

Capítulo V

METODOLOGIA PARA TRANSPOSIÇÃO DE OBSTÁCULOS

Uma das principais características desejáveis para um robô móvel, é sua capacidade de transposição de obstáculo. Assim, para que o robô proposto neste trabalho possa transpor obstáculos dispostos aleatoriamente no fio, foi necessário definir procedimentos de transposição que são descritos neste capítulo.

5.1. Metodologia para Transposição de Obstáculo

Com o objetivo de desenvolver um robô móvel suspenso por fio para ser aplicado em operações em linhas de telecomunicação ou/e de alta tensão, nesta dissertação é proposto um robô móvel suspenso por fio, com quatro pernas, cada perna constituída por um mecanismo biela-manivela e de comprimento variável, sendo as quatro pernas movidas por um único motor. Cada perna tem seu comprimento variável através de um fuso, acionado por um motor de passo, Fig. 5.1. O projeto do robô com pernas de comprimentos variáveis é apresentado no Capítulo VI.

A Figura 5.1 apresenta a representação gráfica 3D do robô proposto e que foi utilizado nas simulações de transposição e, na Fig. 5.2, um esquema da vista lateral. Este esquema é semelhante ao apresentado na Fig. 4.1, mas, neste caso, as pernas AC e $A'C'$ possuem comprimentos variáveis. A variação dos comprimentos das pernas é realizada com a adição de um grau de liberdade à cada perna. Assim, a movimentação das quatro pernas é realizada por um conjunto de polias e correias sincronizadoras, acionadas por um único motor de corrente contínua, enquanto a variação do comprimento de cada perna é realizada através de um fuso acionado por um motor passo.

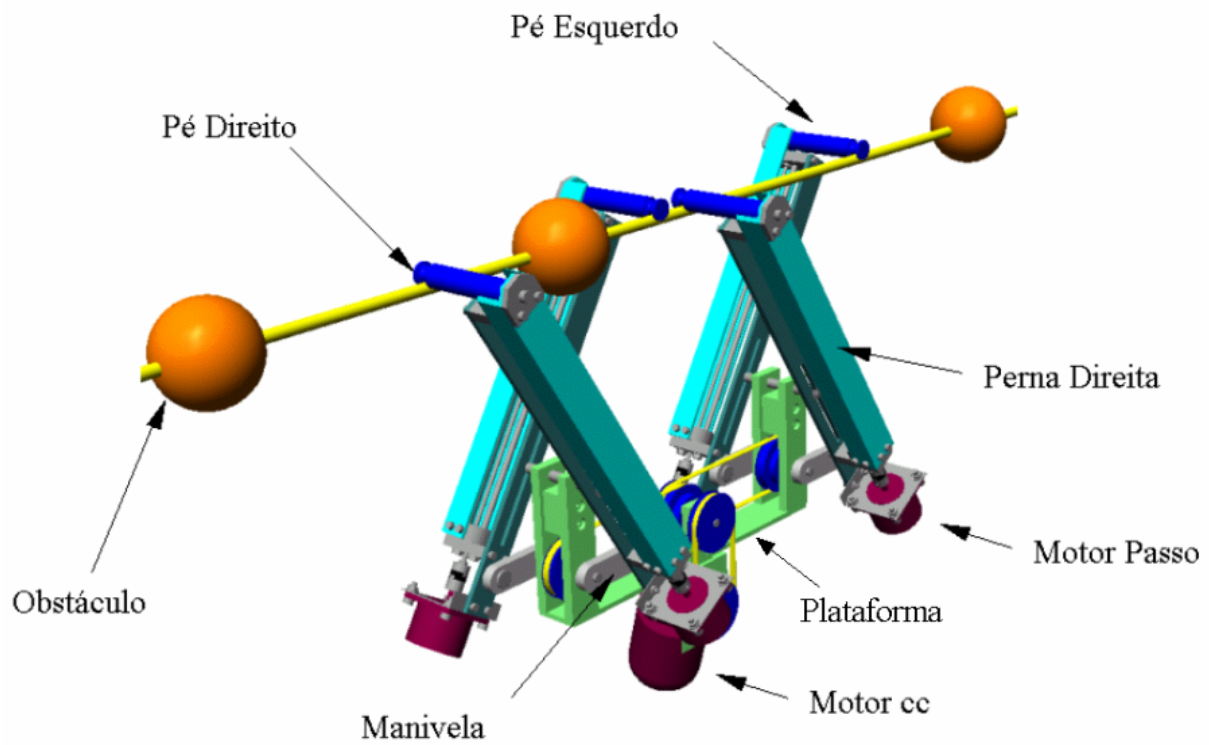


Figura 5.1. Representação 3D do Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas de Comprimentos Variáveis.

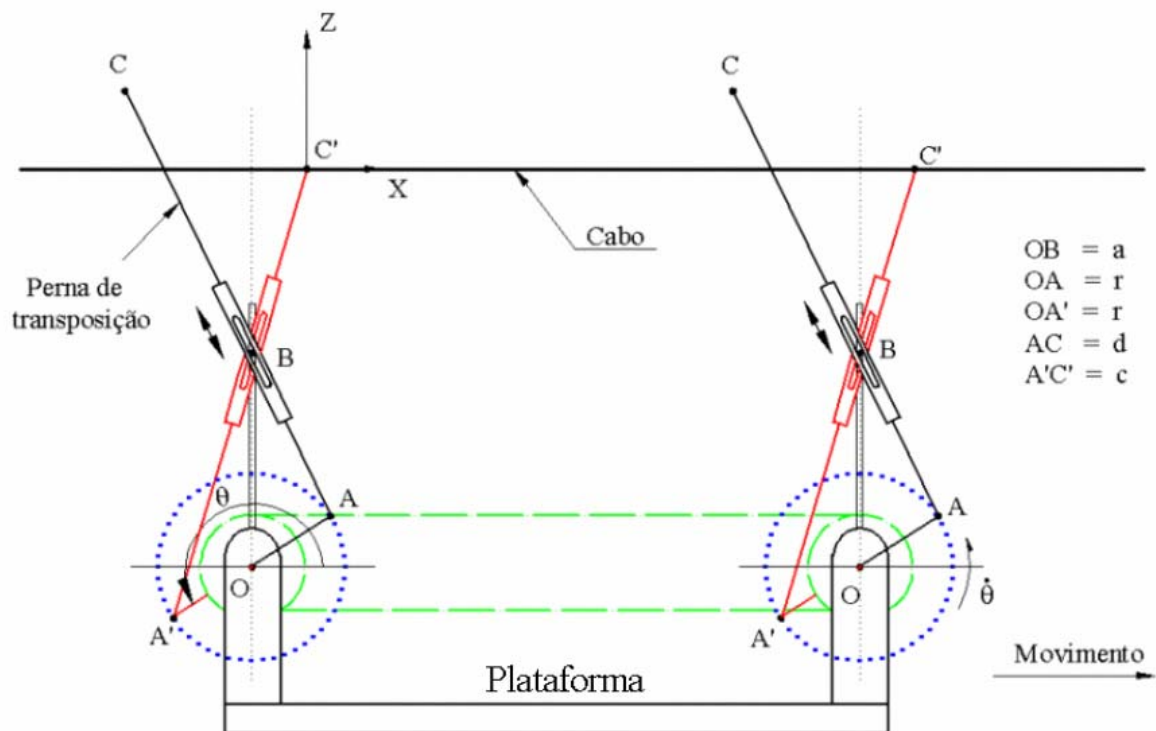


Figura 5.2. Esquema da Vista Lateral do Robô Móvel com Pernas de comprimentos Variáveis.

Para o estudo da transposição de obstáculos é necessário a definição de uma metodologia que permita ao robô transpor diferentes tipos de obstáculos, independentemente de sua posição no fio. Para este estudo, foi utilizado um obstáculo com um formato de uma esfera. Esta escolha foi feita com o intuito de aplicar este robô na manutenção das esferas de sinalização existentes nos cabos de alta tensão.

Para esta análise é denominado comprimento normal da perna, o comprimento que respeita a relação $a : r : c = 1,6 : 1 : 6,6$, conforme definido no Capítulo II.

Considera-se que o robô começa sua movimentação com as duas pernas em contato com o fio e sendo que elas possuem o comprimento normal. Nesta situação tem-se que $\theta_0 = 0$. Na Figura 5.3a é representada a posição inicial e na Fig. 5.3b o início do movimento quando a perna de comprimento d , começa a movimentação, seu pé fazendo o voleio sobre o pé C' .

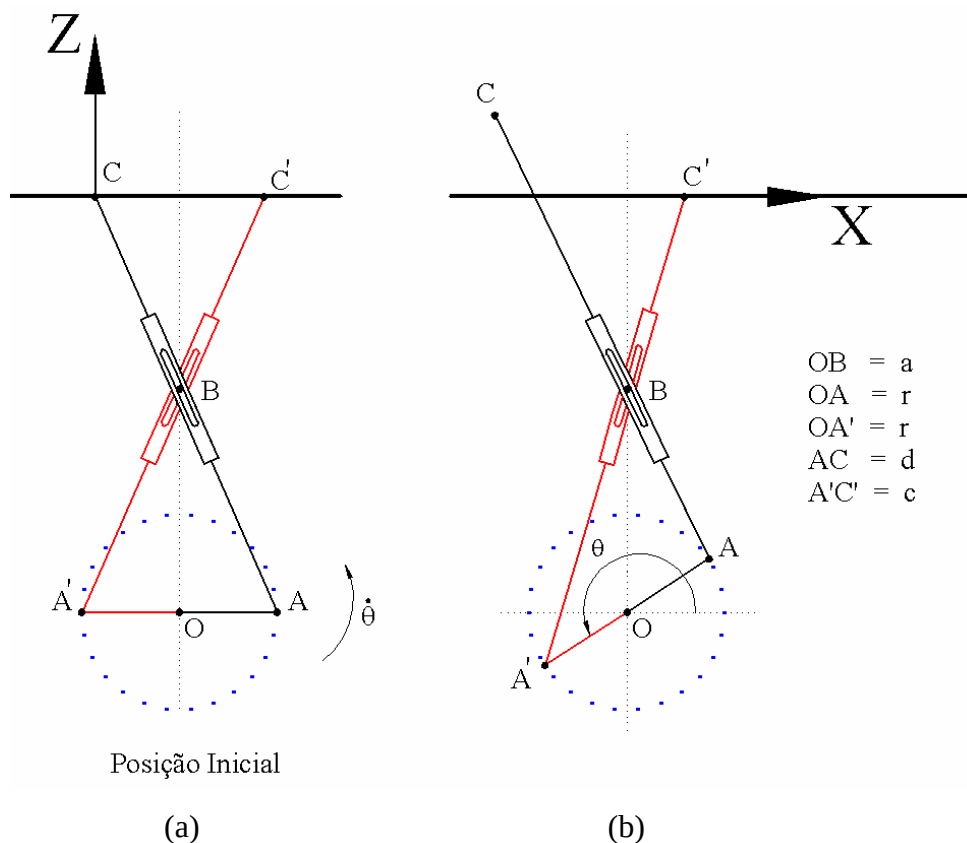


Figura 5.3. (a) Pernas no início do movimento, referencial sobre o pé C; (b) pé C começa a movimentação acima do fio.

As equações que definem a trajetória do pé C, são calculadas utilizando-se das Eqs. (4.49) e (4.50), sendo que neste caso $\theta_0 = 0$, ou seja:

$$x_C = r \cdot \cos \theta \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 2 \right) \quad (5.1)$$

$$z_C = \frac{d \cdot (a + r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 2 \cdot r \cdot \sin \theta - \frac{c \cdot (a - r \cdot \sin \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} \quad (5.2)$$

Deve-se ressaltar que o ângulo θ varia de π a 2π , nas Eqs. (5.1) e (5.2), pois o ângulo de entrada, θ , conforme definido no Capítulo IV, corresponde à movimentação da perna em contato com o fio. Para a análise, o referencial inercial foi transladado para o pé C, quando em contato com o fio, Fig. 5.3a. Assim tem-se:

$$x = x_C - \text{translação} \quad (5.3)$$

O valor da translação é calculado por:

$$\begin{aligned} \text{translação} &= r \cdot \cos(\pi) \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\pi)}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin(\pi)}} - 2 \right) \\ \text{translação} &= -r \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2}} - 2 \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Assim:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos \theta \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2 \cdot a \cdot r \cdot \sin \theta}} - 2 \right) \\ &+ r \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2}} - 2 \right) \end{aligned} \quad (5.5)$$

A metodologia adotada para o estudo da transposição de obstáculos é realizada a partir da colisão do pé do robô com o obstáculo.

Caso ocorra uma segunda colisão com o obstáculo, é possível calcular o raio do obstáculo, R , considerado como uma esfera, e a posição do seu centro, x_m , a partir das coordenadas das duas colisões, conforme esquema da Fig. 5.5.

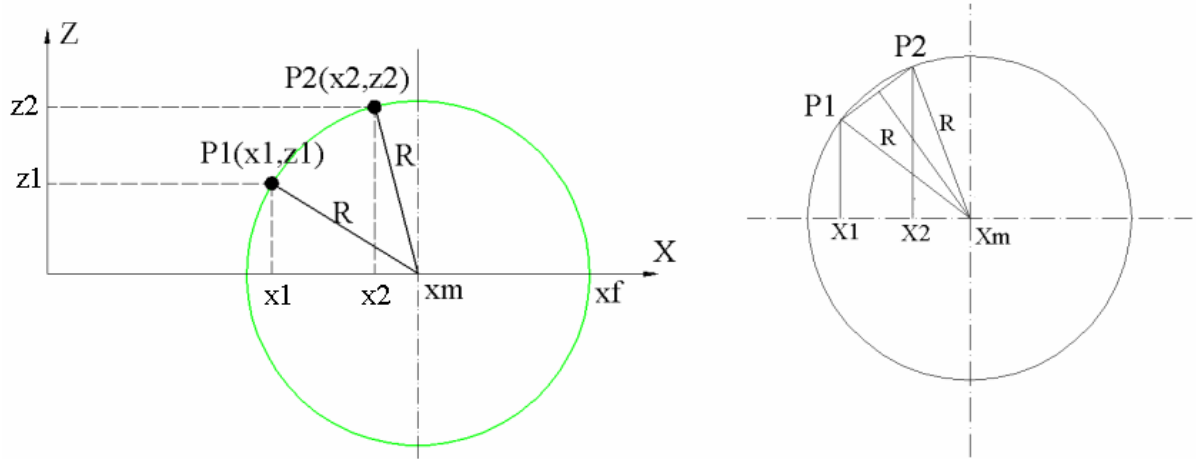


Figura 5.5. Procedimento para o cálculo do raio do obstáculo e do seu centro após uma segunda colisão.

