_c = \frac{a \cdot c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} + \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 1 \right) r \cdot \sin \theta \quad (3.9)$$

Os estudos realizados por Tsujimura mostraram a viabilidade da utilização do mecanismo biela manivela deslizante na construção de um robô móvel, com quatro pernas, suspenso por fio (TSUJIMURA; YABUTA, 1988) (TSUJIMURA; YABUTA; MANABE, 1993), (TSUJIMURA; YABUTA; MORIMITSU, 1996) e (TSUJIMURA; MORIMITSU, 1997). Nestes trabalhos foram obtidas as relações entre os segmentos do mecanismo biela-manivela deslizante para as quais o robô move-se de forma estável. Esta estabilidade é confirmada através da trajetória do ponto O do mecanismo biela-manivela deslizante, que apresenta variações mínimas na direção vertical, Fig. 3.3. Os parâmetros obtidos também permitem que o robô realize a sua movimentação com velocidade praticamente constante na horizontal. Estes parâmetros ótimos respeitam as relações:

$$\frac{a}{r} = 1,6$$

$$\frac{c}{r} = 6,6$$

A partir deste equacionamento pode-se fazer a análise do mecanismo para o uso como perna de um robô móvel suspenso por fio.

3.4 Análise Cinemática de um Par de Pernas de Mesmo Comprimento

Para a análise do movimento do robô deve-se considerar que a cada instante, pelo menos dois pés, um dianteiro e outro traseiro, devem estar em contato simultaneamente com o fio de sustentação, garantindo o seu equilíbrio, Fig. 3.2. Isto significa que, ora os dois pés direitos estão apoiados sobre o fio, ora os dois pés esquerdos. Na alternância dos pés, os quatro mantêm contato simultaneamente com o fio.

Sendo o fio de sustentação fixo e o robô se movendo em relação a ele, pode-se escrever o movimento de um par de pernas considerando um referencial fixo no pé que está instantaneamente em contato com o fio.

Para o caso em que as pernas possuam o mesmo comprimento, observa-se que o pé mantém contato com o fio durante a metade do ciclo (o ciclo sendo realizado com θ variando entre 0 e 2π radianos). Assim, pode-se analisar o movimento do robô considerando o ciclo de movimento dividido em duas etapas: a primeira etapa correspondendo ao movimento do pé do robô fora do fio e movimentando-se acima deste e, a segunda etapa, correspondendo ao pé do robô em contato com o fio e suportando o peso do robô. Desta forma, cada perna do robô repete estas duas etapas em turno, assegurando o movimento para frente do robô.

O procedimento para a análise do movimento do robô consiste em estudar o movimento de cada perna, direita e esquerda, para, posteriormente, analisar o movimento de um par de pernas.

Visto que o segundo par de pernas tem movimento sincronizado com o primeiro, garantindo a estabilidade do conjunto, o movimento da plataforma do robô tem o mesmo comportamento do centro de rotação da manivela, definido pelo ponto O . Deve-se salientar que o par de pernas dianteiro e traseiro são iguais, Fig. 3.2. É importante para este tipo de robô que a sua plataforma se mantenha alinhada com o fio e que seu movimento seja o mais uniforme, não apresentando oscilações na direção vertical.

A análise cinemática do movimento do par de pernas é semelhante ao apresentado para o mecanismo biela-manivela deslizante, item 3.2, porém, com o referencial fixo no pé que está em contato com o fio.

O movimento de uma perna, em função do ângulo de entrada θ , pode ser analisado dividindo-se o ciclo em quatro fases, em função da posição do pé em relação ao cabo, Fig. 3.4. O início do movimento é considerado quando os pés estão em contato com o cabo,

na posição em que $\theta = \pi$. Para facilitar a compreensão do procedimento e facilitar o equacionamento foi considerado que o movimento tem início com o pé direito se afastando do fio e o pé esquerdo apoiado sobre o fio. Assim, na Fig. 3.4, o robô move-se da esquerda para direita. As etapas de movimentação do pé direito estão indicadas na Tabela 3.1.

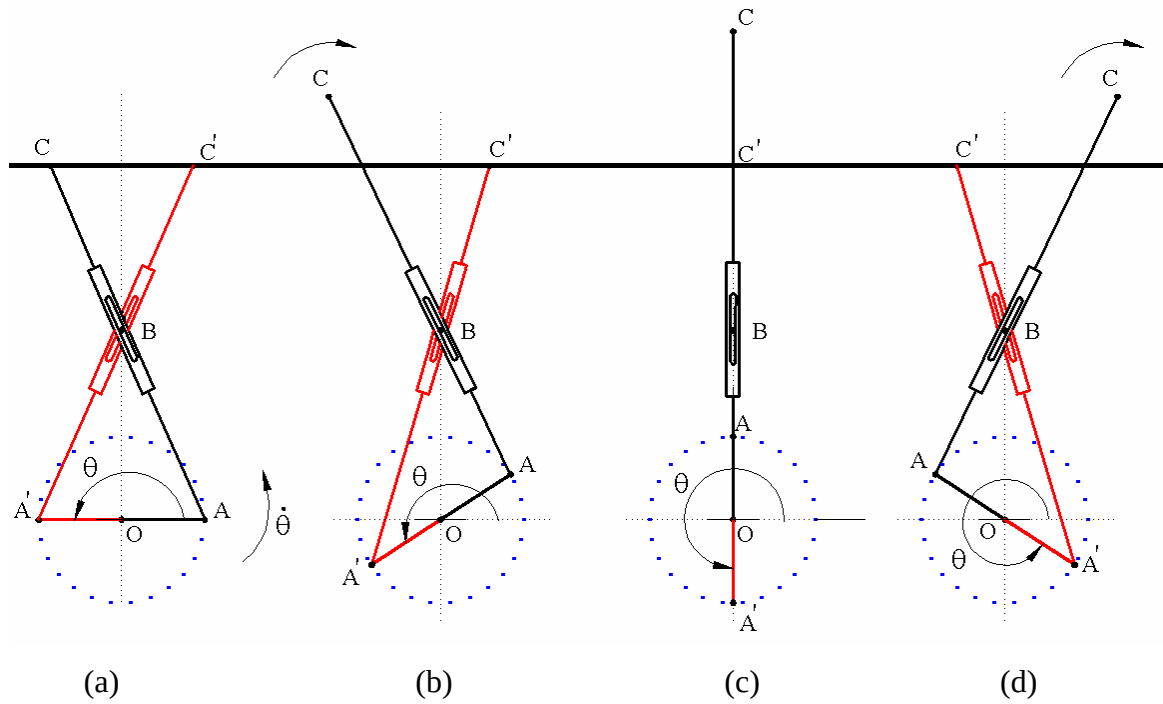


Figura 3.4. Fases de movimentação de um par de pernas. Em preto: perna direita; em vermelho: perna esquerda.

Tabela 3.1. Fases de movimentação do pé direito em função do ângulo de entrada.

θ	Descrição do movimento do pé direito (ponto C)	Figura
$\theta = \pi$	Posição Inicial	3.4a
$\pi < \theta < 3\pi/2$	Pé direito deixa o cabo para atingir sua altura máxima	3.4b
$\theta = 3\pi/2$	Pé direito na sua altura máxima (as duas pernas estão alinhadas)	3.4c
$3\pi/2 < \theta < 2\pi$	Pé direito se aproxima do cabo	3.4d

Com a continuidade do movimento de rotação, ocorre a troca do pé de apoio, ficando o pé direito sobre o fio, realizando o ciclo de movimento na mesma sequência apresentada na Tab. 3.1.

3.4.1. Análise Cinemática da Perna Esquerda

Para a análise do movimento do robô, as equações foram obtidas para o pé que mantém contato com o fio, ou seja, quando o ângulo θ varia de π a 2π . As equações gerais foram escritas para um ângulo α , Figs. 3.5 e 3.6. Posteriormente, este ângulo α , é relacionado com o ângulo θ que define o movimento de rotação da manivela.

A Figura 3.5 representa o esquema do mecanismo biela-manivela deslizante para perna esquerda. Um referencial cartesiano $C'XZ$ é fixo no ponto C' , extremo da biela $A'C'$, o eixo z paralelo à linha que passa por O e B e o eixo x posicionado sobre o fio. As coordenadas do ponto O , podem ser obtidas utilizando-se de relações trigonométricas.

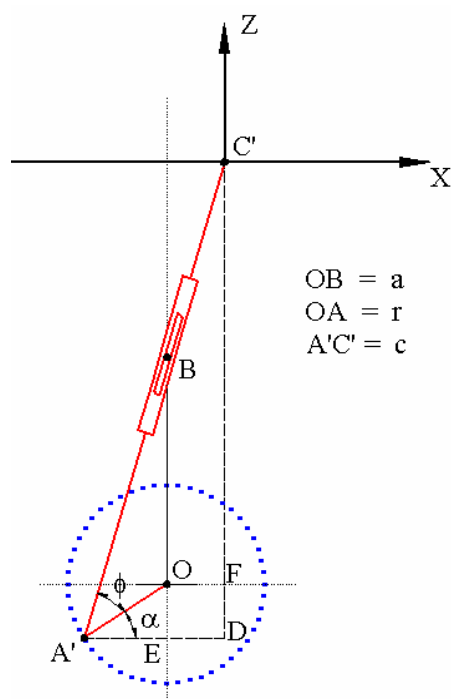


Figura 3.5. Parâmetros do mecanismo da perna esquerda.

