

PROJETO DO CONTROLE DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE DUAS RODAS COAXIAIS PARA PORTADORES DE PARAPLEGIA UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA

Gabriel Kimito Kiyohara

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

e-mail: gabriel_kimito@yahoo.com.br

Resumo. Este trabalho trata da modelagem e controle de um veículo auto-estabilizante adaptado para portadores de paraplegia. Primeiro, foram criados modelos físicos e matemáticos do sistema formado pelo veículo e o usuário sobre ele. Então, para controlá-lo, foi projetado um algoritmo de controle utilizando lógica difusa, sintonizado a partir de simulações numéricas. Para verificar seu desempenho, foram feitas simulações usando método de controle linear quadrático, e testes variando o conjunto de parâmetros do usuário.

Palavras chave: Modelagem de dados, Lógica fuzzy

1. Introdução

Existe uma demanda crescente por produtos que permitam a pessoas com baixa mobilidade ter maior qualidade de vida e maior independência. Cada vez mais pessoas com deficiências conquistam espaço na sociedade e desejam meios de ter uma vida mais confortável. O objetivo deste trabalho é desenvolver um conjunto de regras de controle para um veículo individual apresentado a seguir, que une tecnologia da cadeira de rodas ereta com a auto-estabilização.

1.1. Cadeira de rodas ereta

A cadeira de rodas, embora seja uma solução viável e amplamente aceita, mantém o usuário o tempo todo na posição sentada, o que aumenta seus problemas de acessibilidade, como alcançar uma prateleira. O longo tempo sentado leva também a complicações intestinais, urinárias, e até a feridas de pressão: as escaras, que surgem quando as protuberâncias ósseas pressionam certos pontos da musculatura e impedem a circulação de sangue, levando à necrose do tecido.

Como alternativa, têm surgido as cadeiras de rodas levantadoras (tradução livre do inglês, *standing wheelchairs*). Através de anteparos e da imobilização da articulação dos joelhos, elas permitem que o usuário fique em pé, apoiando o peso em suas pernas, mas limitam-se a pouca ou nenhuma mobilidade enquanto na posição ereta.

1.2. Segway

Em 2001, foi lançado o Segway™ HT (rebatizado depois como PT). Criado por Dean Kamen, trata-se de um veículo elétrico individual de duas rodas que responde a comandos de inclinação para mover-se e para manter-se estável. A proposta é fornecer um meio de transporte não poluente para curtas distâncias, e o dispositivo tem sido usado para patrulhas policiais, inspeção de armazéns, entrega de cargas leves, transporte pessoal e lazer. Atualmente a empresa oferece sete modelos diferentes, além daqueles fabricados especialmente para uso em patrulhas policiais, mas nenhum deles específico para deficientes físicos.

A idéia imita o ser humano: quando o corpo se inclina para frente, o cérebro manda um sinal para uma das pernas se posicionar à frente, dando um passo; o caminhar é composto por uma sequência de inclinações e reposicionamentos das pernas. O Segway faz algo similar, mas usa os motores em vez das pernas, movendo-se para frente ou para trás mantendo o equilíbrio. A novidade em auto-estabilização mobilizou os entusiastas da tecnologia a criar suas próprias versões, desde brinquedos montados com Lego até monociclos motorizados. Dentre esses projetos estão idéias de cadeiras auto-estabilizantes, que são mais compactas e ágeis que cadeiras de rodas comuns; e a cadeira erguente auto-estabilizante, que é o tema deste trabalho.

Aliando a posição ereta à mobilidade e compacidade, um aparelho como esse permitiria que o usuário se locomovesse em pé, aumentando a acessibilidade e reduzindo os problemas de saúde associados à permanência na posição sentada.

2. Metodologia

O veículo hipotético consiste de uma plataforma com duas rodas coaxiais acionadas por motores DC e com anteparos para posicionar e segurar um usuário que tenha mobilidade das pernas limitada. O usuário envia comandos para avançar ou realizar curvas utilizando um *joystick*. Ele tem também certa liberdade para mover seu tronco.

Para desenvolver o mapa de regras do veículo, foi feito primeiro um modelo matemático para ser simulado numericamente em computador. O modelo foi obtido pelas equações lagrangianas, adotando valores de parâmetros encontrados para cadeirantes e para versões independentes de veículos auto-estabilizantes. Depois as equações foram linearizadas em torno do repouso e passou-se o sistema para representação em espaço de estados.