Utilizando-se de relações trigonométricas é possível escrever:

$$R = \sqrt{z_2^2 + (x_m - x_2)^2} \quad (5.6)$$

e

$$x_m = \frac{z_2^2 - z_1^2 + x_2^2 - x_1^2}{2.(x_2 - x_1)} \quad (5.7)$$

Substituindo a Eq. (5.7) na (5.6) obtém-se o valor do raio R do obstáculo em função das coordenadas dos pontos de colisão P_1 e P_2 , ou seja:

$$R = \sqrt{z_1^2 + \left(\frac{z_2^2 - z_1^2 + x_2^2 - x_1^2}{2.(x_2 - x_1)} \right)^2 - 2.x_1 \cdot \left(\frac{z_2^2 - z_1^2 + x_2^2 - x_1^2}{2.(x_2 - x_1)} \right) + x_1^2} \quad (5.8)$$

Com o valor do raio do obstáculo, R , é possível obter o comprimento final da perna, d_{fm} , para que o obstáculo seja transposto. Para obter este valor pode-se utilizar a Eq. (5.2):

$$z_c = \frac{d.(a + r.\text{sen } \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\text{sen } \theta}} - 2.r.\text{sen } \theta - \frac{c.(a - r.\text{sen } \theta)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2.a.r.\text{sen } \theta}}$$

Para evitar que o pé do robô tenha uma terceira colisão com o obstáculo foi utilizado para a coordenada z_c , o valor $z_c = R + \Delta c$ ao invés de R , conforme Fig. 5.5. Isto porque a variação Δc já é conhecida. Desta forma, considerando a coordenada $z_c = R + \Delta c$ para a posição de x_m , pode-se, a partir da Eq. 5.2, obter o valor do comprimento final da perna, d_{fm} ou seja:

$$d_{fm} = \left(\frac{\sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\text{sen } \theta_m}}{(a + r.\text{sen } \theta_m)} \right) \left((R + \Delta c) + \frac{c.(a - r.\text{sen } \theta_m)}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2.a.r.\text{sen } \theta_m}} + 2.r.\text{sen } \theta_m \right) \quad (5.9)$$

Para determinar o ângulo de rotação da manivela de entrada correspondente ao centro do obstáculo, θ_m , pode-se utilizar-se a Eq. (5.5), sendo que, neste caso, a coordenada x , corresponde à posição do centro do obstáculo, x_m , calculado pela Eq. (5.7). Tem-se então:

$$x_m = r.\cos \theta_m \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2.a.r.\text{sen } \theta_m}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2.a.r.\text{sen } \theta_m}} - 2 \right) + r. \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2}} - 2 \right) \quad (5.10)$$

Sendo uma relação transcendental, a Eq. (5.10), foi implementada em um programa no software MatLab[®] que permite isolar e obter o valor de θ_m .

A Figura 5.6 apresenta o caso de duas colisões do pé do robô com o obstáculo. Quando o pé colide com o obstáculo, ponto P_1 , a perna recua de um ângulo $\Delta \theta$, atingindo o ponto M , após o recuo a perna é alongada de um comprimento Δc ao mesmo tempo que ela volta a se movimentar até recuperar o recuo de $\Delta \theta$ (linha azul), atingindo o ponto N . A partir desta posição, a perna continua seu movimento ao mesmo tempo que seu comprimento é reduzido

ocorrendo a segunda colisão no ponto P_2 (linha preta). A perna recua de $\Delta\theta$, atingindo o ponto K . A partir deste ponto, a perna é alongada até o valor calculado na Eq. (5.9), ponto Q , correspondente a posição do centro do obstáculo, x_m . A partir deste ponto, a perna continua seu movimento ao mesmo tempo que seu comprimento é reduzido para o seu comprimento normal. O comprimento normal é alcançado quando o pé toca novamente o fio.

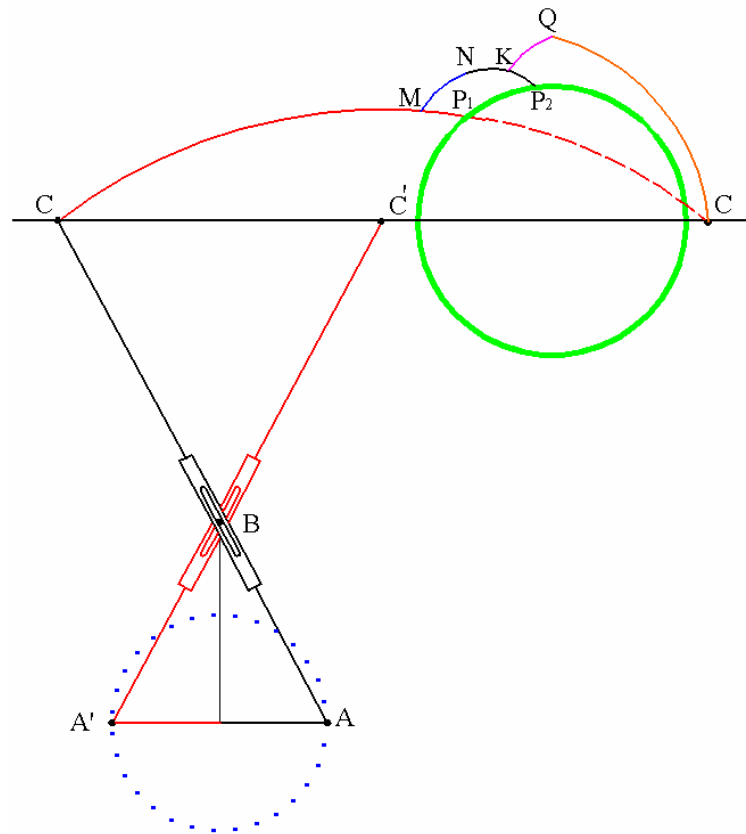


Figura 5.6. Processo de transposição de obstáculos, caso de duas colisões.

É possível que, mesmo com o comprimento final da perna obtido a partir do raio do obstáculo, Eq. (5.9), o pé venha a colidir novamente com o obstáculo. Este caso ocorre quando o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé sobre o fio. Condição esta que é analisada no sub-item 5.3.5.

Após o alongamento da perna e se não houver mais colisões com o obstáculo, podem ocorrer duas situações. Na primeira, o obstáculo não obstrui a posição de apoio do pé sobre o fio, considerando o comprimento normal da perna. Neste caso, após o alongamento da perna, e se não ocorrer mais colisão, antes do pé tocar o fio, a perna é reduzida para seu comprimento normal.

$$d_{xf} = \frac{\sqrt{a^2 + r^2}}{2r} \cdot \left(x_m + R + 2r - r \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{d}{\sqrt{a^2 + r^2}} - 2 \right) \right) \quad (5.12)$$

Após a perna de transposição atingir o comprimento d_{fm} , Eq. (5.9), ela começa a variar seu comprimento até atingir o valor d_{xf} , Eq. (5.12). Simultaneamente, a perna cujo pé está apoiado no fio, também varia seu comprimento até atingir o mesmo valor de d_{xf} , de tal forma que após a transposição, quando os pés estiverem sobre o fio, as duas pernas estejam com o mesmo comprimento d_{xf} . Cabe salientar que, conforme descrito no Capítulo IV, se apenas a perna fora do fio fosse alongada e as outras permanecesse com comprimento constante o passo do robô seria reduzido e no início do novo passo, o pé teria que passar por debaixo do fio.

O retorno das pernas para o comprimento normal se dá no passo seguinte. Para isto, antes do início do novo passo, a perna do pé que retornou ao fio (e que permanecerá sobre o fio para o próximo passo), é reduzida até seu comprimento normal, com a manivela de entrada parada. Desta forma, a perna que irá para o espaço, mantendo seu comprimento, deixará o fio, reiniciando a operação de movimentação fora do fio, Fig. 5.8.

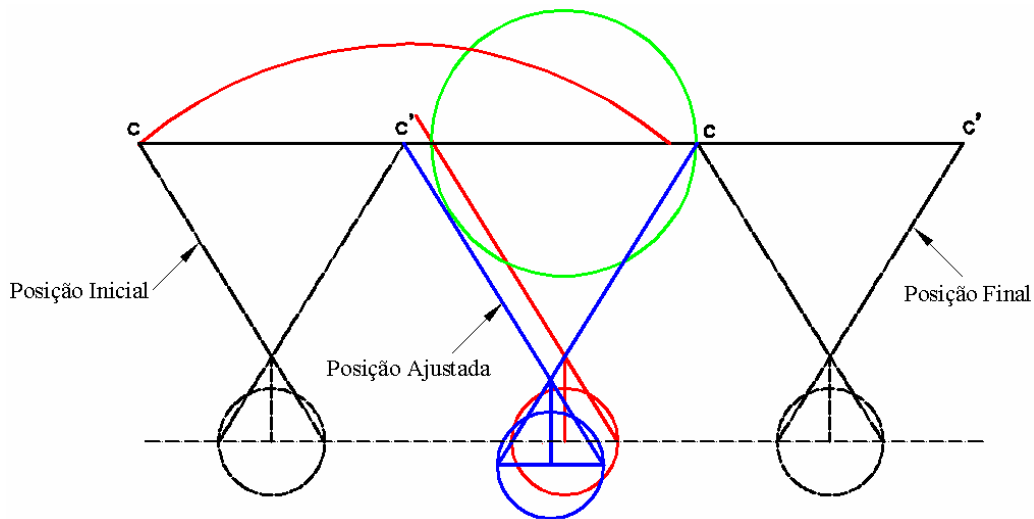


Figura 5.8. Procedimento para correção do comprimento da perna no caso do obstáculo ocupar a posição de retornar do pé.

Deve-se observar que após o cálculo do comprimento d_{xf} , se este comprimento for superior ao comprimento máximo da perna do robô, quando alongada, o robô não é capaz de ultrapassar o obstáculo. Para evitar esta situação o projeto do robô deve ser feito em função das dimensões do maior obstáculo desejado de ser ultrapassado.

5.2. Função de variação do comprimento das pernas

Dois dos princípios de desenvolvimento deste robô móvel são a simplicidade e a controlabilidade. Neste sentido, foram utilizadas funções lineares, dependentes do ângulo de entrada θ , para a variação dos comprimentos das pernas definidas por:

$$d = q.\theta + s \quad (5.13)$$

Os coeficientes q e s da Eq. (5.13), podem ser obtidos resolvendo-se o sistema linear para as condições em que são conhecidos os comprimentos inicial, d_i , e final, d_f , da perna. Estes comprimentos correspondem aos ângulos de entrada θ_i e θ_f , respectivamente, ou seja:

$$\begin{aligned} d_i &= q.\theta_i + s \\ d_f &= q.\theta_f + s \end{aligned} \quad (5.14)$$

Resolvendo o sistema da Eq. (5.14), obtém-se:

$$q = \frac{d_f - d_i}{\theta_f - \theta_i} \quad (5.15)$$

$$s = \frac{d_i.\theta_f - d_f.\theta_i}{\theta_f - \theta_i} \quad (5.16)$$

Substituindo as Eqs. (5.15) e (5.16) na Eq. (5.13) obtém-se a função que define a variação da perna direita, d , em função do ângulo de entrada θ , ou seja:

$$d = \frac{d_f - d_i}{\theta_f - \theta_i} \cdot \theta + \left(\frac{d_i.\theta_f - d_f.\theta_i}{\theta_f - \theta_i} \right) \quad (5.17)$$

De forma análoga, a variação do comprimento da perna esquerda c é calculada por:

$$c = \frac{c_f - c_i}{\theta_f - \theta_i} \cdot \theta + \left(\frac{c_i.\theta_f - c_f.\theta_i}{\theta_f - \theta_i} \right) \quad (5.18)$$

A seguir são analisadas diversas possibilidades de transposição de obstáculos utilizando-se de simulações numéricas.

5.3. Simulações Numéricas.

Para as simulações numéricas foram utilizados os seguintes parâmetros: $a = 0,08\text{m}$, $r = 0,05\text{m}$, $c=d=0,33\text{m}$ (comprimento normal das pernas) e $\Delta\theta = 5^\circ$. Deve-se ressaltar que não são consideradas as dimensões dos pés do robô nas simulações numéricas.

5.3.1. Transposição de Obstáculo que não causa colisão com o pé do robô

A Figura 5.9 apresenta uma simulação onde não ocorre colisão, o obstáculo ficando abaixo da trajetória do pé de transposição. O comprimento das pernas, neste caso, permanecem iguais durante todo o trajeto.

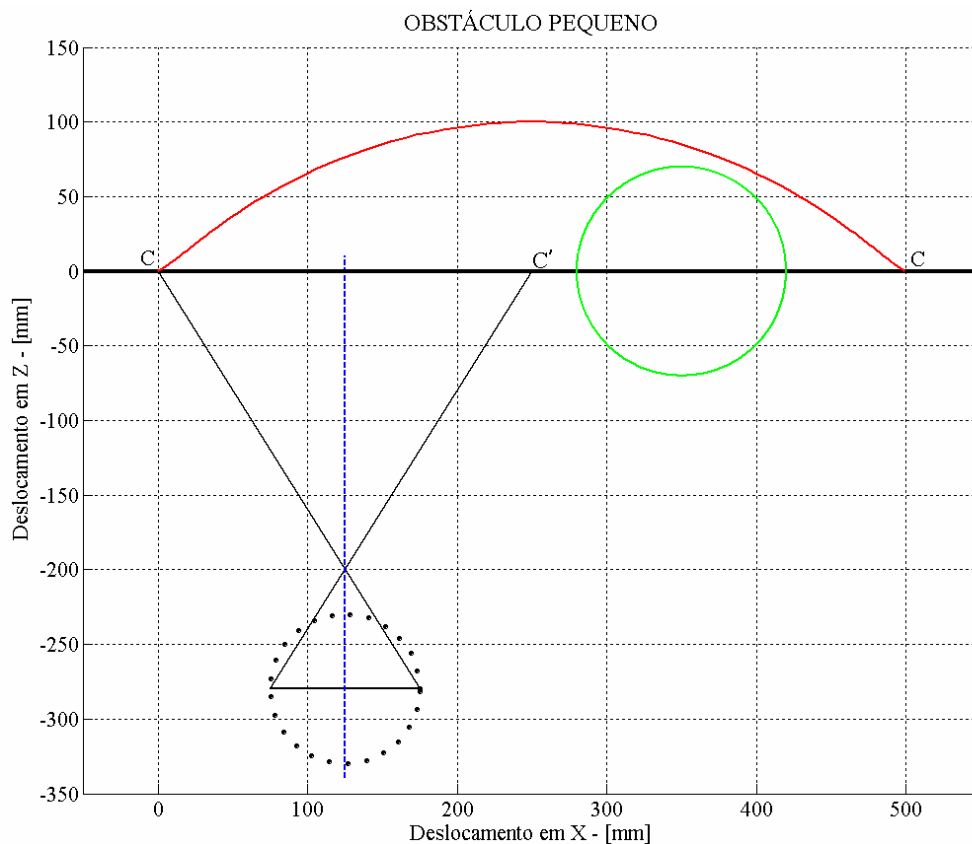


Figura 5.9. Transposição de um obstáculo que não causa colisão ($a = 0,08\text{m}$; $r = 0,05\text{m}$; $c = d = 0,33\text{m}$).

5.3.2. Transposição de obstáculo com uma colisão e este não ocupando a posição de retorno do pé.

A Figura 5.10 representa a situação em que ocorre uma colisão e o obstáculo não obstrui a posição de retorno do pé. A perna de transposição retorna ao seu comprimento normal após superar o obstáculo.