A partir da Fig. 3.5 pode-se escrever:

$$z_0 = -C'F \quad (3.10)$$

$$x_0 = -ED \quad (3.11)$$

Pela análise dos triângulos $A'OB$, $A'EB$ e $A'DC'$ pode-se escrever:

$$A'B = \sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\sin \alpha} \quad (3.12)$$

$$\sin(\alpha + \phi) = \frac{EB}{A'B} = \frac{EO + OB}{A'B} = \frac{r.\sin \alpha + a}{A'B} \quad (3.13)$$

$$\cos(\alpha + \phi) = \frac{A'E}{A'B} = \frac{r.\cos \alpha}{A'B} \quad (3.14)$$

$$\sin(\alpha + \phi) = \frac{C'D}{A'C'} = \frac{C'F + FD}{c} = \frac{C'F + r.\sin \alpha}{c} \quad (3.15)$$

$$\cos(\alpha + \phi) = \frac{A'D}{A'C'} = \frac{A'E + ED}{c} = \frac{r.\cos \alpha + ED}{c} \quad (3.16)$$

Igualando as Eqs. (3.13) e (3.15) e, substituindo o valor de $A'B$ dado pela Eq. (3.12), obtém-se a coordenada z_0 do ponto O, ou seja:

$$z_0 = -\frac{a.c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\sin \alpha}} - r.\sin \alpha \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\sin \alpha}} - 1 \right) \quad (3.17)$$

De forma semelhante, a partir da igualdade das Eqs. (3.14) e (3.16) pode-se obter a coordenada x_0 do ponto O, ou seja:

$$x_0 = -r.\cos \alpha \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\sin \alpha}} - 1 \right) \quad (3.18)$$

As coordenadas x_0 , Eq. (3.18), e z_0 , Eq. (3.17), permitem traçar a trajetória do ponto O para meio ciclo do movimento da manivela de entrada OA , que corresponde ao intervalo em que o pé esquerdo se mantém em contato com o fio.

3.4.2. Análise Cinemática da Perna Direita.

A Figura 3.6 apresenta os parâmetros do mecanismo biela-manivela deslizante para a perna direita. De forma semelhante, o referencial está no extremo da perna do robô, ponto C.

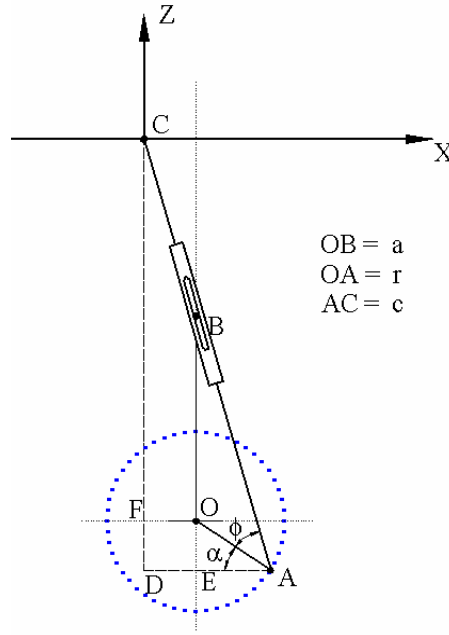


Figura 3.6. Parâmetros do mecanismo da perna direita.

Fazendo-se uma análise semelhante à realizada para a perna esquerda, obtém-se as coordenadas x_0 e z_0 relativas ao ponto O, para o intervalo em que a perna direita está em contato com o fio. Neste caso obtém-se:

$$x_0 = r \cdot \cos \alpha \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - 1 \right) \quad (3.19)$$

$$z_0 = -\frac{a \cdot c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - r \cdot \sin \alpha \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - 1 \right) \quad (3.20)$$

A seguir é apresentada a análise cinemática do robô quando possui pernas de comprimentos iguais.

3.5. Análise Cinemática do Robô

O movimento dos dois pares de pernas sendo sincronizados, pode-se obter o movimento de um ponto qualquer do robô, considerando o movimento de um ciclo completo do movimento da manivela de entrada e, posteriormente, generalizando para n ciclos, cada ciclo correspondendo a dois passos.

Para obter a equação geral do movimento do robô para n passos, é necessário escrever a equação para um passo. Para isto, foi considerado que o movimento inicia com o pé esquerdo mantendo contato com o fio e o pé direito fazendo o voleio por cima dele.

Um passo é então definido pela distância, ao longo do fio, entre a posição em que o pé C deixa o fio e a posição onde ele retorna sobre o fio, Fig. 3.7.

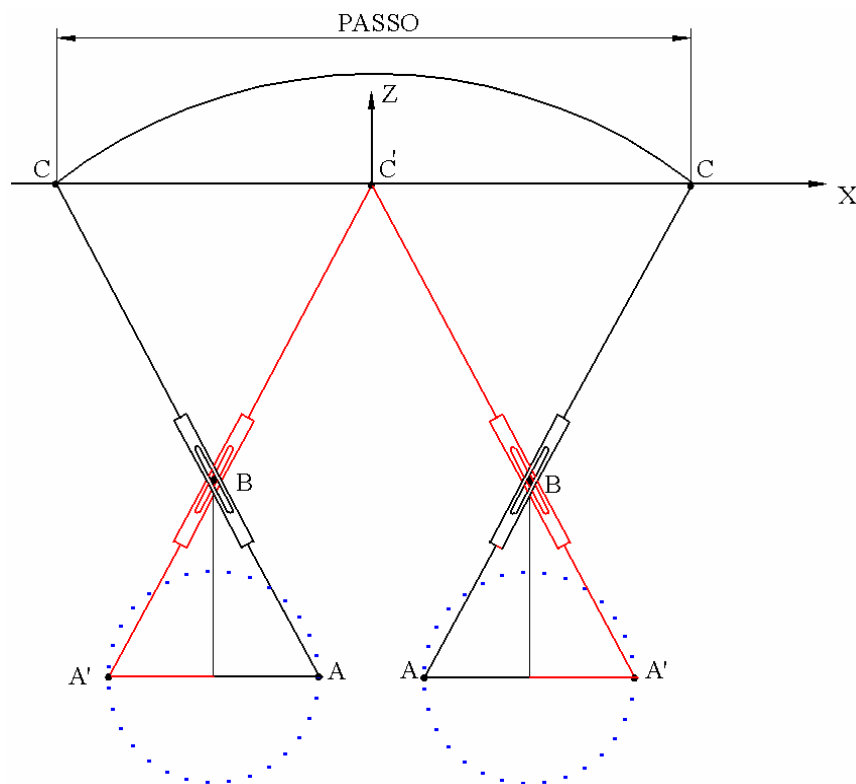


Figura 3.7. Análise de um passo.

Deve-se salientar que θ corresponde ao movimento de rotação da manivela que aciona a perna e que o pé só mantém contato com o fio quando θ varia entre π e 2π para a sua respectiva perna. A relação entre os ângulos α e θ pode ser obtida a partir das Figs. 3.4, 3.5 e 3.6.

As coordenadas do ponto O referente à perna esquerda são calculadas pelas Eqs. (3.18) e (3.17), dadas por:

$$x_0 = -r \cdot \cos \alpha \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - 1 \right)$$

$$z_0 = -\frac{a \cdot c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - r \cdot \sin \alpha \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - 1 \right)$$

Das Figuras 3.5 e 3.4, tem-se a relação entre α e θ :

$$\alpha = \theta - \pi \quad (3.21)$$

que, substituindo nas Eqs. (3.18) e (3.17) obtém-se:

$$x_0 = r \cdot \cos \theta \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 1 \right) \quad (3.22)$$

$$z_0 = -\frac{a \cdot c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} + r \cdot \sin \theta \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 1 \right) \quad (3.23)$$

Considerando a perna direita, as coordenadas do ponto O , são calculadas pelas Eqs. (3.19) e (3.20), ou seja:

$$x_0 = r \cdot \cos \alpha \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - 1 \right)$$

$$z_0 = -\frac{a \cdot c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - r \cdot \sin \alpha \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \alpha}} - 1 \right)$$

Das Figuras 3.6 e 3.4 tem-se a relação entre α e θ , isto é:

$$\alpha = 2\pi - \theta \quad (3.24)$$

Substituindo os valores da Eq. (3.38) nas Eqs. (3.19) e (3.20) obtém-se:

$$x_0 = r \cdot \cos \theta \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 1 \right) \quad (3.25)$$

$$z_0 = -\frac{a \cdot c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} + r \cdot \sin \theta \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 1 \right) \quad (3.26)$$

Pela análise das Eqs. (3.22), (3.23), (3.25) e (3.26) pode-se escrever as equações das coordenadas do ponto O (ou outro ponto do corpo do robô) que corresponde ao movimento do robô para n passos e θ variando entre π e 2π , ou seja:

$$x_0 = x_{oi} + r \cdot \cos[\theta + 2 \cdot (n-1) \cdot \pi] \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin[\theta + 2 \cdot (n-1) \cdot \pi]}} - 1 \right) \quad (3.27)$$

$$z_0 = -\frac{a \cdot c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin[\theta + 2 \cdot (n-1) \cdot \pi]}} + r \cdot \sin[\theta + 2 \cdot (n-1) \cdot \pi] \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin[\theta + 2 \cdot (n-1) \cdot \pi]}} - 1 \right) \quad (3.28)$$

Sendo x_{oi} a posição inicial do ponto O, relativo às pernas traseiras, escrito em relação ao referencial inercial fixo no fio, utilizado para descrever o movimento do robô.