Uma vez obtido o modelo, foram feitas simulações para sintonizar as regras de controle até chegar a um resultado satisfatório.

3. Modelagem

O sistema pode ser dividido em usuário e veículo, conforme mostra a Fig. (1). Ela exhibe as grandezas ainda na forma literal. O corpo do usuário foi ainda dividido em elo 1 – correspondente ao torso, cabeça e membros superiores –, que tem mobilidade em relação ao veículo; e elo 2 – composto pelos membros inferiores –, que fica solidário ao anteparo do veículo, devido aos seguradores (não representados nas figuras). O veículo é dividido em roda direita (indicada pelo subscrito D), roda esquerda (subscrito E) e elo3 (todo o restante do veículo). Os termos apresentados são:

m_i = massas dos segmentos indicados

I_{ji} = momentos de inércia, em torno do eixo indicado por j e referente ao segmento i

L = alturas dos elos e dos centros de massa, conforme indicado

D = diâmetro das rodas

B = largura entre os centros das rodas

A idéia é que o controle de avanço e curvas seja feito por meio de um *joystick*. Para modelar a inclinação do corpo, admitiu-se uma mola torcional com amortecimento na junta do quadril, simulando a manutenção de posição do corpo; e um momento interno aplicado na junta, simulando a ação muscular voluntária para inclinar o tronco. Não foram considerados a curvatura das costas nem o deslocamento dos braços em relação ao corpo.

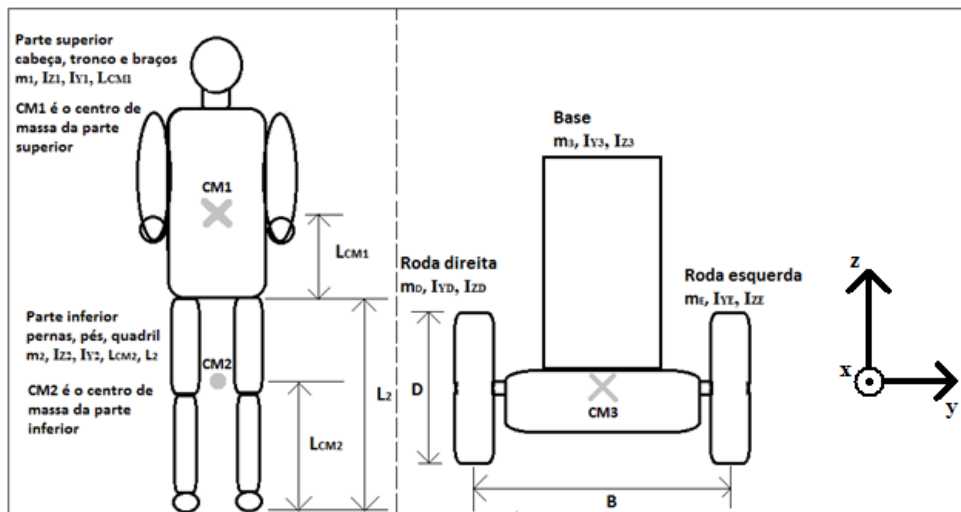


Figura 1. Esquema dos corpos presentes no modelo, apresentando alguns dos parâmetros usados (criado pelo autor)

O sistema de coordenadas xyz é solidário ao centro de massa do veículo (admite-se que esteja contido na linha dos eixos das rodas), de modo que a orientação dos eixos x e y variam em relação ao solo, mas o eixo z se mantém sempre vertical. Um sistema de coordenadas XYZ, fixo no solo, foi usado para o equacionamento.

3.1. Equacionamento

Seguiu-se com a formulação dos termos de energia a serem usados nas equações de Lagrange. As expressões encontradas são mostradas a seguir, onde T corresponde à energia cinética, V é a energia potencial, e R é o termo dissipativo.