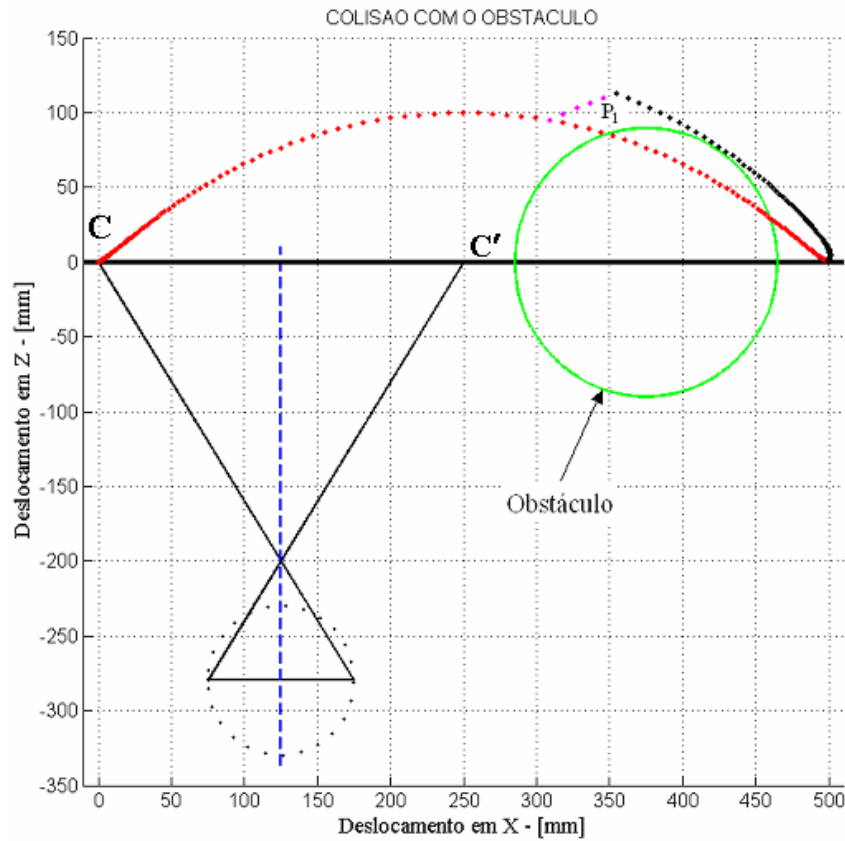


Figura 5.10. Transposição de obstáculo com uma colisão e este não ocupando a posição de retorno do pé. ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $c = 0,33m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03m$).

Após a colisão (ponto P_1) o pé do robô retorna de $\Delta\theta$. Após o retorno, a perna do robô tem seu comprimento aumentado de Δc em função da Eq. (5.17), sendo que:

$$\begin{aligned}
 \theta_i &= \theta_{P1} - \Delta\theta \\
 d_i &= c \\
 \theta_f &= \theta_{P1} \\
 d_f &= c + \Delta c
 \end{aligned}
 \tag{5.19}$$

Onde, θ_{P1} corresponde à posição angular da manivela de entrada correspondente a posição da colisão. Assim, após colidir com o obstáculo e voltar de $\Delta\theta$, a perna tem seu comprimento aumentado, simultaneamente com a movimentação da manivela de entrada, até a posição correspondente ao ponto da primeira colisão, θ_{P1} . Nesta posição, a perna terá o comprimento d_f . A partir do ponto em que a perna atingir o comprimento d_f (correspondendo novamente a θ_{P1}) a perna começa a encolher retornando ao fio. Neste exemplo não ocorrem novas colisões. Quando a perna tocar o fio, estará com o seu comprimento normal. A função de encolhimento da perna é dado pela Eq. (5.17) e utiliza os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned}\theta_i &= \theta_{P1} \\ d_i &= c + \Delta c \\ \theta_f &= 2\pi \\ d_f &= c\end{aligned}\tag{5.20}$$

A perna cujo pé está em contato com o fio mantém o seu comprimento normal durante todo o passo do pé C. A Figura 5.11 apresenta a variação do comprimento da perna em função do ângulo θ .

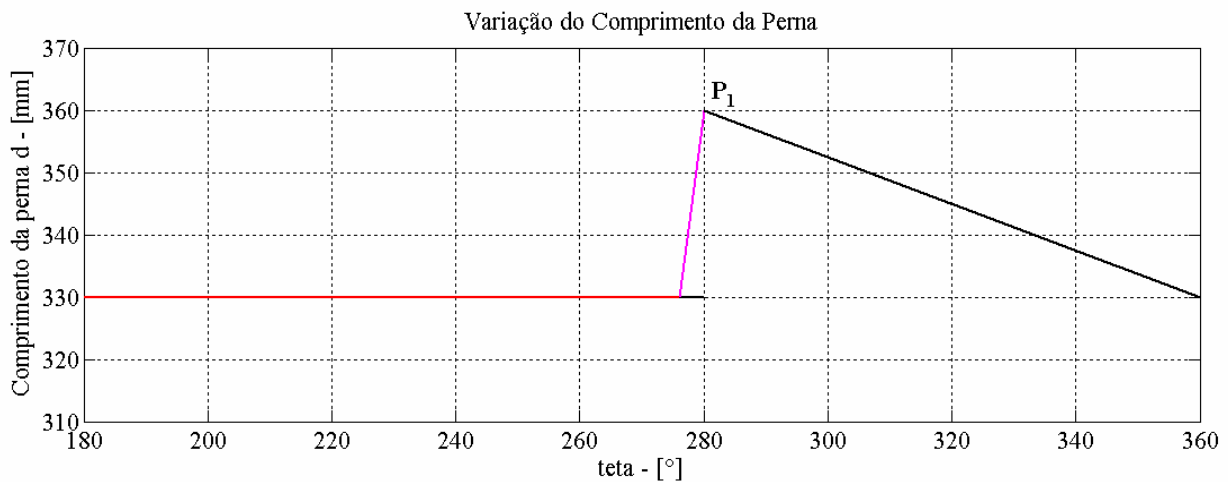


Figura 5.11. Variação do comprimento da perna em função do ângulo θ para a transposição com uma colisão e o obstáculo não ocupando a posição de retorno normal do pé.

5.3.3. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo não ocupando a posição de retorno do pé.

A Figura 5.12 representa o caso em que ocorrem duas colisões do pé com o obstáculo. Após a primeira colisão, ponto P_1 , a perna retorna de $\Delta\theta$ e alonga de Δc (procedimento análogo ao item 5.3.2). A partir do ponto correspondente à primeira colisão, a perna começa a encolher colidindo novamente com o obstáculo, ponto P_2 . Após a segunda colisão é possível calcular o raio do obstáculo, R , utilizando-se a Eq. (5.8) e o comprimento da perna, d_{fm} , Eq. (5.9), necessário para ultrapassar o obstáculo sem novas colisões. A partir da Eq. (5.11) é possível verificar que o obstáculo não ocupa a posição de retorno do pé sobre o fio. Assim, a perna de transposição, após a segunda colisão, retorna de $\Delta\theta$ e alonga até a posição correspondente ao centro do obstáculo, x_m , atingindo esta posição com comprimento d_{fm} , Eq. (5.9). A variação da perna, após a segunda colisão e recuo é realizada através da Eq. (5.17) em que:

$$\begin{aligned} \theta_i &= \theta_{P_2} - \Delta\theta & \theta_f &= \theta_m \\ d_i &= d_{(\theta_{P_2} - \Delta\theta)} & d_f &= d_{fm} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Sendo que θ_{P_2} corresponde à posição angular da manivela de entrada correspondente à posição da segunda colisão, $d_i = d_{(\theta_{P_2} - \Delta\theta)}$ corresponde ao comprimento da perna após voltar do ângulo $\Delta\theta$ e θ_m correspondendo à posição do centro do obstáculo, definido por x_m . A partir da posição correspondente ao centro do obstáculo, x_m , a perna tendo comprimento d_{fm} , começa a encolher até atingir o seu comprimento normal. Novamente, a variação do comprimento da perna (encolhimento) é feita utilizando-se a Eq. (5.17) em que:

$$\begin{aligned} \theta_i &= \theta_m \\ d_i &= d_{fm} \\ \theta_f &= 2\pi \\ d_f &= c \end{aligned} \quad (5.22)$$

P_1 : posição da primeira colisão

P_2 : posição da segunda colisão

θ_{P1} : posição angular da manivela de entrada correspondente ao ponto P_1

θ_{P2} : posição angular da manivela de entrada correspondente ao ponto P_2

M : manivela de entrada recuada de $\Delta\theta$ a partir de θ_{P1} , perna tem comprimento normal

N : manivela retorna para a posição do ponto P_1 , perna tem comprimento $c + \Delta c$

Q : manivela ocupa a posição definida por θ_m ; perna tem comprimento d_{fm}

T : perna tem comprimento normal.

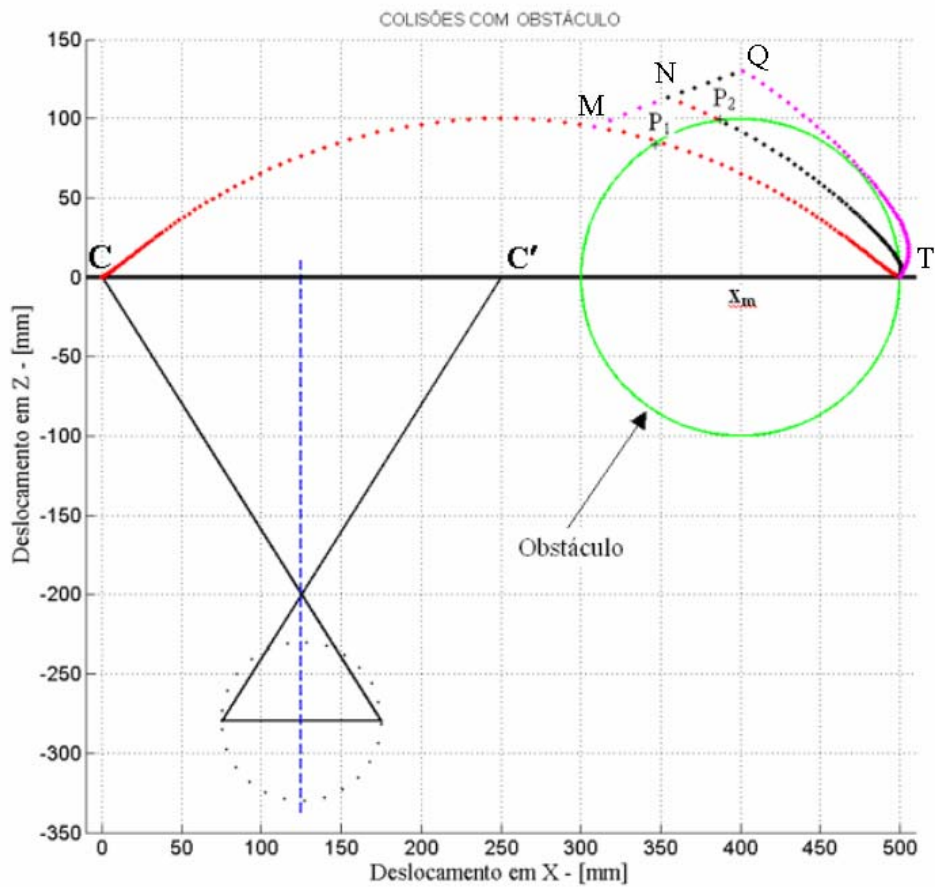


Figura 5.12. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo não ocupando a posição de retorno do pé ($a = 0,08m$; $r = 0,05m$; $c = 0,33m$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03m$).

A perna cujo pé mantém contato com o fio, responsável pela movimentação do corpo do robô nesta etapa, permanece com o seu comprimento normal.

5.3.4. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé.

A situação em que o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé é representado na Fig. 5.13, com a ocorrência de duas colisões.

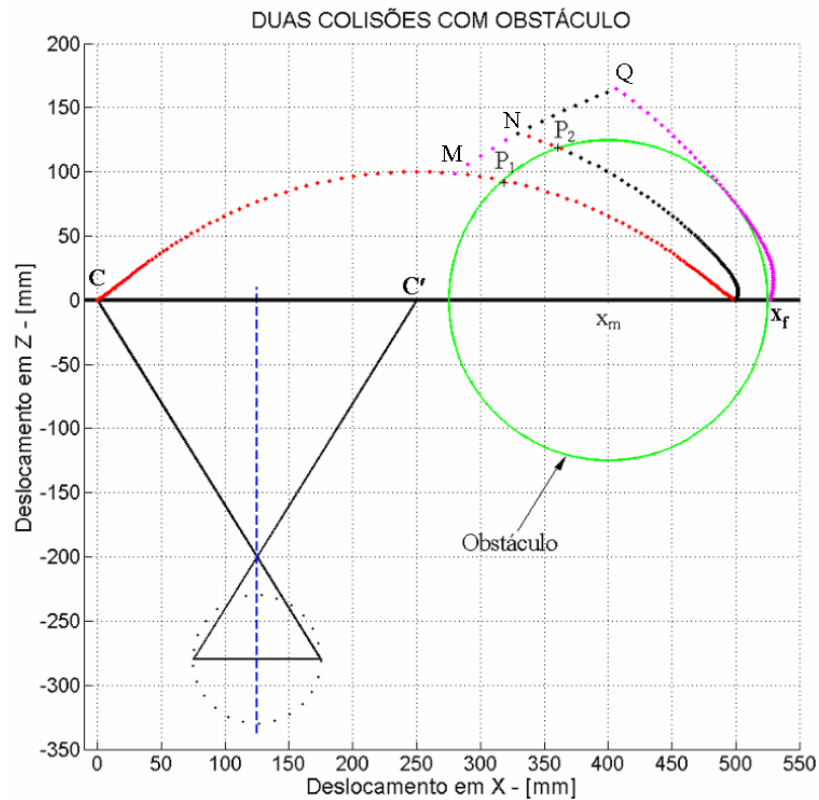


Figura 5.13. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé ($a = 0,08\text{m}$; $r = 0,05\text{m}$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,04\text{m}$).

O procedimento até a perna atingir o ponto Q é idêntico ao item 5.3.3. A partir do ponto Q, correspondente ao centro do obstáculo, a perna começa a encolher até a posição correspondente a x_f , cujo comprimento é definido por d_{xf} e, simultaneamente, a perna que está sobre o fio tem seu comprimento aumentado, de tal forma que no final da movimentação as duas pernas possuirão o mesmo comprimento d_{xf} , Fig. 5.4. Na fase de encolhimento da perna de transposição, retornando ao fio, os parâmetros para a Eq. (5.17) são:

$$\begin{aligned} d_i &= d_{fm} & \theta_f &= 2\pi \\ \theta_i &= \theta_m & d_f &= d_{xf} \end{aligned} \quad (5.23)$$

A variação da perna em contato com o fio é realizada através da Eq. (5.18), até que no final, as duas possuam o mesmo comprimento. Neste caso, os parâmetros da Eq. (5.18) são:

$$\begin{aligned} c_i &= c & \theta_f &= 2\pi \\ \theta_i &= \theta_m & c_f &= d_{xf} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Na Figura 5.14 está exemplificado o caso em que a perna de transposição, após a segunda colisão, é aumentada para superar o valor do raio do obstáculo. Pode-se verificar que ocorreria uma terceira colisão. Para evitar esta condição foi considerado a coordenada $z_c = R + \Delta c$ para obter o valor de d_{fm} obtido pela Eq. (5.9).