A partir da Fig. 3.7 pode-se escrever que o comprimento do passo pode ser dado por:

$$passo = 4 \cdot \left| x_{o/\theta=0} \right|$$

Sendo $x_{o/\theta=0}$ a coordenada do ponto O quando $\theta=0$, ou seja:

$$x_{0/\theta=0} = \frac{-r.(c - \sqrt{a^2 + r^2})}{\sqrt{a^2 + r^2}}$$

Logo,

$$passo = 4.abs \left[\frac{-r.(c - \sqrt{a^2 + r^2})}{\sqrt{a^2 + r^2}} \right] \quad (3.29)$$

Na Figura 3.8, é apresentado um exemplo da trajetória do ponto O para um ciclo completo da manivela de entrada ($0 \leq \theta \leq 2\pi$), o que corresponde a dois passos do robô. Pode-se observar que o movimento do robô apresenta uma variação na direção z muito pequena em relação ao movimento horizontal. Para as dimensões do robô, este valor é de 0,35mm. Esta pequena oscilação garante a estabilidade da movimentação do robô, facilitando operações de manutenção e de filmagem dos equipamentos das linhas de telecomunicação e/ou de alta tensão.

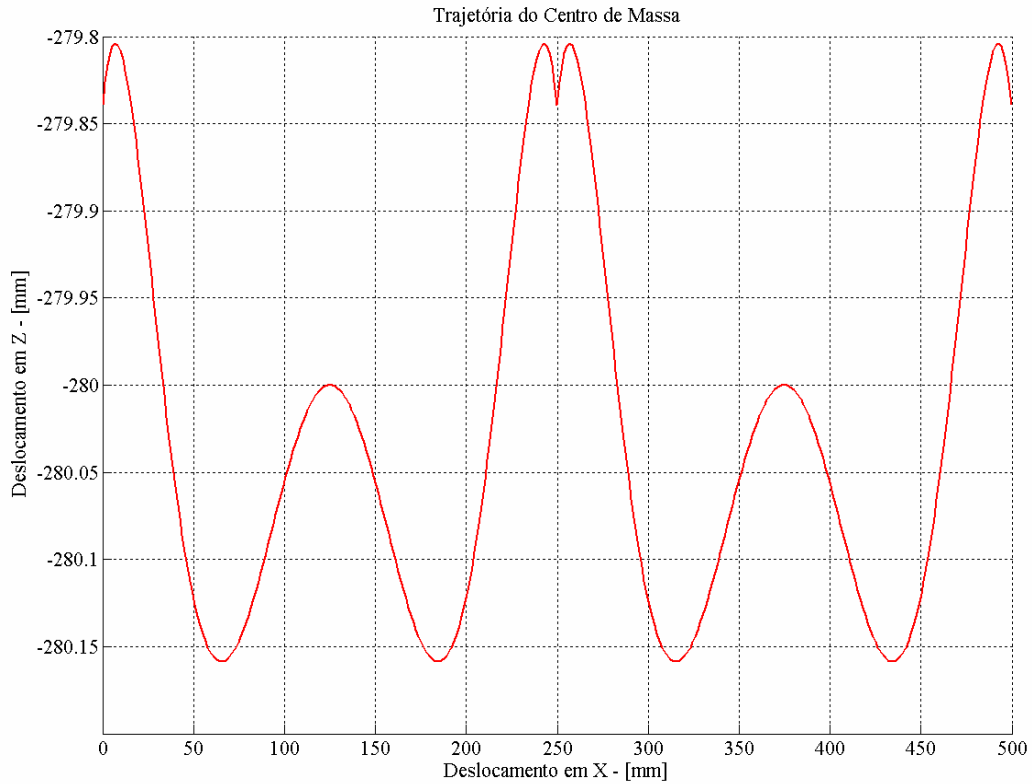


Figura 3.8. Trajetória do Ponto O para 1 ciclo do robô com pernas iguais.

($c = 330\text{mm}$, $r = 50\text{mm}$, $a = 80\text{mm}$).

3.6. Conclusões

Para modelagem cinemática do robô foram utilizadas relações trigonométricas. O movimento do robô pode ser generalizado para n passos. Utilizando-se das relações obtidas por Tsujimura, o movimento apresenta pequenas oscilações na vertical e que não afetam a estabilidade do robô. As pernas de comprimentos constantes não permitem que o robô supere obstáculos dispostos irregularmente no fio. O uso de pernas de comprimentos variáveis visa superar esta deficiência o que será apresentado no próximo Capítulo.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DO ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR FIO, UTILIZANDO-SE DE PERNAS DE COMPRIMENTOS DIFERENTES.

4.1. Análise Cinemática do Robô com pernas de comprimentos diferentes

De forma análoga ao desenvolvido para o robô com pernas de comprimentos iguais, na análise do robô com pernas de comprimentos diferentes considera-se que a cada instante, pelo menos dois pés, um dianteiro e outro traseiro, devem estar em contato simultaneamente com o fio de sustentação, garantindo o seu equilíbrio. Da mesma forma, as equações do movimento do robô são escritas considerando um referencial fixo no pé que está em contato instantaneamente com o fio.

Na Figura 4.1 é apresentado o esquema do robô possuindo pernas de comprimentos diferentes e seus parâmetros. Neste caso os segmentos AC , $A'C'$, OA e OB são denotados por d , c , r e a , respectivamente. Para a análise neste trabalho é considerado que a perna esquerda $A'C'$ é a perna menor e a perna direita AC é a maior.

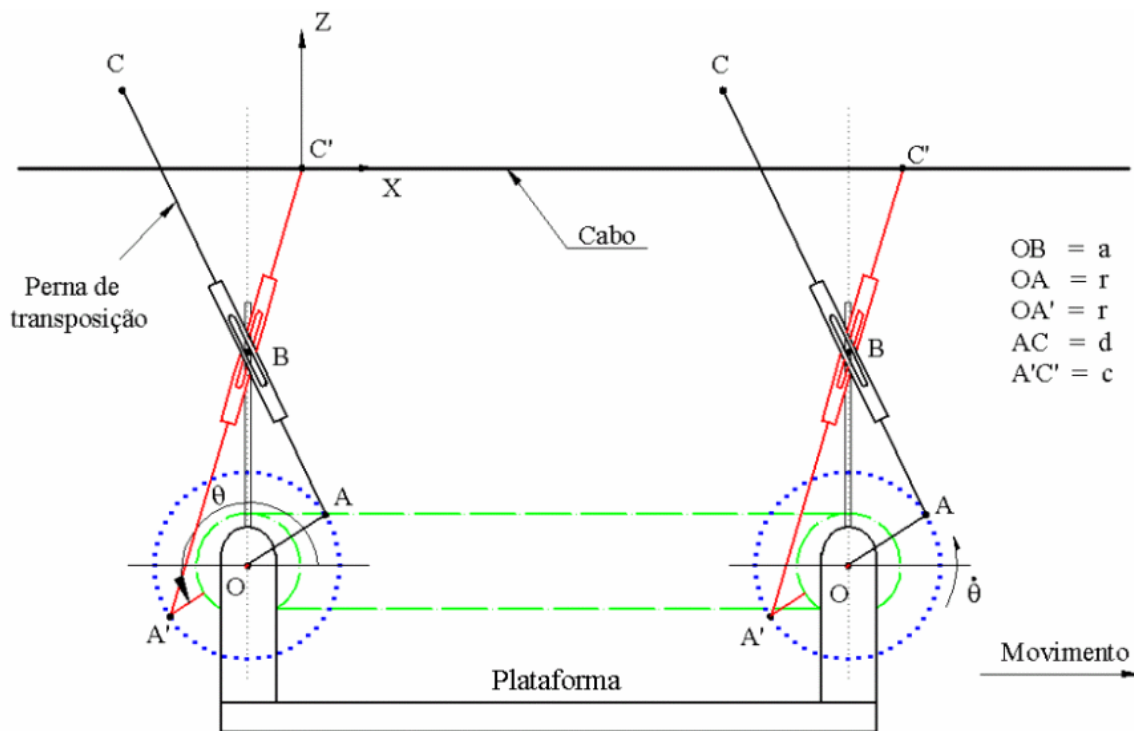


Figura 4.1. Esquema da Vista Lateral do Robô com pernas de comprimentos diferentes.

Na Figura 4.2 é representado o movimento do par de pernas, em função do ângulo de entrada θ . No caso do robô com pernas diferentes, ele descreve dois passos diferentes: o primeiro passo ocorre quando o pé da perna menor se mantém em contato com o fio (pé da perna esquerda sobre o fio), C' , assim, o pé da perna maior descreve uma trajetória no espaço acima do fio ($\pi - \theta_0 < \theta < 2\pi + \theta_0$). O segundo passo acontece quando o pé da perna maior se mantém em contato com o fio (pé da perna direita sobre o fio), C , e o pé da perna menor descreve uma trajetória no espaço acima do fio ($\theta_0 < \theta < \pi - \theta_0$). Para $\theta = \theta_0$ e $\theta = \pi - \theta_0$ os dois pés estão em contato com o fio simultaneamente. O ciclo corresponde a 2π radianos.

O movimento do par de pernas, em função do ângulo de entrada θ , pode ser analisado dividindo o ciclo em seis fases, definidas pela posição do pé em relação ao cabo, Fig. 4.2. O início do movimento é considerado quando os dois pés estão em contato com o cabo, na posição em que $\theta = \pi - \theta_0$. Novamente é considerado que o movimento tem início com o pé direito se afastando do fio e o pé esquerdo apoiado sobre o fio (pé da perna menor), desta forma, o robô move-se da esquerda para direita. Na Tabela 4.1 está o resumo da movimentação de um ciclo do par de pernas do robô.