$$V = m_1 g [Z_3 + L_2 \cos \phi_3 + L_{CM1} \cos(\phi_1 + \phi_3)] + m_2 g (Z_3 + L_{CM2} \cos \phi_3) + m_3 g Z_3 + \frac{K_T \phi_1^2}{2} \quad (1)$$

$$R = \frac{R_D \dot{\phi}_D^2}{2} + \frac{R_E \dot{\phi}_E^2}{2} + \frac{b_1}{2} \dot{\phi}_1^2 + \frac{b_D}{2} (r \dot{\alpha}_D - \dot{\phi}_3)^2 + \frac{b_E}{2} (r \dot{\alpha}_E - \dot{\phi}_3)^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
T = & \frac{1}{2} \left[m_3 \frac{D^2}{16} (\dot{\alpha}_D + \dot{\alpha}_E)^2 + I_{y3} \dot{\phi}_3^2 + I_{z3} \frac{D^2}{4B^2} (\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_E)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[m_D \left(\dot{\alpha}_D \cdot \frac{D}{2} \right)^2 + I_{yD} \dot{\phi}_D^2 + I_{zD} \frac{D^2}{4B^2} (\dot{\alpha}_D - \right. \\
& \left. \dot{\alpha}_E)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[m_E \left(\dot{\alpha}_E \cdot \frac{D}{2} \right)^2 + I_{yE} \dot{\phi}_E^2 + I_{zE} \frac{D^2}{4B^2} (\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_E)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[m_2 (\dot{X}_2^2 + \dot{Y}_2^2 + \dot{Z}_2^2) + I_{y2} \dot{\phi}_3^2 + \right. \\
& \left. I_{z2} \frac{D^2}{4B^2} (\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_E)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[m_1 (\dot{X}_1^2 + \dot{Y}_1^2 + \dot{Z}_1^2) + I_{y1} \dot{\phi}_1^2 + I_{z1} \frac{D^2}{4B^2} (\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_E)^2 \right] + \frac{L_D}{2} i_D^2 + \frac{L_E}{2} i_E^2 + \\
& K_D i_D (r \alpha_D - \phi_3) + K_E i_E (r \alpha_E - \phi_3)
\end{aligned} \quad (3)$$

Os termos de massa, inércia e comprimento seguem a notação da Fig.(1). Sobre os demais termos:

$\dot{\alpha}_D$ e $\dot{\alpha}_E$ = velocidades angulares das rodas direita e esquerda, respectivamente

ϕ_3 e ϕ_2 = inclinação entre o elo correspondente e o eixo z. Como o elo 2 é solidário ao elo 3, os ângulos são iguais.

$\dot{\phi}_D$ e $\dot{\phi}_E$ = velocidades de inclinação das rodas. Acabam sendo iguais a $\dot{\alpha}_D$ e $\dot{\alpha}_E$, respectivamente

X_i , Y_i e Z_i = coordenadas dos centros de massa dos elos indicados por i, relativos ao referencial fixo no solo

ϕ_1 = inclinação entre os elos 1 e 3

L_D e L_E = indutâncias dos motores direito e esquerdo

i_D e i_E = correntes elétricas dos motores direito e esquerdo

K_D e K_E = constantes de proporcionalidade torque-corrente dos motores

r = relação de transmissão da caixa de redução dos motores

g = aceleração da gravidade

K_T = rigidez da mola torcional do quadril

R_D e R_E = resistências elétricas dos motores

b_D e b_E = atritos entre rotores e estatores dos motores

A modelagem segue com a aplicação das equações diferenciais da forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = F_i \quad (4)$$

Em que L é a diferença entre a energia cinética T e a energia potencial V , F são as forças não-contempladas nos termos de energia (como a tensão aplicada nos motores e o momento aplicado na junta do quadril), e q_i são as coordenadas generalizadas, que são: $[\phi_1 \ \phi_3 \ \alpha_D \ \alpha_E \ \int i_D dt \ \int i_E dt]$

Para que fosse montado o sistema em espaço de estados, as equações resultantes foram linearizadas em torno do ponto em que todos os elos se encontram alinhados na vertical, e as velocidades são todas nulas. Rearranjando os termos, foi possível chegar ao sistema na forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Nw \quad (5)$$

Em que A é uma matriz que representa a dinâmica do sistema e x é o vetor de estados. O vetor u representa a ação de controle e a matriz B , a dinâmica do controle sobre o sistema. O vetor w representa as ações do usuário, e N é a matriz que traduz os efeitos dessas ações no sistema.