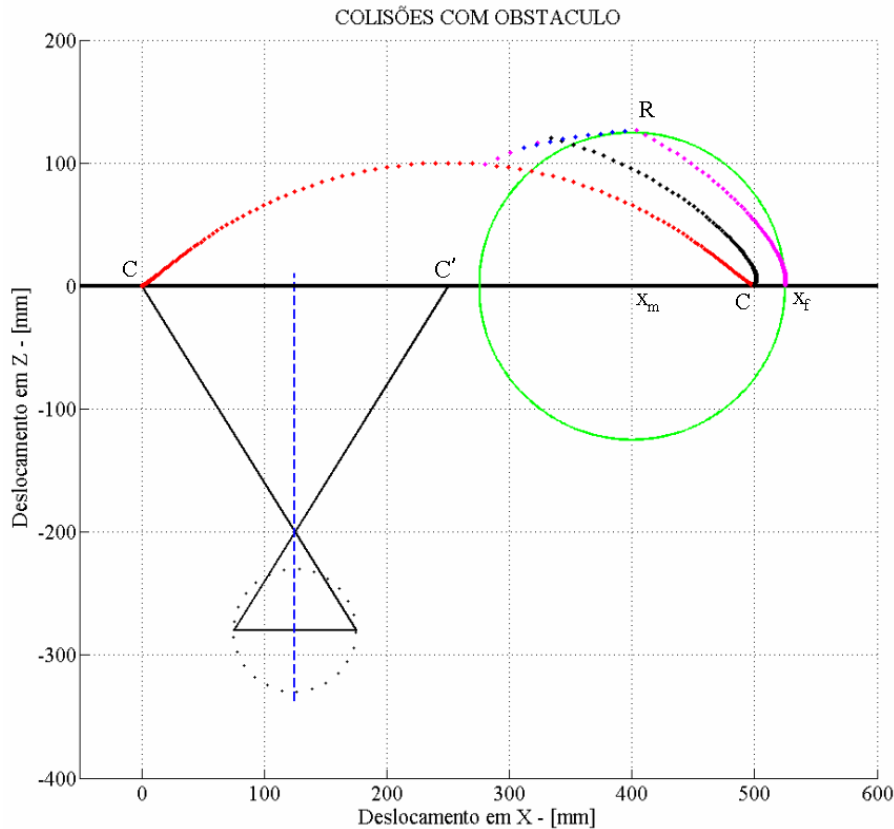


Figura 5.14. Transposição de obstáculo com três colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé para o caso em que d_{fm} fosse obtido com $z_c = R$ ($a = 0,08\text{m}$; $r = 0,05\text{m}$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03\text{m}$).

A Figura 5.15 apresenta um ciclo completo do movimento dos pés para o caso de transposição do obstáculo com duas colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do

pé sobre o fio. Nesta figura, estão representadas as trajetórias dos pés C e C' se não existisse obstáculos (linha pontilhada em vermelho). Ao final da transposição do pé direito C , a perna correspondente tem um comprimento d_{xf} , maior que o seu comprimento normal, bem como a perna esquerda, Fig. 5.7. Pode-se observar que ocorreria colisão tanto do pé direito C como do pé esquerdo C' . Antes do início da movimentação do pé C' , é realizada a correção do comprimento da perna que está em contato com o fio, pé C , para o seu comprimento normal possibilitando ao robô mover-se de forma estável. Assim, com a manivela parada, a perna em contato com o fio tem o seu comprimento reduzido ao comprimento normal. Ao mesmo tempo a outra perna tem o seu comprimento mantido constante o que representa que esta começará sua movimentação fora do fio, ponto F da Fig. 5.15. Assim, com a aplicação da metodologia proposta permite-se que o pé esquerdo não colida com o obstáculo, como pode ser observado na Fig. 5.15. Caso ocorresse novas colisões a metodologia seria a mesma já apresentada. A perna esquerda, correspondente ao pé C' tem o seu comprimento mantido constante, igual a d_{xf} , até a posição correspondente ao ponto máximo da trajetória e, a partir deste ponto, a perna tem o seu comprimento reduzido, de forma que quando atingir o fio tenha o seu comprimento normal.

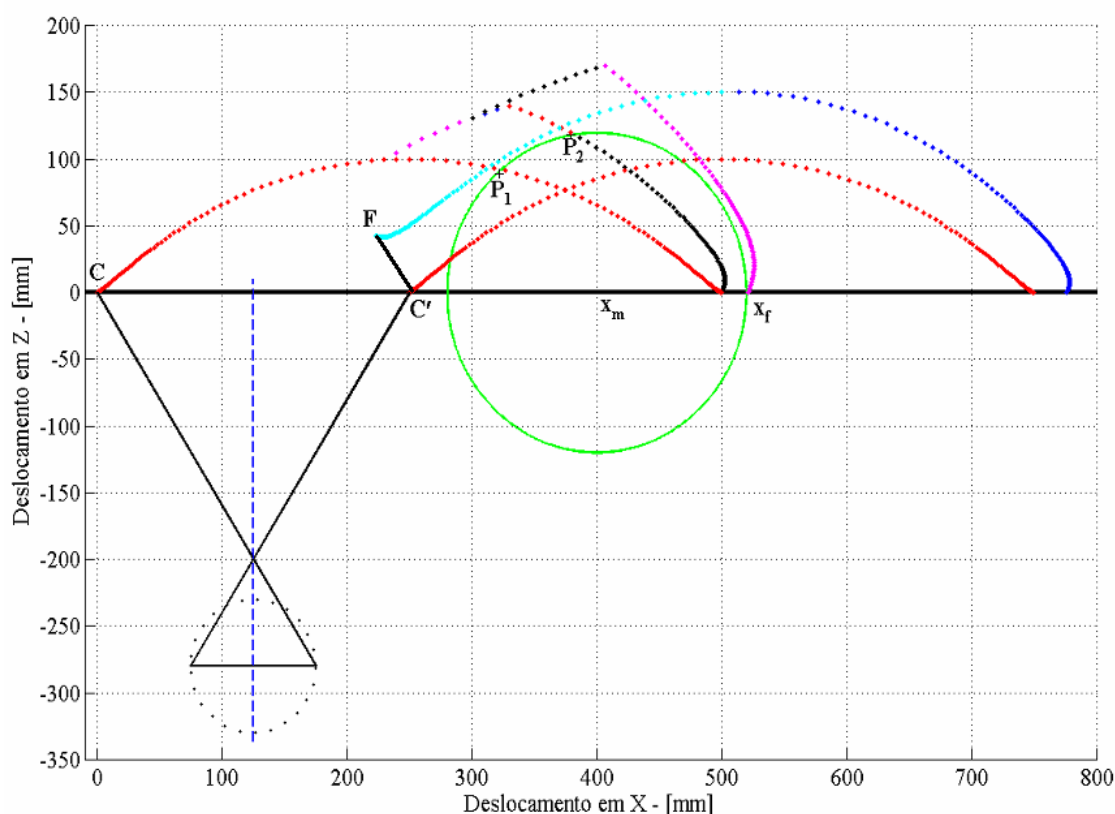


Figura 5.15. Transposição de obstáculo com duas colisões e o obstáculo ocupando a posição de retorno do pé ($a = 0,08\text{m}$; $r = 0,05\text{m}$; $\Delta\theta = 10^\circ$; $\Delta c = 0,05\text{m}$).

A partir da Fig. 5.15, para o ciclo completo, pode-se traçar, esquematicamente, as variações dos comprimentos das pernas em função do ângulo θ , Fig. 5.16.

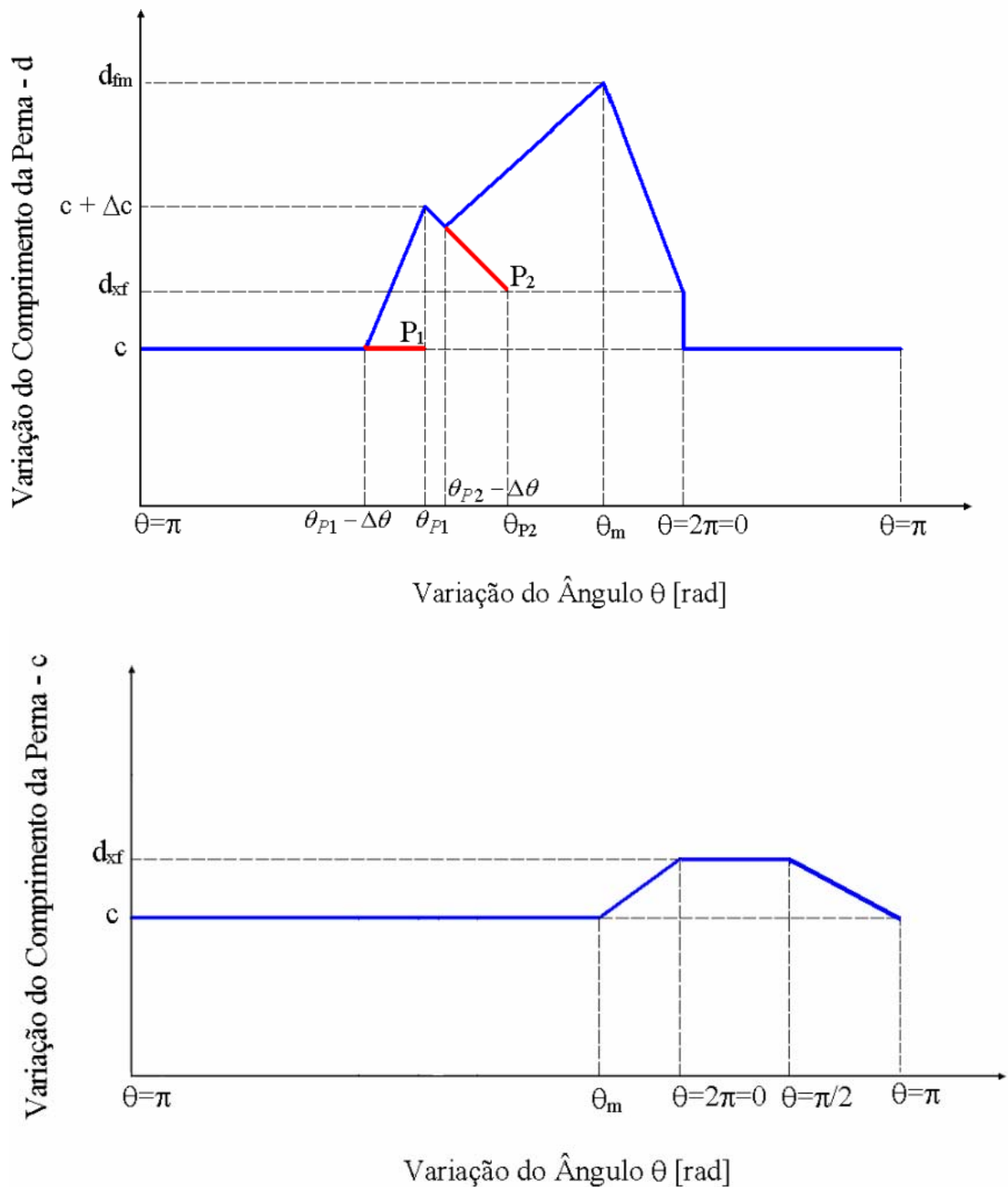


Figura 5.16. Variação dos comprimentos das pernas em função do ângulo θ .

5.3.5. Transposição para condições em que ocorrem várias colisões

A Figura 5.17 apresenta um exemplo de um obstáculo com dimensões propositalmente exageradas para demonstrar a validade da metodologia proposta.

Neste exemplo, ocorrem quatro colisões e o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé. Até a posição Q, o procedimento é idêntico ao item 5.3.3. A partir deste ponto, a perna começa a encolher, ocorrendo uma nova colisão no ponto P_3 . A manivela retorna de um ângulo $\Delta\theta$ retornando ao ponto Q. A perna alonga de Δc , até o ponto correspondente à terceira colisão, ponto U. A partir desta posição a perna começa a encolher, acontecendo uma nova colisão em P_4 . Novamente o mecanismo retorna de um ângulo $\Delta\theta$ retornando ao ponto V. Como o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé é necessário que as duas pernas tenham os seus comprimentos alterados pois, conforme o item 5.3.4, para transpor o obstáculo é necessário a variação das duas pernas. Depois de voltar de $\Delta\theta$, a perna no espaço e a perna em contato com o fio são aumentadas de Δc . Tem-se que, com o aumento simultâneo das pernas, o robô desloca-se para a direita e para baixo. A partir do ponto da quarta colisão a perna fora do fio retornará ao fio de tal forma que quando atingir o fio ambas as pernas tenham o mesmo comprimento, calculado pela Eq. (5.12).

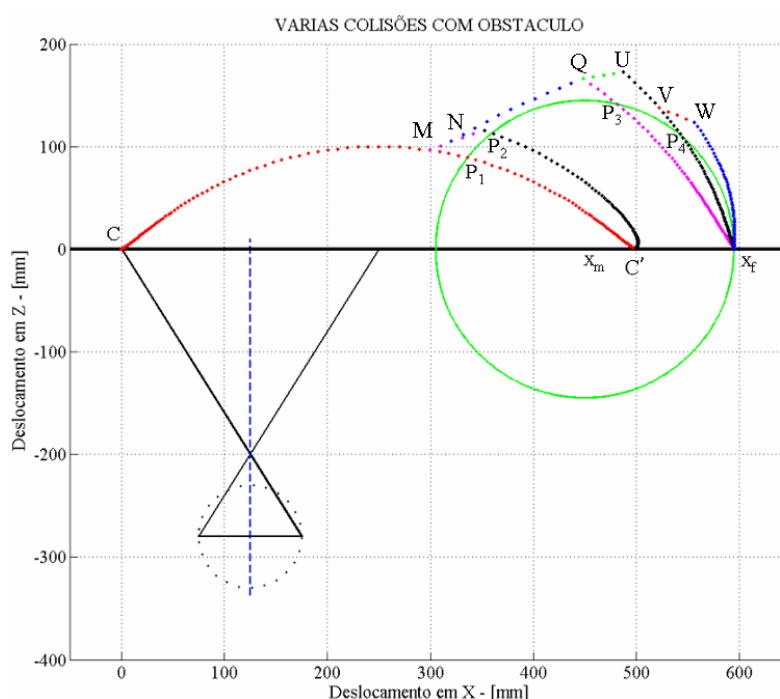


Figura 5.17. Transposição para condições em que ocorrem várias colisões
($a = 0,08\text{m}$; $r = 0,05\text{m}$; $\Delta\theta = 5^\circ$; $\Delta c = 0,03\text{m}$).

5.3.6. Caso particular – Obstáculo posicionado ao lado do pé do robô.

Pode ocorrer que o obstáculo esteja posicionado do lado do pé do robô, conforme esquematizado na Figura 5.18. Neste caso, o pé C realiza a transposição do obstáculo sem colisão. Quando o pé C' tenta sair do fio, ele colide imediatamente com o obstáculo. O procedimento segue a mesma metodologia: o comprimento da perna é aumentado de Δc . Neste caso, ocorrendo a colisão, a manivela permanece em sua posição original ou seja, o pé começa a sua trajetória fora do fio. Este comprimento da perna é mantido constante, caso não ocorra mais colisões e, a partir do ponto de máximo da trajetória a perna começa a encolher, seguindo a função dada pela Eq. (5.18). Caso a perna após aumentar do comprimento Δc colidir novamente com o obstáculo, aplica-se a metodologia para transposição do obstáculo descrita anteriormente.