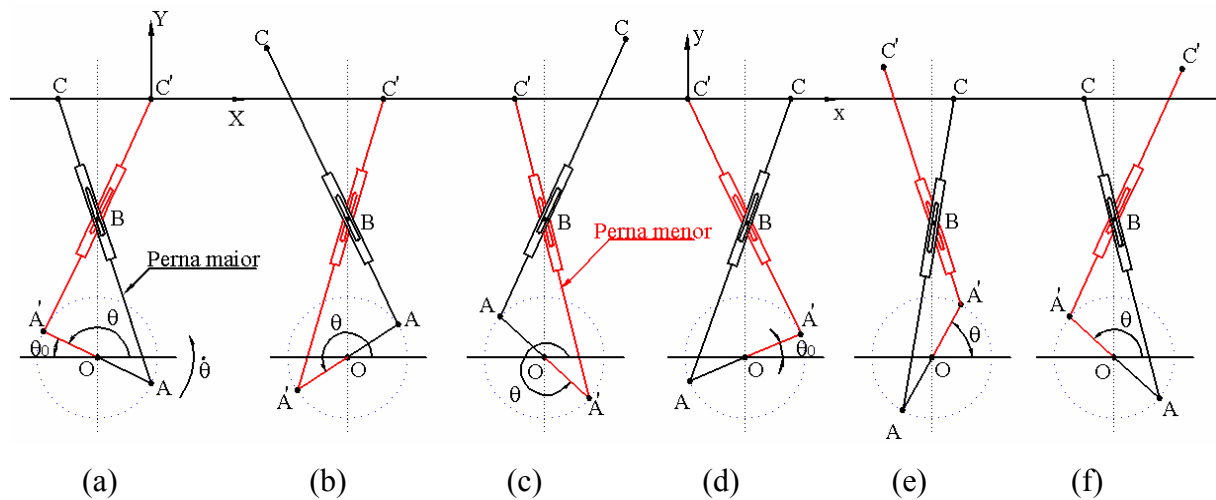


Figura 4.2. Fases de movimento de um par de pernas quando os comprimentos são diferentes.

Tabela 4.1. Ciclo completo de um par de pernas em função do ângulo de entrada.

Ângulo de entrada θ	Ciclo de Movimentação do Robô	Fig.
$\theta = \pi - \theta_0$	Posição Inicial (os dois pés estão em contato com o fio)	4.1a
$\pi - \theta_0 < \theta \leq 3\pi/2$	Pé da perna maior deixa o cabo para atingir sua altura máxima	4.1b
$3\pi/2 < \theta < 2\pi + \theta_0$	Pé da perna maior se aproxima do cabo. O pé da perna maior retorna ao fio para o início da troca de pernas.	4.1c
$\theta = \theta_0$	Os dois pés estão em contato com o fio.	4.1d
$\theta_0 < \theta \leq \pi/2$	Pé da perna menor deixa o cabo para atingir sua altura máxima	4.1e
$\pi/2 < \theta < \pi - \theta_0$	Pé da perna menor se aproxima do cabo para o apoio quando $\theta = \pi - \theta_0$	4.1f

Pode-se observar que entre $\pi - \theta_0 < \theta \leq \theta_0$ a perna menor, pé C' , mantém contato com o fio e movimenta o robô da esquerda para direita. Da mesma forma, para $\theta_0 < \theta \leq \pi - \theta_0$, o pé da perna maior (C) mantém contato com o fio e continua o movimento do robô.

4.1.1. Análise do par de pernas de comprimentos diferentes

A análise da trajetória descrita pelos pés, bem como do ponto O do robô, é realizada de forma similar para o caso em que as pernas são iguais. A diferença básica consiste em que, quando os dois pés estão em contato com o fio, a manivela de entrada já percorreu um certo deslocamento angular. Isto faz com que os passos dados por cada perna sejam diferentes.

Para a análise, é considerado que a perna direita AC é a mais longa e a perna esquerda $A'C'$ é a mais curta. Na Figura 4.3 está o esquema do par de pernas de comprimentos diferentes. O referencial $C'XZ$ é fixo no ponto C' , extremo da perna $A'C'$. As coordenadas do ponto O , que possuem o mesmo comportamento da trajetória da plataforma do robô, podem ser obtidas a partir da perna que mantém contato com o fio, bem como as equações que definem a trajetória do pé que está fora do fio. Para facilitar a obtenção das equações, elas são escritas para um ângulo β , definido na Fig. 4.3, e depois relacionado com o ângulo θ que define o movimento de rotação da manivela.

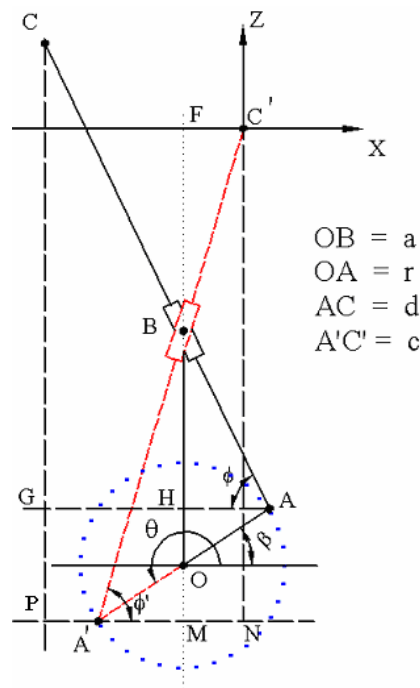


Figura 4.3. Parâmetros de um par de pernas de comprimentos diferentes, com a perna maior fazendo o voleio.

Considerando inicialmente o contato do pé C' com o fio pode-se escrever as equações das coordenadas correspondentes ao ponto O quando o pé C está se afastando do fio. Os parâmetros para esta condição possuem um (') na sua notação.

Da Figura 4.3 tem-se que:

$$x_O' = -c \cdot \cos \phi' + r \cdot \cos \beta \quad (4.1)$$

$$z_O' = -c \cdot \sin \phi' + r \cdot \sin \beta \quad (4.2)$$

Pelas relações trigonométricas obtidas nos triângulos $A'BM$ e $A'OB$ pode-se obter o valor de $\sin \phi'$ e $\cos \phi'$ dados por:

$$\sin \phi' = \frac{a + r \cdot \sin \beta}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} \quad (4.3)$$

$$\cos \phi' = \frac{A'M}{A'B} = \frac{r \cdot \cos \beta}{A'B} \quad (4.4)$$

que, substituindo nas Eqs. (4.1) e (4.2) obtém-se as coordenadas do ponto O quando o pé C' (correspondente à perna menor) está em contato com o fio, ou seja:

$$x_O' = r \cdot \cos \beta \cdot \left(-\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + 1 \right) \quad (4.5)$$

$$z_O' = -\frac{c \cdot (a + r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + r \cdot \sin \beta \quad (4.6)$$

As coordenadas do pé C que definem sua trajetória no espaço podem ser obtidas com o referencial em C' . A partir da Fig. 4.3 pode-se escrever:

$$x_C = -(GH + MN) \quad (4.7)$$

$$z_C = CP - C'N \quad (4.8)$$

A partir de relações trigonométricas dos triângulos ACG , BHA , ABO , BAM e $C'AN$ pode-se obter os valores de GH , MN , CP e CN . Conseqüentemente, as coordenadas x_c e z_c relativas à trajetória do pé C , quando o pé C' está sobre o fio são dadas por:

$$x_c = r \cdot \cos \beta \left(2 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} \right) \quad (4.9)$$

$$z_c = \frac{d \cdot (a - r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + 2 \cdot r \cdot \sin \beta - \frac{c \cdot (a + r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} \quad (4.10)$$

Analogamente, pode-se determinar as equações para a trajetória do ponto O e do pé C do robô, quando ele está se aproximando do fio, Fig. 4.4.

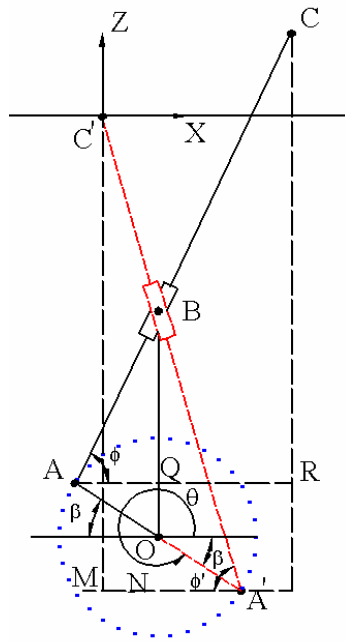


Figura 4.4. Parâmetros de um par de pernas de comprimentos diferentes, com a perna maior aproximando-se do fio.

Pela análise da Fig. 4.4, obtém-se as Equações (4.11) e (4.12) que permitem determinar a trajetória do ponto O , ou seja:

$$x_O' = r \cdot \cos \beta \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} - 1 \right) \quad (4.11)$$

Para a continuação do ciclo de movimento, a perna maior estará em contato com o fio movimentando o corpo do robô, enquanto a perna menor descreverá sua trajetória acima do fio. Nesta segunda parte do ciclo tem-se que para $\theta = \theta_0$ os dois pés estão em contato com o fio simultaneamente e o pé da perna menor iniciará uma trajetória no espaço acima do fio no intervalo de $(\theta_0 < \theta < \pi - \theta_0)$.

Pela análise da Fig. 4.6 pode-se obter as relações que definem as coordenadas da trajetória do pé C' , quando está se afastando do fio, bem como do ponto O do robô.