Durante as pesquisas, não foram encontrados valores para as indutâncias dos motores. Optou-se então por desprezar seus efeitos, de modo que os termos de derivada da corrente desaparecem das equações, e os termos de corrente podem ser substituídos. Assim, o vetor de estados x fica simplificado e pode ser definido como:

$$x = [\phi_1 \ \dot{\phi}_1 \ \phi_3 \ \dot{\phi}_3 \ \alpha_D \ \dot{\alpha}_E]^T \quad (6)$$

É importante salientar que este vetor x não tem relação direta com as coordenadas x do referencial móvel.

O vetor u do controle do sistema contém as tensões nos motores, enquanto w contém M_1 , o momento que o usuário aplica no quadril simulando seu movimento de inclinação voluntária; h , o comando para realização de curvas; e f , o comando de avanço.

Giroscópios e acelerômetros MEMS podem ser usados para detectar as velocidades angulares do veículo e sua inclinação, e encoders para medir a velocidade angular das rodas.

Tal arranjo de atuadores e sensores satisfaz os critérios de observabilidade e controlabilidade (gramianos com posto completo, indicando ser possível controlar e observar o estado todo).

3.2. Parâmetros do veículo

Para o veículo, foram procurados valores de referência de cadeiras de rodas, do Segway e de protótipos baseados no Segway. A massa estimada para o veículo, sem as rodas, é de 40 kg (baseado em veículos similares).

Foram adotadas rodas de 600 mm de diâmetro e 2 kg. A largura entre as rodas adotada foi de 590 mm.

Motor: foi escolhido o motor NPC-T64, usado com sucesso em protótipos independentes. É um motor DC com caixa de redução 20:1 embutida, tensão nominal 24 V (podendo chegar a 36 V sem problemas aparentes), velocidade máxima da ordem de 230 rpm e massa de aproximadamente 6 kg. Estima-se que tenha constante de proporcionalidade de 0,042 Nm/A nas velocidades mais baixas, segundo teste dinamométrico publicado no sítio do fabricante.

3.3. Modelo do corpo humano

Utilizando valores de gravidade específica e posição de baricentros encontrados em Hanavan (1964), e valores de comprimentos encontrados em Paquet et al (2004), foi feito um modelo do corpo de um cadeirante médio, do sexo masculino, usuário de cadeira manual (pois teria mais chances de conseguir usar o aparelho que usuários de cadeiras motorizadas, que podem ter mobilidade mais reduzida).

As pernas superiores e inferiores, os braços e os antebraços foram modelados como troncos de cone, pois seus centros de massa não se encontram à meia-altura do segmento. Abdômen e tórax foram modelados como cilindros de seções transversais elípticas iguais, mas com alturas e densidades distintas. A cabeça é um cilindro de seção elíptica e o pescoço, de seção circular. As mãos fechadas são representadas por esferas e os pés por paralelepípedos.

A Fig. (2) apresenta a geometria a que se chegou para o modelo. Este apresenta altura de 1,693 m e massa de 78,93 kg, resultando num índice de massa corporal de 27,5, indicando a faixa de sobrepeso.

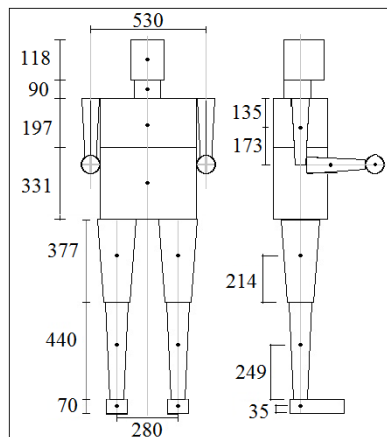


Figura 2. Modelo do corpo de cadeirante médio (figura criada pelo autor)

Os valores de comprimentos, massas e momentos de inércia individuais foram combinados para estimar os parâmetros dos elos. Para o elo 1, tem-se:

- Massa: $m_1 = 2 \times (0,45 + 0,95 + 1,23) + 4,51 + 0,87 + 15,8 + 29,1 = 55,5$ kg;
- Altura do baricentro: $L_{CM1} = 304$ mm ($\alpha = 0,623$, próximo de Hanavan);
- Momento de inércia em relação ao eixo z: $I_{z1} = 3,465$ kg.m²;
- Momento de inércia em relação a um eixo paralelo a y, pólo no baricentro: $I_{y1} = 2,19$ kg.m².