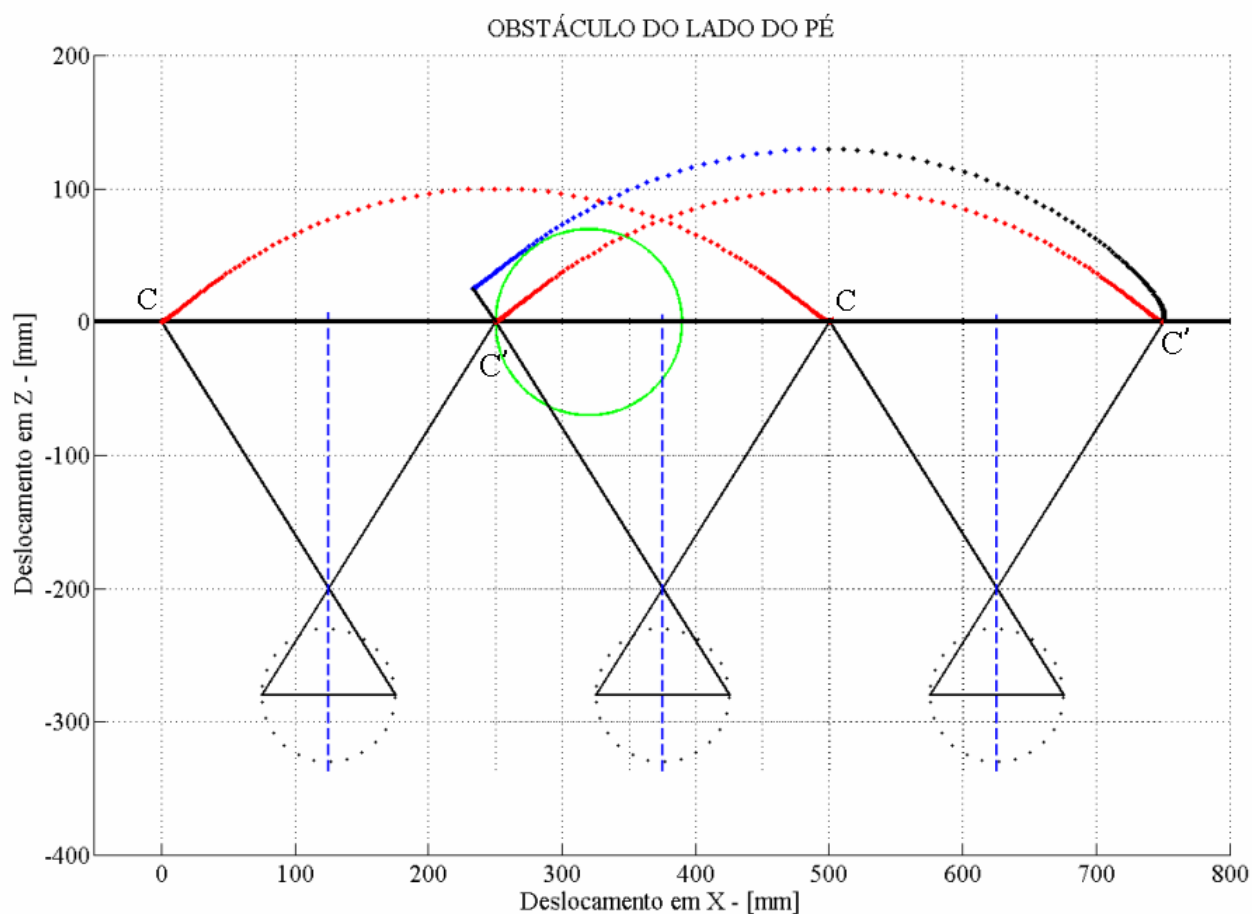


Figura 5.18. Caso particular – Obstáculo posicionado ao lado do pé do robô.

Deve-se destacar que no início da trajetória do pé fora do fio ocorre um “voleio” do pé acima do fio, antes de iniciar a transposição do obstáculo. Este comportamento é devido às dimensões construtivas do mecanismo não obedecer às relações $a : r : c = 1,6 : 1 : 6,6$, pois a perna c inicialmente não possui o comprimento normal.

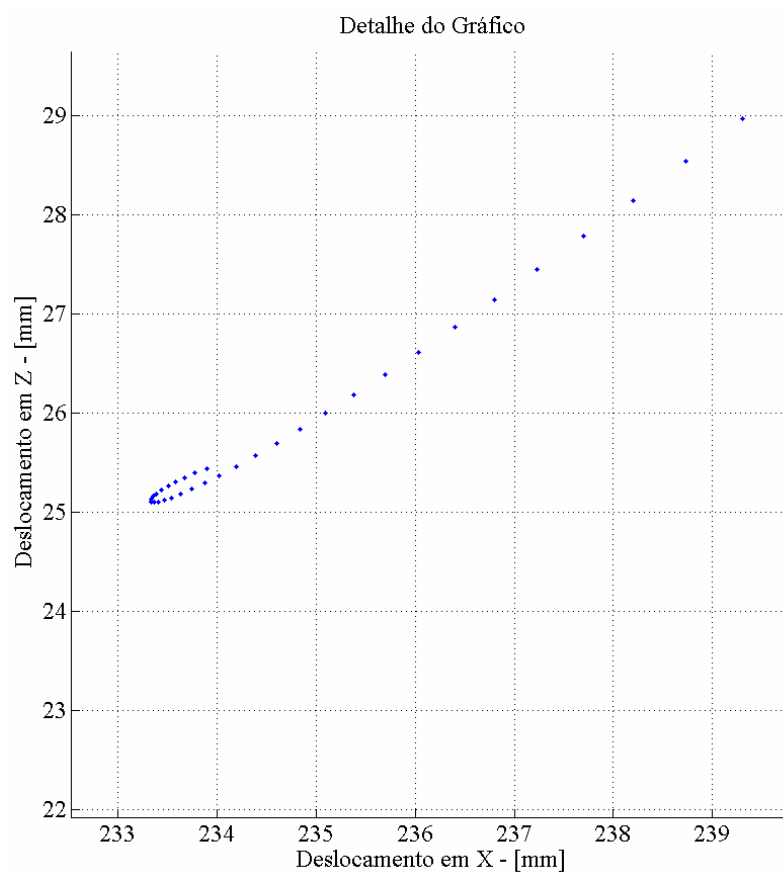


Figura 5.19. Detalhe da Figura 5.18, obstáculo posicionado ao lado do pé do robô.

5.4. Conclusões

Através do exposto, o robô móvel suspenso por fio, com pernas de comprimento variável, obtido com a adição de um grau de liberdade a cada perna, possui uma grande versatilidade para transposição de obstáculos.

Devido à metodologia proposta, o robô é capaz de ultrapassar obstáculos de diferentes dimensões e posicionamentos diferentes no fio, inclusive quando posicionado ao lado do pé do robô.

A metodologia proposta permite ao robô durante grande parte do seu trajeto mover-se de forma estável. Desta forma, o robô pode ser aplicado em atividades de filmagem e manutenções como, por exemplo, a troca ou instalação de novas esferas de sinalização. Assim, este robô dotado de pernas possui como vantagem o fato de poder transpor as esferas de sinalização sem defeitos e realizar a manutenção das que estejam com defeito.

O uso de equações lineares para a variação do comprimento das pernas do robô facilita o controle do mesmo. O robô possui apenas um grau de liberdade para a movimentação sincronizada de todas as pernas e cada perna possui apenas um grau de liberdade para a variação de seu comprimento, facilitando o controle do robô.

No Capítulo VI serão apresentadas simulações gráficas do robô móvel proposto, com pernas de comprimentos variáveis e seu projeto.

Capítulo VI

ROBÔ MÓVEL SUSPENSO POR FIO COM PERNAS VARIÁVEIS – PROJETO E SIMULAÇÃO.

Neste Capítulo serão apresentados o projeto do robô móvel suspenso por fio, com pernas de comprimentos variáveis e resultados de simulações gráficas de transposição de obstáculos, aplicando a metodologia proposta. O protótipo do robô possuindo pernas iguais e com comprimentos fixos, inicialmente desenvolvido para as análises preliminares também é apresentado.

6.1 Robô com Pernas Iguais.

Considerando a proporcionalidade obtida por Tsujimura e Yabuta (TSUJIMURA e T. YABUTA, T., 1989), $a : r : c = 1,6 : 1 : 6,6$, foi elaborado o projeto do robô com as seguintes dimensões do mecanismo das pernas:

$$a = 80 \text{ mm}$$

$$r = 50 \text{ mm}$$

$$c = 330 \text{ mm}$$

Estas dimensões foram utilizadas visando a construção de um protótipo do robô, que seja compacto e que tivesse peso máximo de 10 quilos.

A estrutura do corpo do robô e das pernas são confeccionadas em alumínio e o sincronismo da movimentação das pernas é obtido por um conjunto de polias e correia

sincronizadoras acionadas por apenas um motor de corrente contínua, Fig. 6.1. O protótipo do robô, com pernas iguais, é apresentado na Fig. 6.2. Sua massa total é de 3,5 quilos.

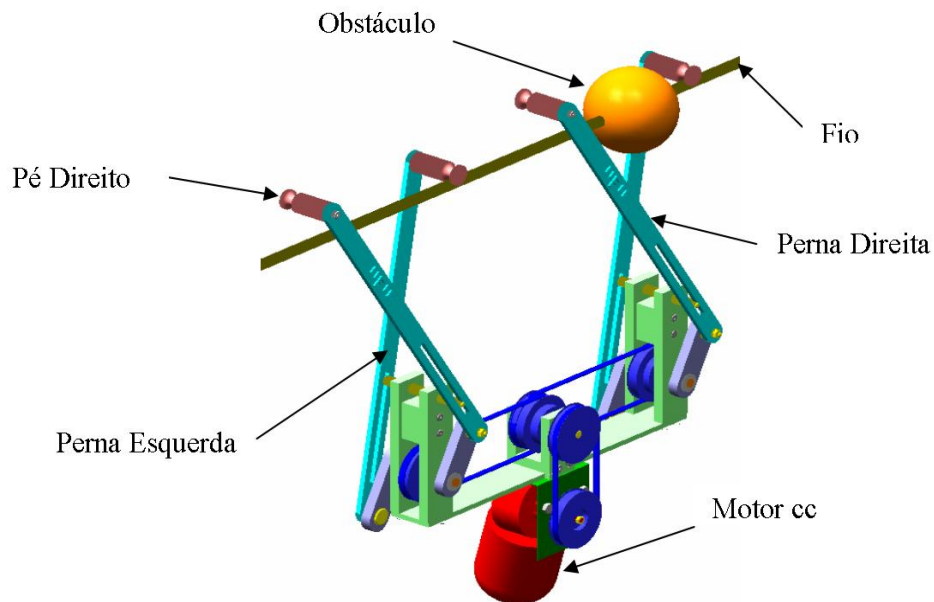


Figura 6.1. Modelo 3D do Robô com Pernas Iguais.



Figura 6.2. Protótipo do Robô com Pernas Iguais.

Na Figura 6.3, é apresentado um teste realizado com o protótipo do robô móvel com pernas iguais transpondo um obstáculo. Neste caso, dependendo da posição do obstáculo no fio, ocorre a colisão do pés do robô fazendo com que o robô caia.



Figura. 6.3 Protótipo do robô móvel suspenso por fio transpondo um obstáculo no fio.

6.2. Descrição Geral do Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas Variáveis.

6.2.1. Estrutura Mecânica do Robô.

O projeto do robô móvel suspenso por fio, com pernas de comprimentos variáveis tomou por base o corpo do protótipo do robô com pernas de comprimentos iguais. As pernas de comprimentos variáveis utilizam na sua confecção alumínio, com o seu conjunto de movimentação (fuso e guias) fabricados em aço. A variação do comprimento de cada perna é feita utilizando-se de um motor passo que aciona um fuso. Esta perna pode ter seu comprimento aumentado em até 290mm. Este robô com pernas variáveis possui uma massa total de 8 quilos. Na Figura 6.4 é apresentado o modelo 3D do robô em uma vista isométrica e frontal. A Figura 6.5 apresenta o protótipo do robô com pernas variáveis.

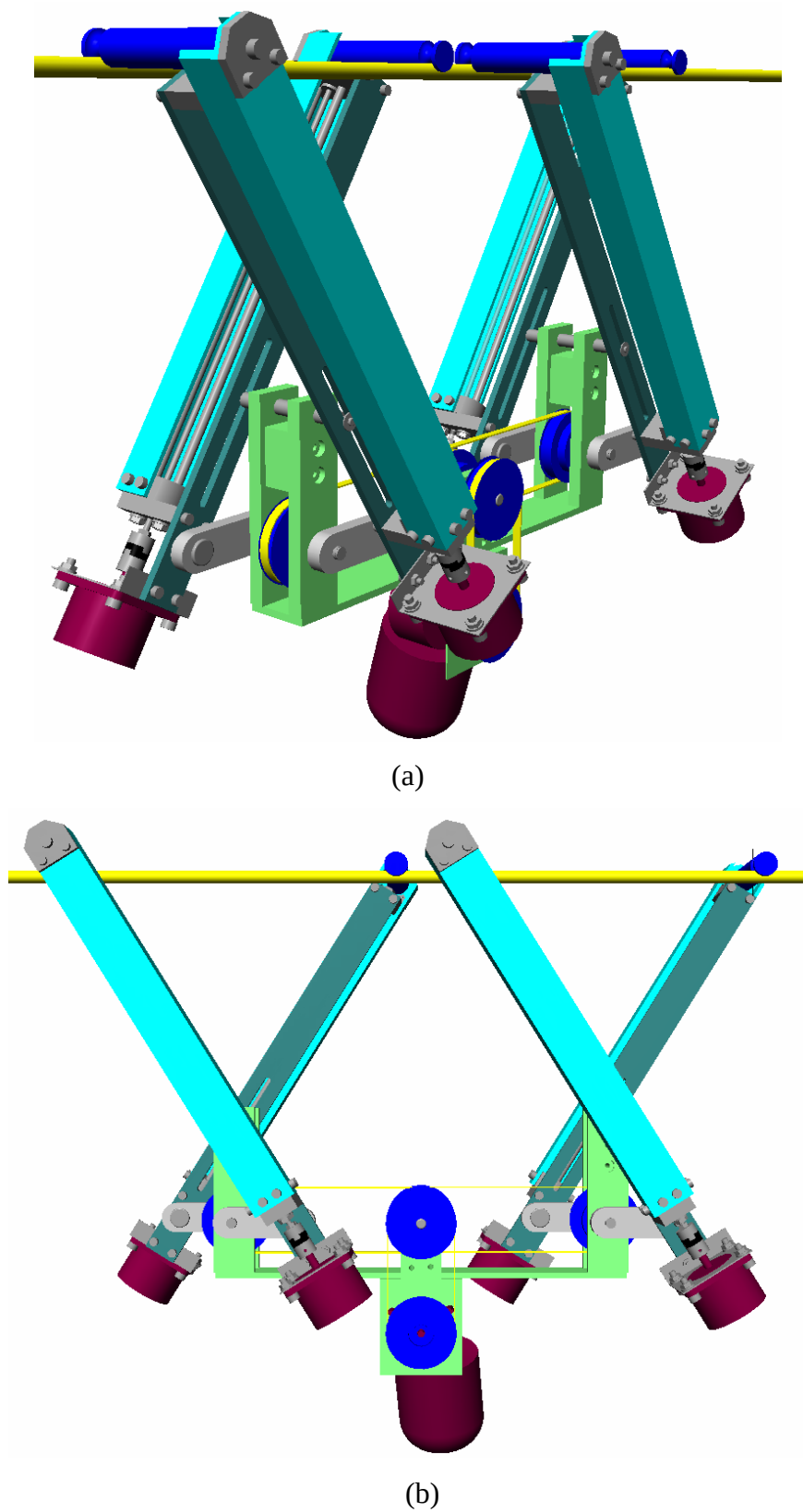


Figura 6.4. Modelo 3D do Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas Variáveis. (a) Vista isométrica; (b) Vista Frontal.