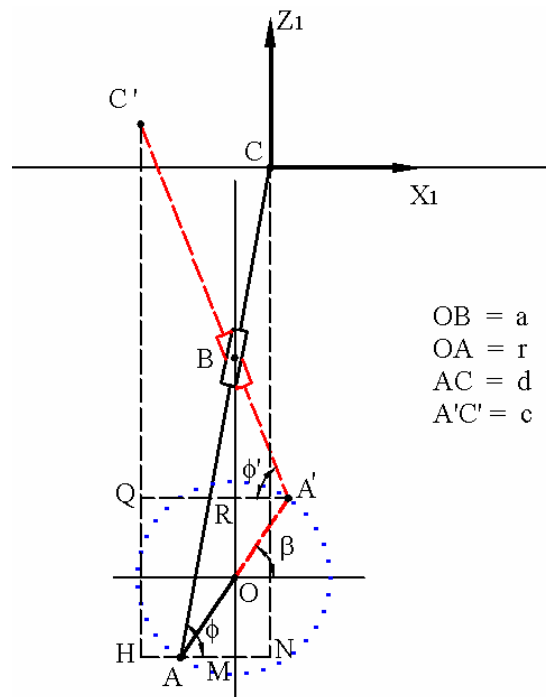


Figura 4.6. Parâmetros de um par de pernas de comprimentos diferentes, com a perna menor fazendo o voleio.

A trajetória do pé C' pode ser obtida pelas suas coordenadas, ou seja:

$$x_{C'} = -(QR + MN) \quad (4.15)$$

$$z_{C'} = C'H - CN \quad (4.16)$$

Pela análise dos triângulos $C'QA'$, BRA' , ABO , CAN , BAM e ABO pode-se escrever as relações que permitem determinar os valores de QR , MN , CH e CN . Logo, as coordenadas da trajetória do pé C' quando de seu afastamento do fio podem ser escritas na forma:

$$x_{C'} = r \cdot \cos \beta \left(2 - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} \right) \quad (4.17)$$

$$z_{C'} = \frac{c(a - r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} - \frac{d(a + r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + 2 \cdot r \cdot \sin \beta \quad (4.18)$$

A trajetória do ponto O pode ser calculada por:

$$x_o = -MN \quad (4.19)$$

$$z_o = -(CN - OM) \quad (4.20)$$

Os valores de MN , CN e OM podem ser obtidos pelas mesmas relações utilizadas para obter a trajetória do pé C . Assim, tem-se:

$$x_o = -\frac{d \cdot r \cdot \cos \beta}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + r \cdot \cos \beta \quad (4.21)$$

$$z_o = -\frac{d \cdot (a + r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + r \cdot \sin \beta \quad (4.22)$$

A partir da Fig. 4.7, analogamente ao exposto anteriormente, pode-se determinar as equações do ponto O e da trajetória do pé C' quando este está aproximando do fio.

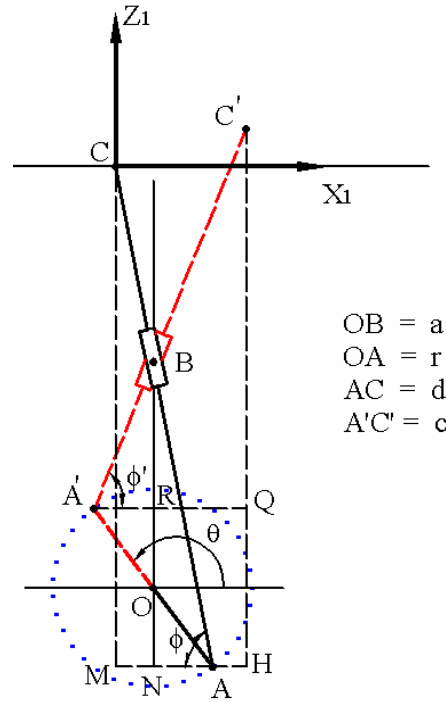


Figura 4.7. Parâmetros do par de pernas, quando a perna menor está aproximando-se do fio.

Neste caso, as coordenadas que definem a trajetória do pé da perna menor são:

$$x_{C'} = r \cdot \cos \beta \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} - 2 \right) \quad (4.23)$$

$$z_{C'} = \frac{c(a - r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} - \frac{d(a + r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + 2 \cdot r \cdot \sin \beta \quad (4.24)$$

Da mesma forma, a trajetória do ponto O é dada por:

$$x_O = r \cdot \cos \beta \left(\frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} - 1 \right) \quad (4.25)$$

$$z_O = -\frac{d(a + r \cdot \sin \beta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \beta}} + r \cdot \sin \beta \quad (4.26)$$

Através das Figs. 4.2 à 4.7, pode-se relacionar o ângulo β com o ângulo θ que define o movimento de rotação da manivela. Assim, as equações que definem a trajetória do ponto O e dos pés do robô podem ser escritas como:

Para o 1º Quadrante,

$$\beta = \theta \begin{cases} \cos \beta = \cos \theta \\ \sin \beta = \sin \theta \end{cases} \quad (4.27)$$

Substituindo estes valores nas Eqs. (4.21), (4.22), (4.17) e (4.18), obtém-se:

$$x_o = r \cdot \cos \theta \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} \right) \quad (4.28)$$

$$z_o = r \cdot \sin \theta - \frac{d \cdot (a + r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} \quad (4.29)$$

$$x_C' = r \cdot \cos \theta \left(2 - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} \right) \quad (4.30)$$

$$z_C' = \frac{c(a - r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - \frac{d(a + r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} + 2 \cdot r \cdot \sin \theta \quad (4.31)$$

Para o 2º Quadrante,

$$\beta = \pi - \theta \begin{cases} \cos \beta = -\cos \theta \\ \sin \beta = \sin \theta \end{cases} \quad (4.32)$$

Substituindo estes valores nas Eqs. (4.25), (4.26), (4.23) e (4.24), tem-se

$$x_o = r \cdot \cos \theta \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} \right) \quad (4.33) \equiv (4.28)$$

$$z_o = r \cdot \sin \theta - \frac{d(a + r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} \quad (4.34) \equiv (4.29)$$

$$x_C' = r \cdot \cos \theta \left(2 - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} \right) \quad (4.35) \equiv (4.30)$$

$$z_C' = \frac{c(a - r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - \frac{d(a + r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} + 2 \cdot r \cdot \sin \theta \quad (4.36) \equiv (4.31)$$

Para o 3º Quadrante,

$$\beta = \theta - \pi \begin{cases} \cos \beta = -\cos \theta \\ \sen \beta = -\sen \theta \end{cases} \quad (4.37)$$

Substituindo nas Eqs. (4.5), (4.6), (4.9) e (4.10), obtém-se:

$$x_O' = r \cdot \cos \theta \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - 1 \right) \quad (4.38)$$

$$z_O' = -\frac{c \cdot (a - r \cdot \sen \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - r \cdot \sen \theta \quad (4.39)$$

$$x_C = r \cdot \cos \theta \cdot \left(\frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} + \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - 2 \right) \quad (4.40)$$

$$z_C = \frac{d \cdot (a + r \cdot \sen \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - 2 \cdot r \cdot \sen \theta - \frac{c \cdot (a - r \cdot \sen \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} \quad (4.41)$$

Para o 4º Quadrante,

$$\beta = 2\pi - \theta \begin{cases} \cos \beta = \cos \theta \\ \sen \beta = -\sen \theta \end{cases} \quad (4.42)$$

Substituindo estes valores nas Eqs. (4.11), (4.12), (4.13) e (4.14), tem-se:

$$x_O' = r \cdot \cos \theta \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - 1 \right) \quad (4.43)$$

$$z_O' = -\frac{c \cdot (a - r \cdot \sen \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - r \cdot \sen \theta \quad (4.44)$$

$$x_C = r \cdot \cos \theta \cdot \left(\frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} + \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - 2 \right) \quad (4.45)$$

$$z_C = \frac{d \cdot (a + r \cdot \sen \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} - 2 \cdot r \cdot \sen \theta - \frac{c \cdot (a - r \cdot \sen \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sen \theta}} \quad (4.46)$$

Pode-se observar que as seguintes equações são idênticas: Eq. (4.43) e Eq. (4.38), Eq. (4.44) e Eq. (4.39), Eq. (4.45) e Eq. (4.40), Eq. (4.46) e Eq. (4.41).

Após o estudo cinemático do par de pernas de comprimentos diferentes, pode-se realizar a análise do comportamento do robô para o seu ponto O e para seus pés, considerando o movimento de um ciclo completo da manivela de entrada.

No caso do robô com pernas de comprimentos diferentes, este apresenta dois passos diferentes, um relativo a perna menor e outro para perna maior. Para facilitar a análise do movimento do ciclo é considerado que cada ciclo tem início com os dois pés sobre o fio e a perna menor iniciando seu voleio (deixando o fio). Para isto nas Eqs. (4.28) à (4.46) deve-se substituir θ por $(\theta + \theta_0)$ com θ variando de 0 à 2π .