Para o elo 2, tem-se:

- Massa do elo 2: $m_2 = 23,4$ kg;
- Comprimento total $L_2 = 887$ mm;
- Altura do baricentro: $L_{CM2} = 525$ mm;
- Momento de inércia em relação ao eixo z: $I_{z2} = 3,465$ kg.m²;
- Momento de inércia em relação a um eixo paralelo a y, pólo no baricentro: $I_{y2} = 1,458$ kg.m².

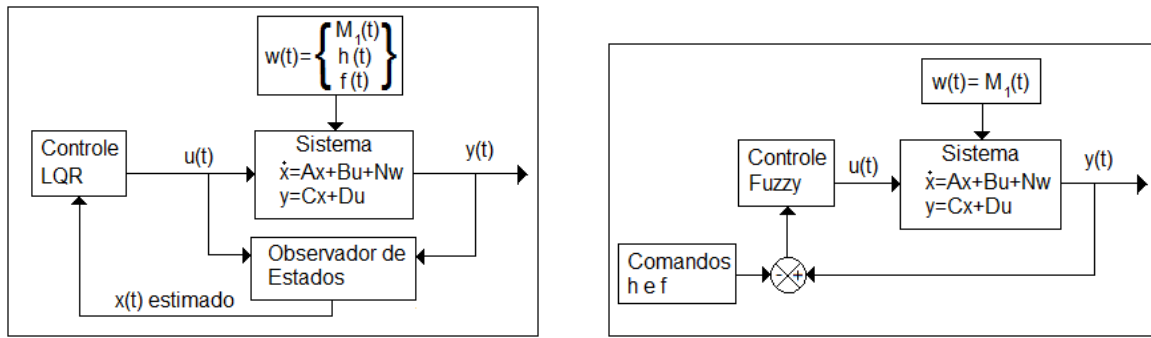
Como parâmetro do corpo, foi preciso ainda estimar uma elasticidade torcional para a mola idealizada que representa a rigidez do quadril, bem como o amortecimento associado. Para esta estimativa, toma-se um estado de equilíbrio com o elo 2 na vertical ($\theta_2 = 0$) e com o elo 1 inclinado de 10° , sustentado apenas pelo momento da mola, o que fornece uma constante $K_T = 165$ N.m/rad. Para que a articulação tenha amortecimento próximo do crítico, optou-se por uma constante $b_1 = 18$ N.m.s/rad.

4. Controle

Foram projetados algoritmos de controle utilizando lógica difusa e também controle Linear Quadrático (LQR). O controle LQR serviu como auxílio no projeto do mapa de regras fuzzy e para comparação de desempenho.

Assume-se que o controlador determina as tensões a serem aplicadas nos motores, baseando-se nos sinais de comando do usuário e em sensores que medem ϕ_3 , $\dot{\phi}_3$, $\dot{\alpha}_D$ e $\dot{\alpha}_E$.

Os diagramas de blocos a seguir ilustram a forma como os dois controles foram montados e simulados.



Figuras 3(esq) e 4(dir). Diagramas de blocos do controle LQR(esq) e controle fuzzy(dir).

4.1. Controle LQR

O controle LQR envolve a síntese de uma matriz de controle ótimo K_{ot} tal que a saída segue a forma $u = K_{ot}x$ e minimiza uma função de ponderação do erro. Como este método exige conhecimento de todo o estado x , mas apenas parte dele é medida, faz-se necessário incluir um observador de estados. A matriz de controle obtida, e os pólos do sistema são:

$$K_{ot} = \begin{bmatrix} 39.546733 & 12.611844 & 258.31482 & 52.915847 & 0.8744151 & 1.5445843 \\ 39.546733 & 12.611844 & 258.31482 & 52.915847 & 1.5445843 & 0.8744151 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Pólos de malha aberta} &= \begin{bmatrix} 4.7221205 \\ -6.6678176 \\ -4.2753688 \\ -2.1288875 + 0.8623239i \\ -2.1288875 - 0.8623239i \\ -0.7662054 \end{bmatrix}; \quad \text{Pólos de malha fechada} = \begin{bmatrix} -6.9416039 + 2.8882099i \\ -6.9416039 - 2.8882099i \\ -2.3152927 + 1.4659498i \\ -2.3152927 - 1.4659498i \\ -2.9552677 \\ -1.3534405 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