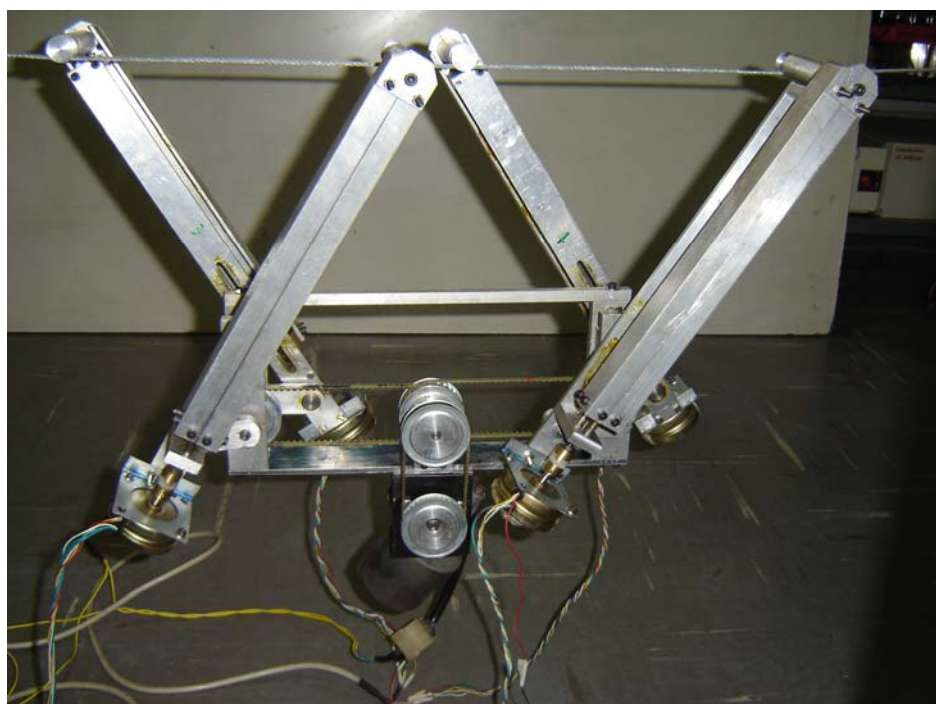
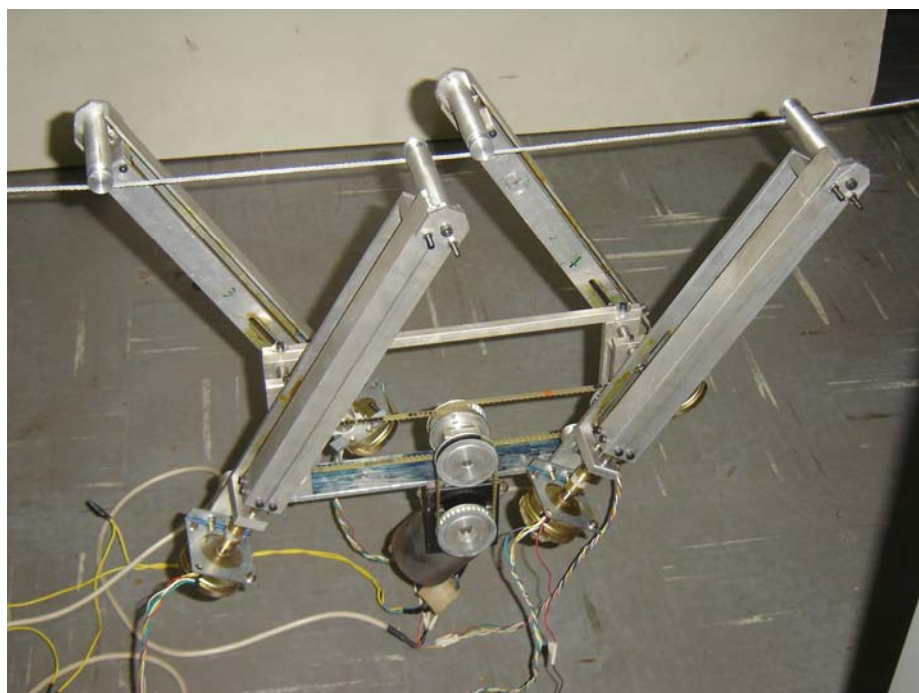


Figura 6.5. Protótipo do robô móvel suspenso por fio com pernas de comprimentos variáveis.

Outro parâmetro a ser considerado no projeto do robô é a distância entre os pares de pernas do robô. Esta distância deve ser suficiente para acomodar o obstáculo desejado de ser ultrapassado.

6.2.2. Sistema de Controle

O acionamento de cada perna do robô será realizado através de motor passo com as características apresentadas na Tab. 6.1.

Tabela 6.1. Característica do motor passo utilizado no Robô Móvel com Pernas Variáveis.

Características	
Ângulo de Passo	1.8°
Nº de Passos por volta	200
Tensão Nominal	13.2 V
Corrente	0.44 A
Torque de Bloqueio [N.m]	0.28246
Peso [g]	370

Para o correto funcionamento do robô móvel suspenso por fio com pernas variáveis, o controle do robô deve permitir a variação dos comprimentos das pernas duas a duas. Assim foi desenvolvido uma placa de controle, via porta paralela de um computador, que permite o controle dos quatro motores passos. Foi implementado um programa em linguagem C que permite movimentar as pernas duas a duas de forma sincronizada: avançar um pulso horário ou anti-horário, avançar uma volta completa no sentido horário ou anti-horário além de permitir a variação da velocidade dos motores passos.

Deve-se salientar que a detecção da colisão do pé do robô com o obstáculo é feita com sensores para identificar a presença ou a colisão com o obstáculo.

6.3. Simulação Gráfica do Robô com Pernas de Comprimentos Variáveis.

Foi desenvolvido um modelo gráfico 3D, com as medidas do projeto, utilizando-se do programa MSC VisualNastran 4D[®], que permite visualizar o comportamento do robô quando da transposição de obstáculos, aplicando a metodologia desenvolvida no Capítulo V. A sequência apresentada na Figura 6.6, representa a transposição de um obstáculo, quando este não ocupa a posição de retorno do pé sobre o fio, ocorrendo apenas uma colisão. O obstáculo possui um raio de 90mm. O programa, MSC VisualNastran 4D[®], permite que seja feita a simulação cinemática e implementado um sistema de controle virtual, baseado na metodologia proposta. Assim o robô começa sua movimentação com as pernas possuindo tamanhos iguais ao normal, $c = d = 330\text{mm}$, Fig. 6.6 (a), o robô começa sua movimentação com os pés direitos afastando-se do fio e os pés esquerdos permanecem sobre o fio garantido a movimentação do robô da esquerda para a direita de forma estável, Fig. 6.6 (b). O pé direito começa a retornar ao fio, ocorrendo uma colisão com o obstáculo, Fig 6.6 (c). Após a colisão, a manivela de entrada retorna de um valor $\Delta\theta=5^\circ$ com a perna ainda possuindo o comprimento normal, Fig. 6.6 (d). Após o retorno, a perna tem seu comprimento variado de $\Delta c=30\text{mm}$, simultaneamente com a movimentação da manivela de entrada, até a posição correspondente à colisão. Assim, quando a perna atingir a posição correspondente à colisão, esta terá o comprimento de 360mm ($c+\Delta c$), Fig. 6.6 (e), a variação do comprimento da perna sendo realizada através de uma função linear. Atingida a posição relativa ao ponto da colisão, a perna começa a retornar ao fio e a encolher simultaneamente, Fig. 6.6 (f) de tal forma que quando terminar a movimentação, a perna voltará ao seu comprimento normal, Fig. 6.6 (g). Novamente, o encolhimento da perna é realizado através de uma função linear, em que a perna começa seu encolhimento a partir da posição correspondente à colisão. Nesta posição a perna possui o comprimento $c+\Delta c$, e na posição final, correspondente a posição de alinhamento das manivelas de entrada na horizontal, as pernas possuem o comprimento normal, garantindo, desta forma, no próximo passo o movimento estável do robô.

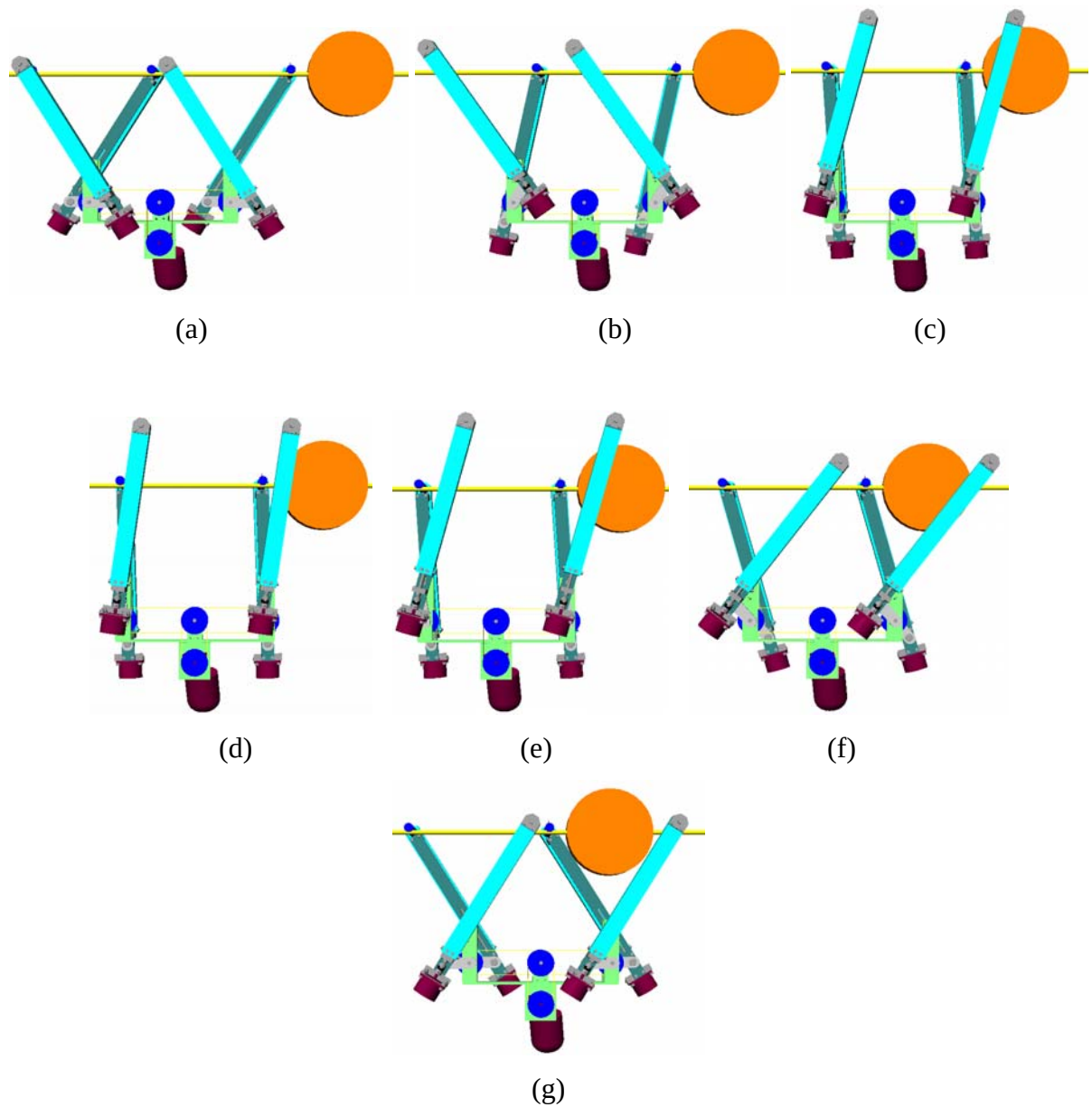


Figura 6.6. Transposição de obstáculo. a) posição inicial com os quatro pés sobre o fio; b) início do movimento, pés direitos iniciam a trajetória fora do fio; c) pés direitos começam a retornar ao fio, ocorre a colisão; d) a manivela de entrada retorna de $\Delta\theta$; e) a perna do robô tem seu comprimento 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 ($a = 80mm$, $r = 50mm$, $c = 330mm$ $\Delta c = 30mm$, $\Delta\theta = 5^\circ$).

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

7.1. Conclusões

Após análise de diversas arquiteturas de robôs móveis suspenso por fio existentes atualmente, verificou-se que grande parte delas possuem ou problemas de controlabilidade ou grandes limitações na transposição de obstáculos. Assim, nesta dissertação foi apresentado um robô móvel suspenso por fio, dotado de quatro pernas de comprimentos variáveis, que possui suficiente versatilidade para transposição de diversos tamanhos de obstáculos, independentemente de sua posição sobre o fio.

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.

Este robô teve como um dos princípios de desenvolvimento a facilidade de controle. Para isto, o robô possui a movimentação das quatro pernas sincronizadas por um conjunto de polias e correias sincronizadoras, acionadas por um único motor de corrente contínua. O controle da variação do comprimento de cada perna do robô é feito com a utilização de funções lineares que simplificam tanto o modelo matemático como o controle dos movimentos.

Foi verificado que o robô possuindo pernas de comprimentos constantes não é capaz de superar obstáculos dispostos irregularmente no fio.

A análise do robô possuindo pernas com comprimentos diferentes permitiu verificar que o tamanho dos passos foi reduzido, além dele ser capaz de superar obstáculos com dimensões menores do que aquelas superadas quando o robô tem pernas iguais. Das simulações realizadas, 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, apesar do pé da perna maior descrever uma trajetória “mais elevada, sobre o fio” mas tendo que recuar para apoiar sobre o fio. Por esta mesma razão, o obstáculo que é possível ser transposto sem colisão também é menor.

Assim, foi proposto um robô possuindo pernas de comprimentos variáveis que, em função de uma metodologia proposta, baseada na colisão do pé do robô com o obstáculo, é capaz de ultrapassar diversos tamanhos de obstáculos, independentemente da posição do obstáculo no fio.

Diversas simulações numéricas e gráficas foram realizadas, para diversas posições e dimensões de obstáculo, comprovando a validade da metodologia proposta. Com a metodologia proposta, o robô com pernas de comprimentos variáveis, além de ultrapassar obstáculos de diferentes dimensões e posicionamentos no fio, também é capaz de transpor obstáculos quando posicionados ao lado do pé do robô.

A metodologia proposta permite ao robô mover-se de forma estável, permitindo sua aplicação em atividades de filmagem e manutenções como, por exemplo, a troca ou instalação de novas esferas de sinalização. Assim, este robô dotado de pernas de comprimentos variáveis possui como vantagem o fato de poder transpor as esferas de sinalização sem defeitos e realizar a manutenção das que estejam com defeito.

O robô desenvolvido poderá ser aplicado tanto para manutenções em torres de alta tensão como em cabos de telecomunicações.