Assim, substituindo θ por $\theta + \theta_0$ obtém-se:

$$x_C' = r \cdot \cos(\theta + \theta_0) \left(2 - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} \right) \quad (4.47)$$

$$z_C' = \frac{c[a - r \cdot \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} - \frac{d[a + r \cdot \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} + 2 \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0) \quad (4.48)$$

Para as Equações das coordenadas que definem a trajetória do pé C , definidas no 3º e 4º quadrantes, deve-se substituir θ por $\theta + \theta_0$ obtém-se:

$$x_C = r \cdot \cos(\theta + \theta_0) \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} - 2 \right) \quad (4.49)$$

$$z_C = \frac{d[a + r \cdot \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} - 2 \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0) - \frac{c[a - r \cdot \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} \quad (4.50)$$

O passo da perna menor, p_{pc} , e da perna maior, p_{pl} podem ser calculados, respectivamente por:

$$p_{pc} = 2 \left| r \cdot \cos \theta_0 \left(2 - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta_0}} - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta_0}} \right) \right| \quad (4.51)$$

$$p_{pl} = 2 \left| r \cdot \cos \theta_0 \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta_0}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta_0}} - 2 \right) \right| \quad (4.52)$$

Da mesma forma, as equações que definem a trajetória do centro de massa quando o pé da perna menor, C' , está em contato com o fio, definidas no 3º e 4º quadrantes são iguais, ou seja: Eq. (4.43) $\equiv$ (4.38) e Eq. (4.44) $\equiv$ (4.39). Pela substituição de θ por $\theta + \theta_0$ obtém-se:

$$x_{O'} = r \cdot \cos(\theta + \theta_0) \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} - 1 \right) \quad (4.53)$$

$$z_{O'} = - \frac{c \cdot [a - r \cdot \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} - r \cdot \sin(\theta + \theta_0) \quad (4.54)$$

As equações que definem a trajetória do ponto O quando o pé da perna maior, C , está em contato com o fio, definidas para o 1º e 2º quadrante são iguais, ou seja: Eq. (4.33) $\equiv$ (4.28) e Eq. (4.34) $\equiv$ (4.29). Substituindo θ por $\theta + \theta_0$ tem-se:

$$x_o = r \cdot \cos(\theta + \theta_0) \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} \right) \quad (4.55)$$

$$z_o = r \cdot \sin(\theta + \theta_0) - \frac{d \cdot [a + r \cdot \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\theta + \theta_0)}} \quad (4.56)$$

O deslocamento ao longo do fio do ponto O quando o pé da perna menor está em contato com o fio, p_{oc} , e o pé da perna maior, p_{ol} , são calculados por:

$$p_{oc} = 2 \left| r \cdot \cos \theta_0 \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta_0}} - 1 \right) \right| \quad (4.57)$$

$$p_{ol} = 2 \left| r \cdot \cos \theta_0 \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta_0}} \right) \right| \quad (4.58)$$

Assim, o deslocamento ao longo do fio de um ciclo de movimento do ponto O do robô, correspondente a θ variando de 0 à 2π pode ser calculado por:

$$deslocamento_{1ciclo} = p_{oc} + p_{ol} \quad (4.59)$$

A partir das relações obtidas não é possível obter uma expressão analítica explícita que permita obter o valor de θ_0 em função dos parâmetros da perna. Neste trabalho foi utilizado o software Matlab[®] para o cálculo de θ_0 a partir de parâmetros a ; r ; c e d conhecidos do robô. No caso, foi utilizada a Eq. (4.50) cuja solução fornece cinco valores, dos quais quatro são imaginários, não tendo significado físico no problema analisado, e uma solução real.

Finalmente, pode-se escrever a trajetória do ponto O do robô móvel para um ciclo, considerando um referencial em uma posição genérica sobre o fio, definidas pelas coordenadas x_{cm} e z_{cm} , Eqs. (4.65) e (4.66), respectivamente. Com o auxílio da Fig. 4.8, foi introduzido um parâmetro σ , sendo que $\sigma = l$ corresponde ao pé da perna menor no espaço (acima do fio) e $\sigma = 0$ quando em contato com o fio.

Sendo $x_{o\text{inicial}}$ correspondente à distância, ao longo do fio, da origem do referencial ao ponto O , x_O é dada pela Eq. (4.55) e $x_O(\theta = \theta_0)$, corresponde a posição em que os dois pés estão em contato com o fio, Fig. 4.8 (a). Para o cálculo deste valor pode-se utilizar a Eq. (4.33), substituindo θ por θ_0 obtém-se:

$$x_O(\theta = \theta_0) = r \cdot \cos \theta_0 \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta_0}} \right) \quad (4.62)$$

e

$$\Delta x_O' = x_O' - x_O'(\theta = \pi - \theta_0) \quad (4.63)$$

Onde x_O' é dado pela Eq. (4.53) e $x_O'(\theta = \pi - \theta_0)$, corresponde a posição em que os dois pés estão em contato com o fio (troca de pés de apoio), Fig. 4.8 (c). Para o cálculo deste valor pode-se utilizar a Eq. (4.43), substituindo θ por $\pi - \theta_0$, obtém-se:

$$x_O'(\theta = \pi - \theta_0) = r \cdot \cos(\pi - \theta_0) \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\pi - \theta_0)}} - 1 \right) \quad (4.64)$$

Substituindo as expressões na Eq. (4.60) obtém-se:

$$\begin{aligned}
x_{cm} = x_{oinicial} + \sigma & \left[\begin{aligned} & -r \cos \theta_0 \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin \theta_0}} \right) + \\ & r \cdot \cos(\theta + \theta_0) \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\text{sen}(\theta + \theta_0)}} \right) \end{aligned} \right] + \\
(1 - \sigma) & \left[\begin{aligned} & -r \cos(\pi - \theta_0) \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin(\pi - \theta_0)}} - 1 \right) + \\ & r \cos(\theta + \theta_0) \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin(\theta + \theta_0)}} - 1 \right) \end{aligned} \right] + \\
2(1 - \sigma) & \left[\left[r \cos \theta_0 \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin \theta_0}} \right) \right] \right]
\end{aligned} \tag{4.65}$$

$$\begin{aligned}
z_{cm} = (1 - \sigma) & \left\{ -r \sin(\theta + \theta_0) - \frac{c[a - r \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin(\theta + \theta_0)}} \right\} + \\
\sigma & \left\{ -\frac{d[a + r \sin(\theta + \theta_0)]}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin(\theta + \theta_0)}} + r \sin(\theta + \theta_0) \right\}
\end{aligned} \tag{4.66}$$

Da análise cinemática das trajetórias dos pés, e utilizando-se do parâmetro binário σ , pode-se escrever uma equação geral das coordenadas que permitem obter as trajetórias dos pés do robô quando estão no espaço. Para isto, pode-se considerar como referência o sistema de coordenadas $C'XY$ fixo no pé C' conforme Fig. 4.3. Estas coordenadas denominadas de x_p e z_p são dadas por:

$$x_p = \sigma[x'_c + x_c(\theta=\theta_0)] + (1 - \sigma)x_c \tag{4.67}$$

Sendo que $x_c(\theta=\theta_0)$ corresponde à posição do referencial auxiliar $CX_I Z_I$, conforme Fig. 4.5.

Substituindo as expressões anteriores obtém-se:

$$\begin{aligned}
x_p = & \sigma \left[r \cos(\theta + \theta_0) \left(2 - \frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin(\theta + \theta_0)}} - \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin(\theta + \theta_0)}} \right) + \right. \\
& \left. r \cos \theta_0 \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin \theta_0}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin \theta_0}} \right) - 2 \right] + \\
& + (1 - \sigma) \left[r \cos(\theta + \theta_0) \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin(\theta + \theta_0)}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin(\theta + \theta_0)}} - 2 \right) \right] \\
(4.68)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z_p = & (1 - \sigma) \left[\frac{d(a + rsin(\theta + \theta_0))}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin(\theta + \theta_0)}} - \frac{c(a - rsin(\theta + \theta_0))}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin(\theta + \theta_0)}} \right] - 2rsin \theta + \\
& \sigma \left[2rsin \theta - \frac{d(a + rsin(\theta + \theta_0))}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin(\theta + \theta_0)}} + \frac{c(a - rsin(\theta + \theta_0))}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2arsin(\theta + \theta_0)}} \right] \\
(4.69)
\end{aligned}$$

As Equações (4.65) e (4.66) permitem realizar o estudo da trajetória do ponto O do robô dotado de pernas de comprimentos diferentes. Da mesma forma, as Eqs. (4.68) e (4.69) permitem a análise da trajetória dos pés do robô. Estas equações são validas também para o estudo do robô possuindo pernas de comprimentos variáveis.

4.2. Simulações Numéricas do Robô com Pernas de Comprimentos Diferentes.

A partir das Eqs. (4.65) e (4.66) pode-se analisar o comportamento da trajetória do ponto O do robô móvel suspenso por fio, possuindo pernas de comprimentos diferentes. Para esta análise foi considerado que $x_{oinicial} = 0$, e que a perna menor sempre tem comprimento $c=330mm$.

Assim, a primeira parte do ciclo corresponde à perna maior sobre o fio, responsável pela movimentação do centro de massa e a segunda parte corresponde à perna menor sobre o fio.

Nas Figuras de 4.9 a 4.10 são apresentadas trajetórias do ponto O do robô mantendo a perna menor com o mesmo comprimento e variando o comprimento da perna maior.