Cabe salientar que este robô não foi projetado para transpor torres e postes, podendo apenas operar entre eles não sendo totalmente autônomo. Este tipo de operação está previsto para trabalhos futuros.

Testes práticos realizados com o robô comprovaram que este é capaz de locomover-se ao longo do cabo, mesmo com este bambo e de transpor os obstáculos, aplicando-se a metodologia proposta.

Do exposto anteriormente, o robô móvel suspenso por fio com pernas de comprimentos variáveis, apresenta alta estabilidade aliada a grande versatilidade de transposição de obstáculos no fio, bem como baixa complexidade de controle, quando comparada com as outras soluções presentes na literatura.

7.2. Sugestões de Temas para Pesquisas Futuras

As sugestões de estudos futuros são descritas a seguir.

Otimização das trajetórias de transposição dos obstáculos com a determinação dos parâmetros ótimos de $\Delta\theta$ e Δc , com o objetivo de economizar energia.

Estudo de outras metodologias para transposição de obstáculos.

Estudo do comportamento dinâmico do robô móvel suspenso por fio, com o objetivo de realizar o estudo do torque do motor de acionamento.

A implementação de uma garra no pé do robô que permita a melhor fixação deste no fio, podendo o mesmo estar sujeito a ventos.

Adaptação do robô para transposição de torres de sustentação dos cabos/fios.

Implementação do controle onboard no robô móvel suspenso por fio, para ser aplicado em atividades de manutenções em campo.

Adaptação de uma plataforma de serviço que possibilite a execução de manutenções, como a limpeza de cabos das linhas de alta tensão ou de telecomunicação, a instalação de esferas de sinalização, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOSHIMA, S.; TSUJIMURA, T.; YABUTA, T. A Wire Mobile Robot with Multi-unit Structure. **Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems**. Tsukuba, p. 414-421, sep. 1989.

ARACIL, R., Penin, L., Ferre, M., Jimenez, L., Barrientos, A., Santamaria, A., Martinez, P., and Tudon, A. ROBTET: A new teleoperated system for live-line maintenance. **Proceedings of the 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance**, Columbus, Ohio, pp 205-211, 1995.

BÜHRLE, P.; CORDES, S. Modeling, simulation and realization of an autonomous six legged walking machine. **The 1996 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference**, Irvine, California, august 1996.

CAMPOS, M.F.M; PEREIRA, G.A.S.; VALE, S.R.C.; BRACARENSE, A.Q.; PINHEIRO, G. A.; OLIVEIRA, M.P. A Robot for Installation and Removal of Aircraft Warning Spheres on Aerial Power Transmission Lines. **IEEE Transactions on power delivery**, vol. 18, n. 4, p. 1581-1582, out. 2003.

DUNLAP, J. Robotic Maintenance of Overhead Transmission Lines. **IEEE Transactions no Power Delivery**, PWRD-1, p. 280-284, 1986.

FAUCHER, D.; LESSARD, J.; RONDOT, P.; CÔTÉ, J. Ground Operated Teleoperation System for Live Power Line Maintenance. **In: IEEE International conference on Systems, Man, and Cybernetics**. Beijing, v. 1, p. 792-798, out. 1996.

FOSTER-MILER. A QinetiQ Company. Project Examples - TOMCAT Disponível em: <http://66.203.92.5/projectexamples/cc_product_design/tomcat.htm>. Acesso em: 14 fev. 2005.

HENRIQUE, L.; CAVALCANTE, A.; OLIVEIRA, G. Tecnologia garante segurança na manutenção de linhas de transmissão. **FIEC On-LINE**, mar. 2005. Disponível em: <<http://www.sfiac.org.br/fiec-hoje/marco2005/28/noticia20.htm>> . Acesso em: 13 fev. 2006.

HERNANDO, M.; GAMBAO, E.; PINTO, E.; BARRIENTOS, A. Collision Control in Teleoperation by Virtual Force Reflection. an Application to the Robtet System. **In: IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Detroit, v.1, p. 565-571, mai. 1999.

KELLY, A. **Introduction to Mobile Robots**, University of Carnegie Mellon, USA, 1996 <<http://www.frc.ri.cmu.edu/%7Ealanzo/course/intro.frm.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2006.

KOBAYASHI, H.; NAKAMURA, H., SHIMADA, T. An inspection robot for feeder cables – basic structure and Control. **In: IECON'91.**, International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Kobe, v. 2, p. 992-995, nov. 1991.

MARUYAMA, Y. Robotic applications for hot-line maintenance. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 27, n. 5, p. 357-365, 2000.

MARUYAMA, Y.; MAKI, K.; MORI, H. A Hot-Line Manipulator Remotely Operated by the Operator on the Ground. **In: Sixth International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Maintenance**, Las Vegas, p. 437-444, set. 1993.

MONTAMBAULT, S.; CÔTÉ, J.; ST-LOUIS, M. Preliminary Results on the Development of a Teleoperated Compact Trolley for Live-Line Working. **In: Proc. IEEE Int. Conf. Transm. Dist. Construction, Operation Live Line Maintenance**, p. 21-27, 2000.

NAKASHIMA, M.; YANO, K.; MARUYAMA, Y.; YAKABE, H. The Hot-Line Work Robot system “Phase II” and Its Human-Robot Interfaces “MOS”. **In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, v. 2, p. 116-123, 1995.

NIO, S.; MARUYAMA, Y. Remote-operated Robotic System for Live-line Maintenance Work. **In: Sixth International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance**, Las Vegas, p. 425-435, set. 1993.

NBR 7276. **Sinalização de advertência em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 1993. 10p. Norma Técnica.

OTTAVIANO, E.; LANNI, C.; CECCARELLI, M. Numerical and Experimental Analysis of a Pantograph-Leg with a Fully-Rotative Actuating Mechanism. 11th World Congr. **In Mech. and Mach. Science**, IFToMM 03, Tianjin, paper Rb31, 2004.

PARKER, L. E.; DRAPER, J. V. **Robotics Applications in Maintenance and Repair**. Handbook of Industrial Robotics, 2nd Edition, Wiley Publishers, 1999.

PEUNGSUNGWAL, S.; PUNGSIRI, B.; CHAMMONGTHAI, K.; OKUDA, M. Autonomous Robot For a Power Transmission Line Inspection. **IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots Systems**, p. 121-124, 2001.

ROCHA, J.; SEQUEIRA, J. The Development of a Robotic System for Maintenance and Inspection of Power Lines. **In: Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics**, ISR2004, Paris, p. 1-6, mar. 2004.

RUAUX, P. Mechanisation of the Installation of Aircraft Warning Spheres on Overhead Lines. **In: Proc. IEEE Int. Conf. Transm. Dist. Construction Live Line Maintenance**, p. 125-131, 1995.

RUBIN, LEW, 2000. The future of power line inspection. **Eletrical Word T&D**. September/October, 2000.

SÁNCHEZ, F. M.; ARACIL, R.; SEBASTIÁN, J. M.; GARCÍA, D. Detector de colisiones para un sistema robotizado teleoperado para trabajos en tensión mediante visión artificial. **p. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial**. Verano, v. 4, n.10, p. 67-75, 2000.

SANTAMARÍA, A.; ARACIL, R.; TUDURI, A.; MARTINEZ, P. ; VAL, F.; PEÑÍN, M. FERRE, L. F.; PINTO, E.; BARRIENTOS, A. Teleoperated Robots for Live Power Lines Maintenance (ROBTEC). **CIRE97**, Conference Publication n. 438, p. 3.31.1-3.31.5, jun. 1997.

SAWADA, J.; KUSUMOTO, K.; MAIKAWA, Y.; MUNAKATA, T.; ISHIKAWA, Y. A Mobile Robot for Inspection of Power Transmission Lines, **IEEE Trans. on Power Delivery**, Vol. 6, No. 1, p. 309-316, jan. 1991.

SONG, S. M.; VOHNOUT, V. J.; WALDRON, K. J.; KINZEL, G. L. Computer-aided design of a leg for an energy efficient walking machine, **Mechanism and machine theory**, vol.19, n.1, pp. 17 – 24, 1984.

SOUZA, A.; MOSCATO, L.A.; SANTOS, M.F.; VIDAL FILHO, W.B.; FERREIRA, G. A. N.; VENTRELLA, A.G. Inspection Robot for High-Voltage Transmission Lines. **ABCM Symposium Series in Mechatronics**. V. 1, p. 1-7, 2004.

SOUZA, A.; MOSCATO, L.A.; SANTOS, M.F.; VIDAL FILHO, W.B.; FERREIRA, G. A. N.; VENTRELLA, A.G. Robô Móvel Aplicado à inspeção em linhas de transmissão. Disponível em: < www.cteep.com.br/docs/setor/estante/pd/robo.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2006.

TAKAOKA, K.; YOKOYAMA, K.; WAKISAKO, H.; YANO, K.; HIGASHIJIMA, K.; MURAKAMI, S. Development of the Fully-Automatic Live-line Maintenance Robot-PhaseIII. **In: Forty IEEE International Symposium on Assembly and Task Plannig Soft Research Park**, Fukuoka, p. 423-428, mai. 2001.

TSUJIMURA, T.; YABUTA, T. Control Method of Mobile Legs to Avoid Aerial Path Obstacles. **In: IEEE International Workshop on Intelligent Robots**, p. 789-794, out. 1988.

TSUJIMURA, T.; YABUTA, T.; MORIMITSU, T. Design of a wire-suspended mobile robot capable of avoiding path obstacles. **IEEE Proc.-Control Theory Appl.**, v. 143, n. 4, p. 349-357, jul. 1996.

TSUJIMURA, T.; MANABE, T.; YABUTA, T. Dynamics and Control of Aerial Mobile Legs. **In: Proceedings of the 1993 IEEE International Workshop on Advanced Robotics – Can robot contribute to preventing environmental deterioration? –**, Tsukuba, p. 91-96, nov. 1993.

TSUJIMURA, T.; MORIMITSU, T. Dynamics of Mobile Legs Suspended from Wire. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 20, p. 85-98, 1997.

YANO, K.; MARUYAMA, Y.; MORITA, K.; NAKASHIMA, M. Development of the Semi-Automatic Hot-Line Work Robot System “Phase II”. **In: Seventh International Conference on Transmission and Distribution Construction and lives Line Maintenance**, Columbus, p. 212-218, out. 1995.

YOKOYAMA, H.; MUKALDA, M. UCHIYAMA, A.; TAMURA, Y.; IMAKI, Y. Manipulator System For Constructing Overhead Distribution Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 2, Abr. 1993.

ZHOU, F. Y.; WANG, J. D.; LI, Y. B.; WANG, J.; XIAO, H. R. Control of an Inspection Robot for 110KV Power Transmission Lines Based on Expert System Design Methods. **Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications**. Toronto, p. 1563-1568, ago. 2005.

ZIELINSKA, T.; HENG, J. Development of a walking machine: mechanical design and control problems, **Mechatronics**, n.12, pp. 737 – 754, 2002.

Anexo I – Programa para traçar a trajetória do centro de massa para pernas iguais

```
% Programa para plotar a Trajetoria do Centro de Massa
%      Robo Móvel Suspenso por Fio
%      Robo com Pernas Iguais
clear all
clc
% Inicialização das Variáveis
AB = [ ]; des = [ ]; passo = [ ]; teta = [ ]; x = [ ]; xo = [ ]; xoinic = [ ]; zo = [ ]; z = [ ];
% Entradas dos parametros do Mecanismo Biela Manivela Deslizante
a = 80                % corpo do robo
r = 50                % raio da manivela
c = 330               % comprimento da perna (biela)
n = input('entre com o numero de passos considerados: n = ')
% Inicio dos calculos
for k = 1:n
    passo = 2*(k-1)*abs(-r*(c-sqrt(a^2 + r^2))/sqrt(a^2 + r^2))
% Distancia entre as posicoes inicial e final de uma perna de apoio no fio
    xoinic = abs(-r*(c - sqrt(a^2 + r^2))/sqrt(a^2 + r^2))
    for i = 1:181
        teta(i) = (i-1)*pi/180;
        AB(i) = sqrt(a^2 + r^2 + 2*a*r*sin(teta(i)+ 2*(n-1)*pi));
        xo(i) = (-r*cos(teta(i) + 2*(n-1)*pi)*(c - AB(i)))/AB(i);
        zo(i) = (-a*c - r*sin(teta(i) + 2*(n-1)*pi)*(c-AB(i)))/AB(i)
        des(i) = xoinic + xo(i) + passo;
    end
    x = [x, des];
    z = [z, zo];
end
plot(x,z,'r');
grid on
```

Anexo II – Programa para traçar a trajetória do centro de massa para pernas diferentes

```
% Programa para Plotagem do Centro de Gravidade do Robo Movel Suspenso por Fio
%                               - ANALISE - Varios ciclos
%
sig = [];
x  = [];
z  = [];
xo = [];
zo = [];

%      Definicao dos parametros do mecanismo Biela-Manivela

a = 80.0;      % distancia do centro ao ponto B
r = 50.0;      % Manivela
c = 330.0;     % Perna menor (biela)
d = 370.0;     % Perna maior

%----- Entrada do numero de ciclos -----

tt = input('Entre com o numero de ciclos do movimento: ');

%-----

%                               Calculo de teta_zero
% syms tetazero
%
%  $q = r^2 + a^2 + 2*a*r*\sin(tetazero);$ 
%
%  $t = r^2 + a^2 - 2*a*r*\sin(tetazero);$ 
%  $S = ((d*(a + r*\sin(tetazero)))/\sqrt{q}) - ((c*(a - r*\sin(tetazero)))/\sqrt{t}) -$ 
%        $2*r*\sin(tetazero);$ 
% tetazero = solve(S,tetazero)

% Tabela de valores calculados
% tetazero = 0;
% tetazero = 0.26976347371874052754772395213949
% tetazero = 0.37510366659422839299171842970840
% tetazero = 0.44483125163384655962120550889340
% tetazero = 0.49833740941294940341580012707916
% tetazero = 0.54230501922076971487775426196774
% tetazero = 0.57990222033992947796792846552022
% tetazero = 0.64241358691066908114213991650792
% tetazero = 0.69369018127039807656259359000745
% tetazero = 0.79340884685258916570444794774488
% tetazero = 0.86959054357859222990154932987883
% tetazero = 0.89589568957012747633977988560026
% tetazero = 0.92040233743495160234607979804426

% para c = d = 330
% para c = 331
% para d = 332
% para d = 333
% para d = 334
% para d = 335
% para d = 336
% para d = 338
% para d = 340
% para d = 345
% para d = 350
% para d = 352
% para d = 354
```

```

% tetazero = 0.93206763891179257729897688059352          % para d = 355
% tetazero = 0.94337952196331277441718528533318          % para d = 356
% tetazero = 0.96504135482780356695724088503944          % para d = 358
% tetazero = 0.98556143088186695947815673731312          % para d = 360
    tetazero = 1.0753186976666555645365636910234          % para d = 370
% tetazero = 1.1509166950817178096252647131398          % para d = 380
% tetazero = 1.2185603181512222995229870237001          % para d = 390
% tetazero = 1.2825136351091575383705296359957          % para d = 400
% tetazero = 1.3470448340723648231848313575160          % para d = 410
% tetazero = 1.4196937633141008036052363669242          % para d = 420
% tetazero = 1.5248002679624283681074139033980          % para d = 429
% tetazero = 1/2*pi                                       % para d = 430

%-----
% Definicao do xoinic
    xoinic = 0.0; % Posicionamento do robo sobre o fio
%-----
%          Calculo de xc_linha_verdadeiro = teta_zero - teta = pi - (2*tetazero)

    xc_linhav = r*cos(pi-tetazero)*(1 - (c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(pi-tetazero)))));
%-----
%          Calculo de xc_verdadeiro = teta_zero - teta = 0

xc_v = r*cos(tetazero)*((d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(tetazero)))) - 1);

%-----

for k=1:tt
    % Passo da perna curta
        p_pc = (2*r*cos(tetazero)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - 2*a*r*sin(tetazero)))-1));
    % Passo da perna longa
        p_pl = (2*r*cos(tetazero)*((d/sqrt(a^2 + r^2 + 2*a*r*sin(tetazero)))-1));
        trajeto= p_pc + p_pl;
%          Variar teta de 0 ate 2 pi
for i = 1:1:361
    teta(i) = ((i-1)*pi/180)+((k-1)*2*pi);
    if teta(i)>=((k-1)*2*pi) & teta(i)<=((2*k)-1)*pi-2*tetazero
        sig = 1;
    elseif teta(i)>(((2*k)-1)*pi-2*tetazero) & teta(i)<=(2*k*pi)
        sig = 0;

    end

% Calculo dos valores da equacoes
cosseno(i) = cos(teta(i) + tetazero );
seno(i) = sin(teta(i) + tetazero );
p(i) = sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*seno(i)));
n(i) = sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*seno(i)));

```

```

o(i) = c*(a - (r*seno(i)));
m(i) = d*(a + (r*seno(i)));
xc_linha(i) = r*coseno(i)*(1 - (c/p(i)));
xc(i) = r*coseno(i)*((d/n(i)) - 1);
zc_linha(i) = ((1 - sig)*(-r*seno(i) - (o(i)/p(i))));
zc(i) = (sig*(-(m(i)/n(i)) + (r*seno(i))));
delta_x(i) = -r*coseno(i)*((1 - d/n(i)) + (r*cos(tetazero)*((1 - d/sqrt(a^2 + r^2 +
(2*a*r*sin(tetazero))))));
delta_x_linha(i) = -r*cos(pi-tetazero)*(-1 + (c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(pi-tetazero)))) -
r*coseno(i)*(-1 + (c/p(i)));
x_tetazero = r*cos(tetazero)*((-d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(tetazero)))) + 1);
xoo(i) = xoinic + sig*abs(delta_x(i)) + (1-sig)*(delta_x_linha(i)) + 2*(1-sig)*abs(x_tetazero);
xo(i) = (k-1)*(trajeto+xoo(1)) + xoo(i);
zo(i) = yc_linha(i) + yc(i);

end

hold on
x = [x,xo];
z = [z,zo];

axis equal
axis([0 550 -350 -250])

plot(x,z,'b.','LineWidth',1);
title('Trajetória do Centro de Massa');
legend('330 e 335', '330 e 345', '330 e 355', '330 e 360', '330 e 380')
xlabel('Deslocamento em X - [mm]');
ylabel('Deslocamento em Z - [mm]');
grid on

end

```

Anexo III – Trajetória dos pés para o robô com pernas diferentes

```
% Programa para Plotagem da Trajetoria do Pe do Robo
%
%
% Data: 06/04/2005
clear all
clc

a = 80.0;      % distancia do centro ao ponto B
r = 50.0;      % Manivela
c = 330.0;     % Perna menor (biela)
d = 350.0;     % Perna maior

%-----

%
%                               Calculo de teta_zero

% syms tetazero
% q = r^2 + a^2 + 2*a*r*sin(tetazero);
% t = r^2 + a^2 - 2*a*r*sin(tetazero);
% S = ((d*(a + r*sin(tetazero)))/sqrt(q)) - ((c*(a - r*sin(tetazero)))/sqrt(t)) - 2*r*sin(tetazero);
% tetazero = solve(S,tetazero)

%tetazero = 1.1895325594048444652364802090892
%tetazero = 1.3800673594533557234455449115313
%tetazero = 0.95330000964720265502443498911821
%tetazero = 1.1185337808360701317463231950009
% tetazero = 0;
% tetazero = 0.26976347371874052754772395213949
% tetazero = 0.37510366659422839299171842970840
% tetazero = 0.44483125163384655962120550889340
% tetazero = 0.49833740941294940341580012707916
% tetazero = 0.54230501922076971487775426196774
% tetazero = 0.57990222033992947796792846552022
% tetazero = 0.64241358691066908114213991650792
% tetazero = 0.69369018127039807656259359000745
% tetazero = 0.79340884685258916570444794774488
% tetazero = 0.86959054357859222990154932987883
% tetazero = 0.89589568957012747633977988560026
% tetazero = 0.92040233743495160234607979804426
% tetazero = 0.93206763891179257729897688059352
% tetazero = 0.94337952196331277441718528533318
% tetazero = 0.96504135482780356695724088503944
% tetazero = 0.98556143088186695947815673731312
% tetazero = 1.0753186976666555645365636910234
% tetazero = 1.1509166950817178096252647131398
% tetazero = 1.2185603181512222995229870237001
% tetazero = 1.2825136351091575383705296359957

% a = 90 r = 50 c = 330 d = 400
% a = 70 r = 50 c = 330 d = 400
% para c = 370 / d = 390
% para c = 370 / d = 410
% para c = d = 330
% para c = 331
% para d = 332
% para d = 333
% para d = 334
% para d = 335
% para d = 336
% para d = 338
% para d = 340
% para d = 345
% para d = 350
% para d = 352
% para d = 354
% para d = 355
% para d = 356
% para d = 358
% para d = 360
% para d = 370
% para d = 380
% para d = 390
% para d = 400
```

```

%----- Entrada do numero de ciclos -----
tt = input('Entre com o numero de ciclos do movimento: ');
%-----Posicao Inicial do Referencial-----
xc_translacao = r*cos(tetazero)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(tetazero)))) + (d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(tetazero)))) - 2)
xc_linha_translacao = -r*cos(tetazero)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(tetazero)))) + (d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(tetazero)))) - 2)
%-----
for k=1:tt
for i = 1:1:361
    teta(i) = ((i-1)*pi/180)+((k-1)*2*pi);
    if teta(i)>=((k-1)*2*pi) & teta(i)<=((2*k)-1)*pi-2*tetazero
        sigma1 = 1;
    elseif teta(i)>(((2*k)-1)*pi-2*tetazero) & teta(i)<=(2*k*pi)
        sigma1 = 0;
    end

% Calculo dos valores da equacoes
xc_linha(i) = -r*cos(teta(i)+tetazero)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))) + (d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))) - 2);

zc_linha(i) = (((-d*(a + r*sin(teta(i)+tetazero)))/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))) + (2*r*sin(teta(i)+tetazero))) + (((c*(a - r*sin(teta(i)+tetazero)))/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))));

zc(i) = (((d*(a + r*sin(teta(i)+tetazero)))/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))) - (2*r*sin(teta(i)+tetazero))) - (((c*(a - r*sin(teta(i)+tetazero)))/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))));

zc(i) = r*cos(teta(i)+tetazero)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))) + (d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(teta(i)+tetazero)))) - 2);

z_resultante(i) = (1-sigma1)*yc(i) + (sigma1)*yc_linha(i);

x_resultante(i) = (sigma1)*(xc_linha(i) + xc_translacao) + (1-sigma1)*xc(i);

x_ciclo(i) = (k-1)*2*abs(xc_linha_translacao) + ((sigma1)*(xc_linha(i) + xc_translacao) + (1-sigma1)*xc(i));

hold on
axis equal
title('Trajetoria dos pes ');
xlabel('Deslocamento em X - [mm]');
ylabel('Deslocamento em Z - [mm]');
grid on
legend('c = 330 e d = 330', 'c = 330 e d = 331', 'c = 330 e d = 332')
plot(x_ciclo,z_resultante,'b','LineWidth',2)
end
end

```

Anexo IV – Cálculo do θ_m

% Determinacao de teta_m (posicao da centro do obstaculo)

```
syms teta c d
tetazero = 0
a = 80
r = 50
xc = r*cos(teta)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta)))) + (d/sqrt(a^2 + r^2 +
(2*a*r*sin(teta)))) - 2);
xc_linha_translacao = r*cos(tetazero)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(tetazero)))) +
(d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(tetazero)))) - 2);
x = xc + abs(xc_linha_translacao);
xm = 425
d = 330
c = 330

S = xc + abs(xc_linha_translacao) - xm

S = 50*cos(teta)*(1/10*c/(89-80*sin(teta))^(1/2)+1/10*d/(89+80*sin(teta))^(1/2)-
2)+abs(5/89*c*89^(1/2)+5/89*d*89^(1/2)-100)-425

teta = solve(S,teta)
```

Anexo V – Programa para transposição de Obstáculos

```
% TRANSPOSICAO DE OBSTACULOS – CASO DE UMA COLISAO
clear all
clc
% Entrada do parametros do mecanismo biela-manivela-deslizante
a = 80; % distancia do ponto O ao ponto B
r = 50; % raio da manivela (fixo)
c = 330; % comprimento normal da perna
d = 330; % comprimento normal da perna

%#####
%                               Plotagem do mecanismo fisico
%                               biela-manivela-deslizante na posicao inicial
hold on
plot([0 174.8997], [0 -279.8394 ], 'k','LineWidth',2.0);
plot([249.793 74.8997], [0 -279.8394], 'k','LineWidth',2.0);
plot([74.8997 174.8997], [-279.8394 -279.8394 ], 'k','LineWidth',2.0);
plot([249.793/2 249.793/2], [-339.8394 10], 'b--','LineWidth',2.0);
gama = 0:0.25:2*pi;
abssi = r*cos(gama) + 249.793/2;
ordenada = r*sin(gama)- 279.8394;
plot(abssi,ordenada,'ko','MarkerSize',2,'MarkerFaceColor','k');
plot([-300 900], [0 0], 'k','LineWidth',3.0); % Plotagem do fio

%#####
%                               Posição Inicial
zo = -a*c/sqrt(a^2 + r^2)
tetazero = 0 % as duas pernas inicialmente possuem o mesmo comprimento
% posicionamento do referencial o movimento começa com a perna de
% comprimento d fazendo o voleio
x_translacao = r*cos(pi)*((c/sqrt(a^2+r^2-(2*a*r*sin(pi))))...
    + (d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(pi)))) - 2);
%#####
%                               Colocacao de um obstaculo aleatorio no fio

R_obstaculo = 90 % [mm]
x_obstaculo = 375 % distancia do obstaculo em relacao a origem
z_obstaculo = 0 % sobre o fio
gama = 0:0.01:2*pi;
abssi1 = R_obstaculo*cos(gama) + (x_obstaculo);
ordenada1=R_obstaculo*sin(gama);
plot(abssi1,ordenada1,'g','LineWidth',2.0);

%#####
%   Plotagem da trajetoria normal com as pernas de mesmo comprimento
% o angulo de entrada é medido a partir da perna em contato com o fio.
```

```

for i = 181:1:361
    teta(i) = (i-1)*pi/180;

    xc(i) = r*cos(teta(i))*(+(c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta(i)))))...
        + (d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(teta(i)))) - 2);

    zc(i) = (((d*(a+ r*sin(teta(i))))/sqrt(a^2+r^2+(2*a*r*sin(teta(i)))))...
        - (2*r*sin(teta(i))))...
        - (((c*(a- r*sin(teta(i))))/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta(i))))));

    x(i) = xc(i) -x_translacao;
    hold on
    plot(x,zc,'r.')
    axis equal
    grid on

end

% Comando que permite atraves do mouse selecionar um ponto coordenado do
% grafico e armazenar - PONTO REPRESENTATIVO DA PRIMEIRA COLISAO
[x0 y0] = ginput(1)
comparacao = abs(x0 - x)
% Determinacao do angulo da primeira colisao
[minimo indice] = min(comparacao)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                                PRIMEIRA PARTE DO CICLO
% Nesta parte o mecanismo irá voltar de um angulo delta_teta
% e depois alongar a perna de um determinado valor
% delta_teta = volta
% delta_d = aumento

volta = 5; % numero de graus para voltar (delta_teta)
aumento = 30; % valor do aumento da perna (delta_d)

% O aumento da perna acontece simultaneamente com a movimentacao da
% manivela de entrada (variacao do teta)
n = volta + 1; % valor final
for j = 1:1:n
    inicio = indice - volta;
    teta1(j) = (inicio + j - 1)*pi/180;
    di = c; % valor normal da perna - inicial
    df = c + aumento; % valor final
    % A variação do comprimento da perna é realizada com o uso de uma
    % equação do primeiro grau
    % Coeficientes das equacoes lineares
    AA = [(inicio*pi/180) 1; ((indice)*pi/180) 1];
    % Coeficientes independentes
    BB = [di ; df];

```

```

coef = AA\BB;
Q = coef(1);
S = coef(2);
d1(j) = Q*teta1(j) + S;
xc1(j) = r*cos(teta1(j)+tetazero)*(+(c/sqrt(a^2+r^2-(2*a*r*sin(teta1(j)+tetazero)))) +
(d1(j)/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(teta1(j)+tetazero)))) - 2);
zc1(j) = d1(j)*(a + r*sin(teta1(j)))/sqrt(a^2 + r^2 + 2*a*r*sin(teta1(j))) - c*(a -
r*sin(teta1(j)))/sqrt(a^2 + r^2 - 2*a*r*sin(teta1(j))) - 2*r*sin(teta1(j));
x1(j) = xc1(j) + abs(x_translacao);
hold on
plot(x1,zc1,'m.')
end

%%%%%%%%%%%%%% SEGUNDA PARTE DO CICLO%%%%%%%%%%%%%%

% O procedimento adotado para começar a encolher a perna
% é adotar o primeiro ponto de colisão com o obstáculo
% como sendo o ponto de início do encolhimento da perna.

nn = 360 - indice + 1; % cálculo do número de tetas faltantes
for k = 1:nn
    inicio1 = indice;
    teta2(k) = (inicio1 + k - 1)*pi/180;
    dff = c;
    dii = d1(:,end);
    % Coeficientes das equações lineares
    AAA = [(indice*pi/180) 1; (360*pi/180) 1]
    % coeficientes independentes
    BBB = [dii ; dff]
    coef1 = AAA\BBB
    QQ = coef1(1)
    SS = coef1(2)
    d2(k) = QQ*teta2(k) + SS
    xc2(k) = r*cos(teta2(k)+tetazero)*(+(c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(teta2(k)+tetazero)))) +
(d2(k)/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(teta2(k)+tetazero)))) - 2);
    xc_linha_translacao2 = -r*cos(tetazero)*((c/sqrt(a^2 + r^2 - (2*a*r*sin(tetazero)))) +
(d/sqrt(a^2 + r^2 + (2*a*r*sin(tetazero)))) - 2);
    zc2(k) = d2(k)*(a + r*sin(teta2(k)))/sqrt(a^2 + r^2 + 2*a*r*sin(teta2(k))) - c*(a -
r*sin(teta2(k)))/sqrt(a^2 + r^2 - 2*a*r*sin(teta2(k))) - 2*r*sin(teta2(k));
    x2(k) = xc2(k) + abs(x_translacao);

    hold on
    plot(x2,zc2,'k.')

end

```