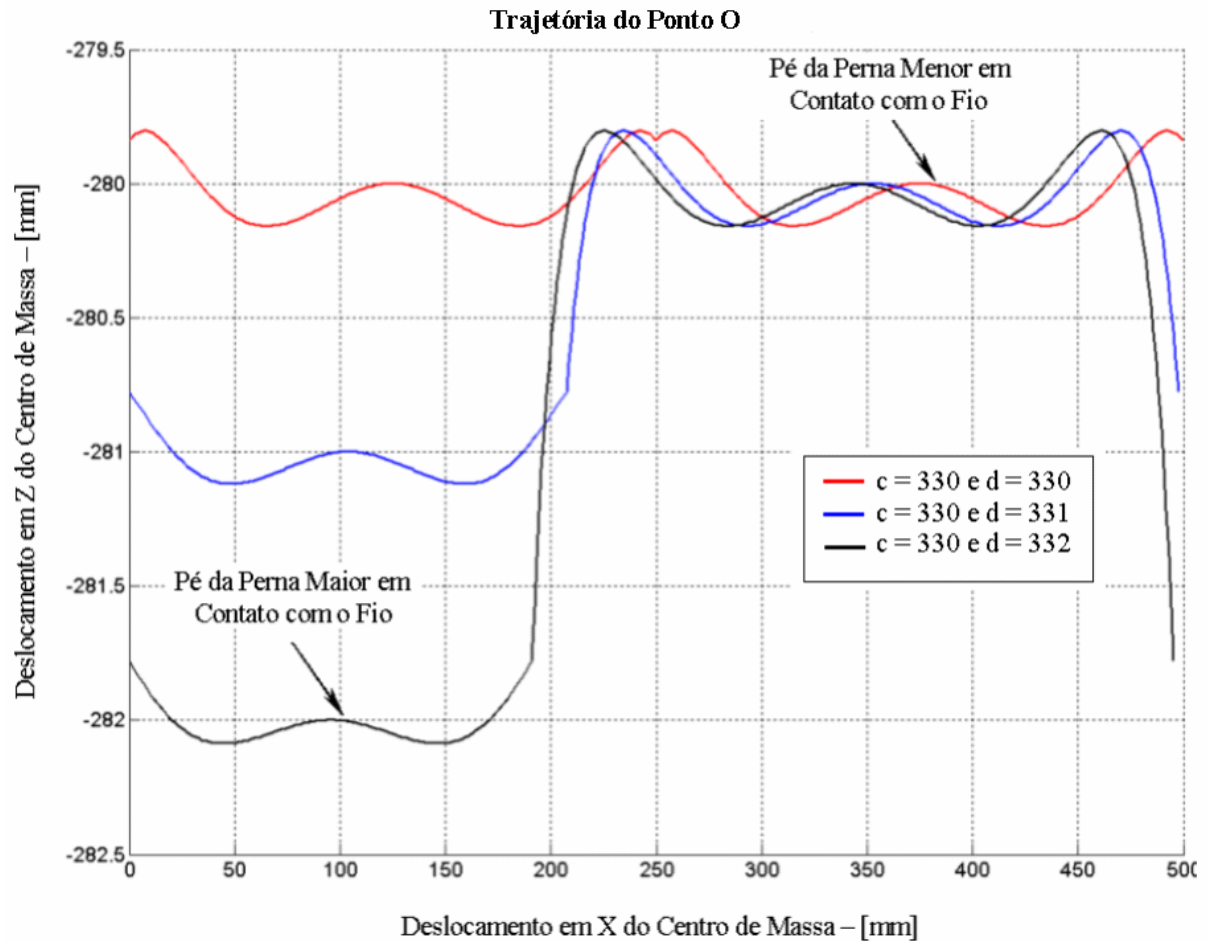


Figura 4.9. Trajetórias do Ponto O ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c=330\text{mm}$).

Na Figura 4.9, em vermelho, é apresentada a trajetória do ponto O do robô com comprimentos de pernas iguais. Na Figura pode-se notar que o comportamento do deslocamento vertical do ponto O , conforme descrito anteriormente, para o robô com pernas de comprimentos diferentes é dividido em duas partes: a primeira parte corresponde ao pé da perna maior em contato com o fio e, a segunda parte, ao pé da perna menor em contato com o fio. O deslocamento do ponto O , para a primeira e segunda partes do ciclo pode ser calculados pelas Eqs. (4.58) e (4.57) respectivamente. Desta forma, da Fig. 4.9 tem-se que o deslocamento horizontal do ponto O , quando o pé da perna maior está apoiado no fio, é menor do que o deslocamento horizontal quando o pé da perna menor está em contato com o fio. Deve-se destacar que na Figura 4.9 os eixos representativos dos deslocamento vertical e horizontal do ponto O não possuem a mesma escala.

Na Figura 4.10 são apresentados outros exemplos para a trajetória do ponto O do robô, sendo que as escalas dos eixos na direção vertical (Deslocamento em Z) e na horizontal (Deslocamento em X) são iguais.

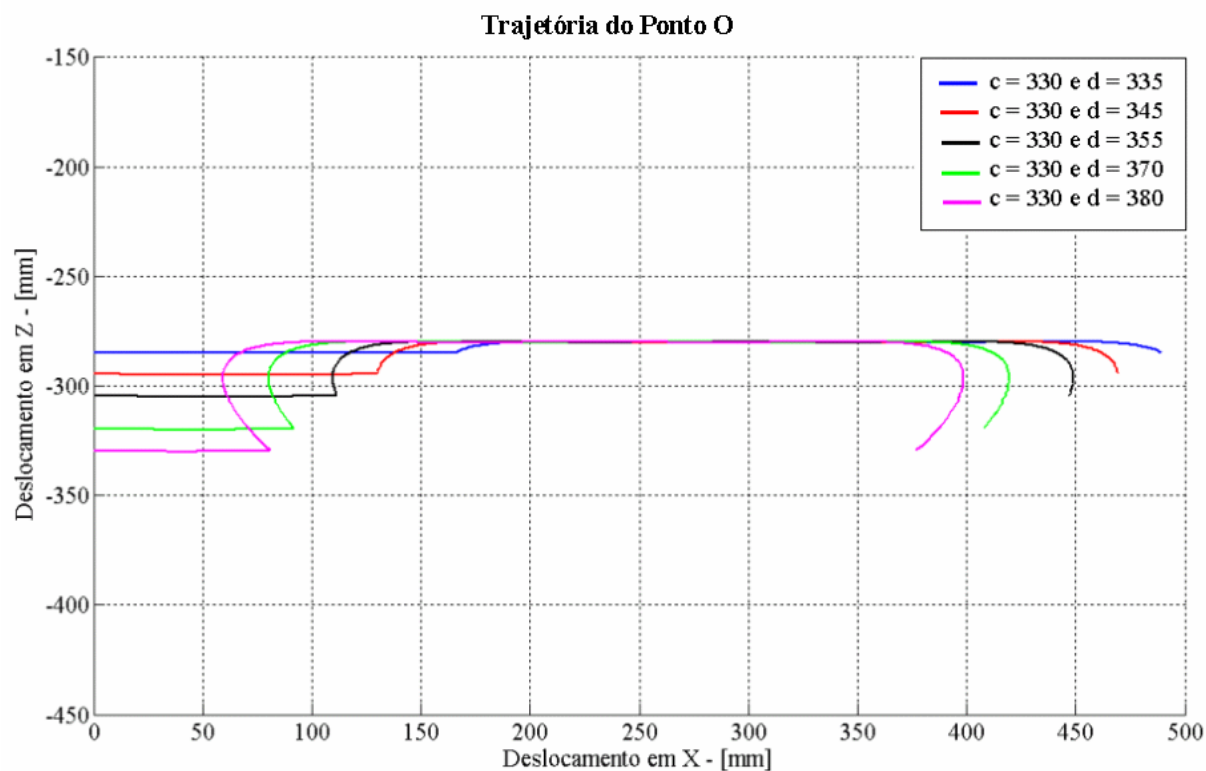


Figura 4.10. Trajetórias do Ponto O ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c = 330\text{mm}$).

A Figura 4.11 apresenta trajetórias dos pés do robô, novamente mantendo uma perna com comprimento fixo (perna menor) e variando o comprimento da outra perna. Estas trajetórias são traçadas a partir das Eqs. (4.68) e (4.69). Na análise da trajetória dos pés considera-se que a perna menor inicia a movimentação percorrendo sua trajetória no espaço, permanecendo o pé da perna maior sobre o fio. Na Figura 4.11, em vermelho está representada a trajetória dos pés do robô possuindo pernas de mesmo comprimento.

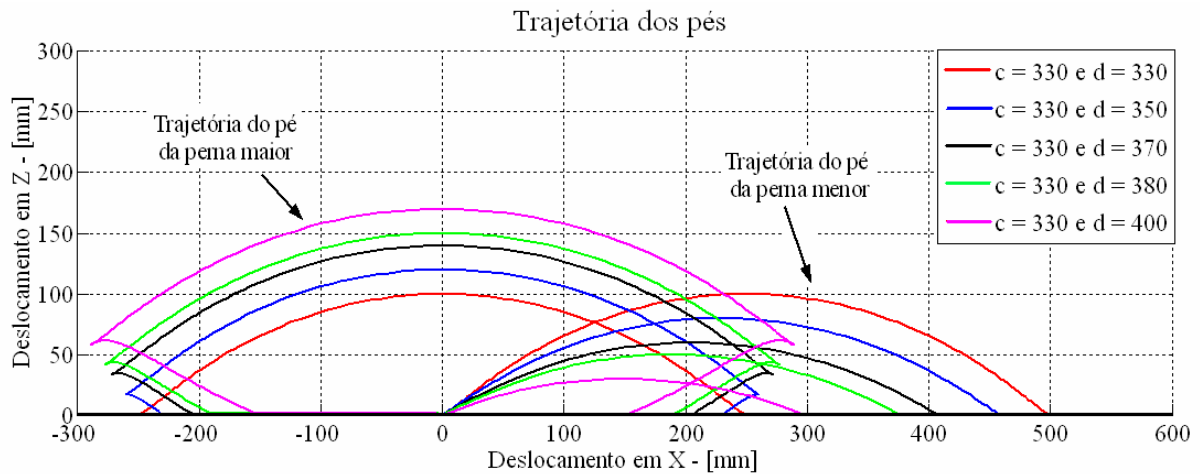


Figura 4.11. Trajetórias dos pés do robô ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c = 330\text{mm}$).

Na Figura 4.11 pode-se verificar nitidamente a diferença entre os tamanhos dos passos. Os passos do pé da perna menor e da perna maior podem ser calculados respectivamente pelas Eqs. (4.81) e (4.82).

4.3. Conclusões

Nas simulações tomou-se por base o comportamento do robô possuindo pernas iguais em que as relações ótimas de medidas garantem o movimento estável ou seja: $a : r : c = 1,6 : 1 : 6,6$ conforme descrito no Cap. 2. Os valores de referência são: $a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$ e $c = 330\text{mm}$. Assim, foi considerado uma perna de comprimento $c = 330\text{mm}$ e a outra aumentando de valor conforme indicações nas Figs. 4.9 a 4.11.

Das simulações, pode-se notar que quanto menor a relação c/d , menor é o passo da perna menor, mas também menor é o passo da perna maior. Pode-se verificar pela Fig. 4.11 que o pé da perna maior descreve uma trajetória “mais alta” mas recua para apoiar sobre o fio. Por esta mesma razão, o obstáculo que é possível ser transposto sem colisão também é menor, como pode ser visto na Fig. 4.12. Não foi possível estabelecer uma relação entre o tamanho dos obstáculos e a relação c/d , pois este tamanho depende da posição do obstáculo sobre o fio.

Na Figura 4.12 tem-se um obstáculo possível de ser ultrapassado pelo robô possuindo a perna maior com comprimento $d = 390\text{mm}$ e a perna menor $c = 330\text{mm}$, hachurado em preto. Da mesma forma, em vermelho está representado um obstáculo possível do robô transpor quando possui as pernas de mesmo comprimento.

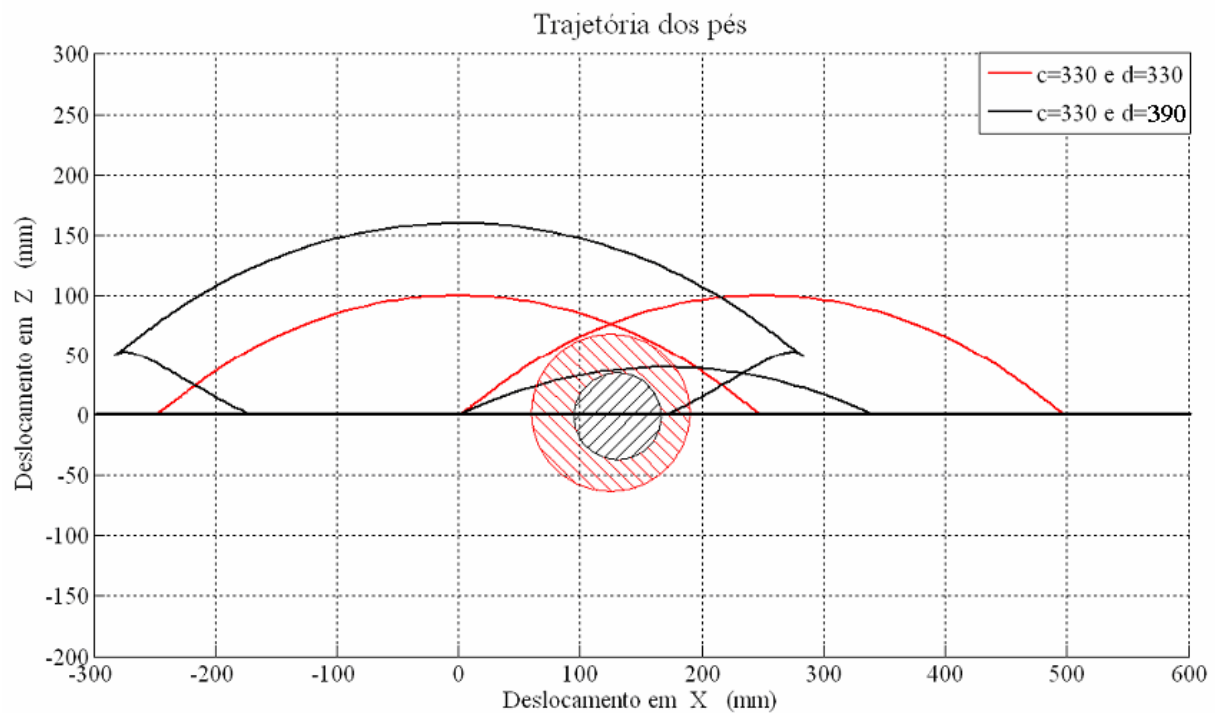


Figura 4.12. Trajetórias dos pés ultrapassando obstáculos ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$; $c=330\text{mm}$).

Deve-se ressaltar que simulações com o robô possuindo ambas as pernas de comprimentos maiores e diferentes, a trajetória obtida para os pés do robô apresenta o mesmo comportamento descrito anteriormente.

Simulações com o robô possuindo comprimentos de pernas diferentes das relações ótimas, por exemplo, $c=d=390\text{mm}$, a trajetória dos pés do robô apresentaram um comportamento que não permitiria sua aplicação prática. Neste caso, a trajetória do pé apresenta, na saída e no retorno ao fio, uma porção que passa abaixo do fio o que poderia significar um escorregamento ou travamento do mecanismo, Fig. 4.13 e 4.14.

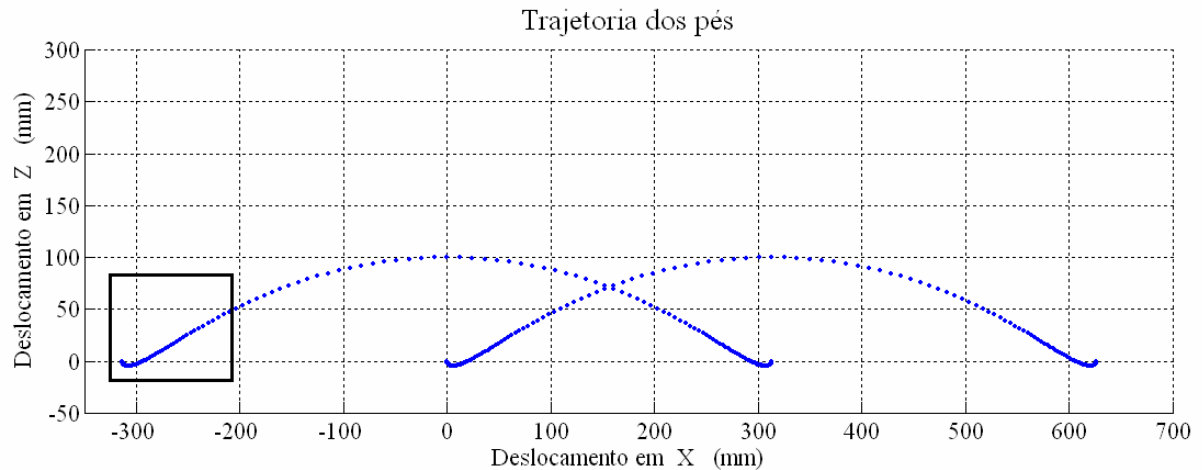


Figura 4.13. Comportamento não desejável para relações diferentes das não ótimas ($a = 80\text{mm}$; $r = 50\text{mm}$, $c = d = 390\text{mm}$).

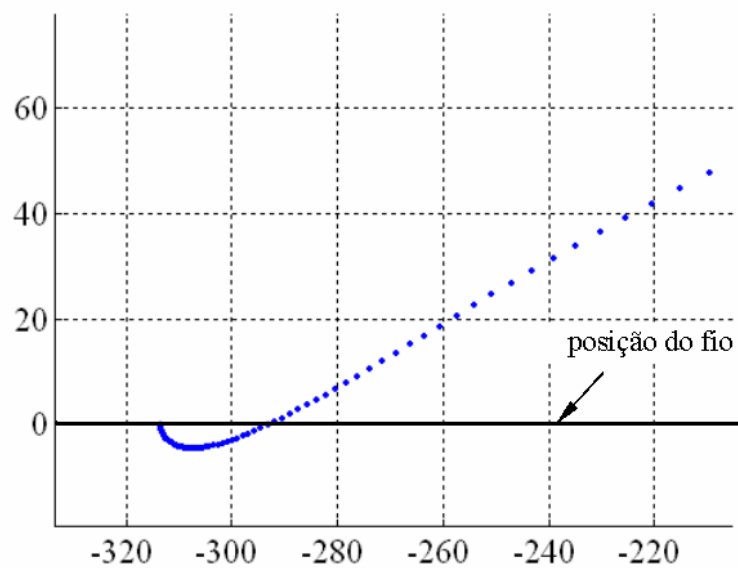


Figura 4.14. Detalhe ampliado do comportamento não desejável, da Figura 4.13.

Pela análise realizada, o robô possuindo pernas com comprimentos diferentes compromete a estabilidade do movimento e reduz o tamanho dos passos, além de poder superar obstáculos com dimensões reduzidas quando comparado com o robô com pernas iguais.

Entretanto, pode-se imaginar o robô mantendo o comprimento das pernas conforme as relações ótimas $a : r : c = 1,6 : 1 : 6,6$, somente para o pé que está em contato com o fio. Neste caso, a perna cujo pé passa a descrever a trajetória acima do fio, tem seu comprimento variável, o suficiente para transpor o obstáculo.

Nestas condições, quem define o movimento do robô são as pernas cujos pés estão sobre o fio, que, respeitando as relações dimensionais ótimas, o robô se moverá de forma estável. A variação do comprimento da perna que está fazendo a transposição não afeta o movimento do robô e esta variação deve seguir uma metodologia de detecção e transposição de obstáculos conforme descrito no próximo Capítulo.