4.2. Controle difuso

Primeiramente foi utilizado um mapa de duas condições de entrada: ϕ_3 e $\dot{\phi}_3$, projetado para manter o veículo em pé. Mas ele não foi incapaz de estabilizar o sistema. Incluiu-se então a velocidade das rodas como entrada, na forma $(\dot{\alpha}_D - f - h)$, para a roda direita; e $(\dot{\alpha}_E - f + h)$, para a roda esquerda. As saídas variam positivamente com cada entrada (entrada positiva $\Rightarrow$ saída positiva, e vice-versa). Tal mapa consegue impedir a queda do usuário, e seguir os comandos de referência até certo ponto, mas resíduos numéricos nas velocidades das rodas eram amplificados e faziam com que o sistema realizasse curvas súbitas sem o envio do comando h .

Então foi incluída uma quarta variável em ambas as rodas: $(\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_E - 2h)$. A tensão da roda direita varia positivamente com ela, enquanto a esquerda varia negativamente; assim, as velocidades seguem o comando h que, quando positivo, acelera a roda direita e desacelera a esquerda. A inclusão desta variável estabilizou as rodas, de modo que elas seguem os comandos de f e h , e o sistema se mantém equilibrado.

As variáveis têm três conjuntos de valores difusos cada: Negativo(N), Zero(Z) e Positivo(P), conforme mostra a Fig.(5). Nela é apresentado o gráfico das funções de pertinência para ϕ_3 , sendo que as demais variáveis têm funções análogas, mudando apenas o intervalo em que há intersecção entre Z e P, e Z e N (sempre simétricos). Tais intervalos foram estimados primeiramente a partir dos resultados das simulações LQR, e depois foram variados conforme os resultados de uma série de testes, até que um resultado satisfatório foi obtido.

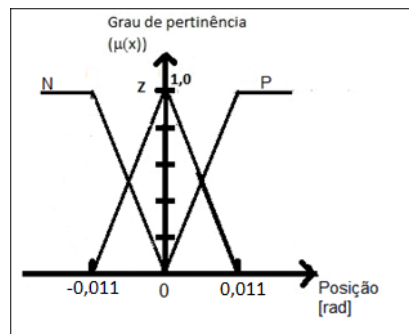


Figura 5. Funções de pertinência de ϕ_3

Na situação em que a quarta variável assume valor Zero, os mapas para as rodas direita e esquerda coincidem, como representado na Tab.(1).

Tabela 1. Mapa de regras para $(\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_E - 2h)=Z$ e $\dot{\phi}_3=Z$.

		ϕ_3		
		N	Z	P
$(\dot{\alpha}_D - f - h)$ ou $(\dot{\alpha}_E - f + h)$	N	NM	NS	Z
	Z	NS	Z	PS
	P	Z	PS	PM

Nas saídas, as letras N, Z e P representam Negativo, Zero e Positivo, enquanto as letras S e M representam “Small” e “Medium”. Existem ainda saídas com B, de “Big”, e SZ, de “Small-Zero”, presentes em outras partes dos mapas. Os valores designados para cada conjunto de saída é apresentado na Fig.(6). O resultado da defuzzificação é dado pela média dos valores de saída, ponderados pelos graus de pertinência de cada conjunto. Como mais de uma regra pode apontar para um mesmo conjunto de saída, adota-se o valor máximo dentre as regras que incidem num conjunto.

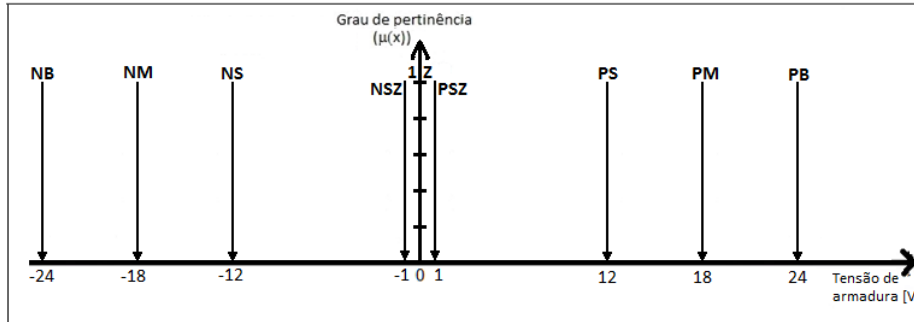


Figura 6. Representação dos valores para as saídas de controle

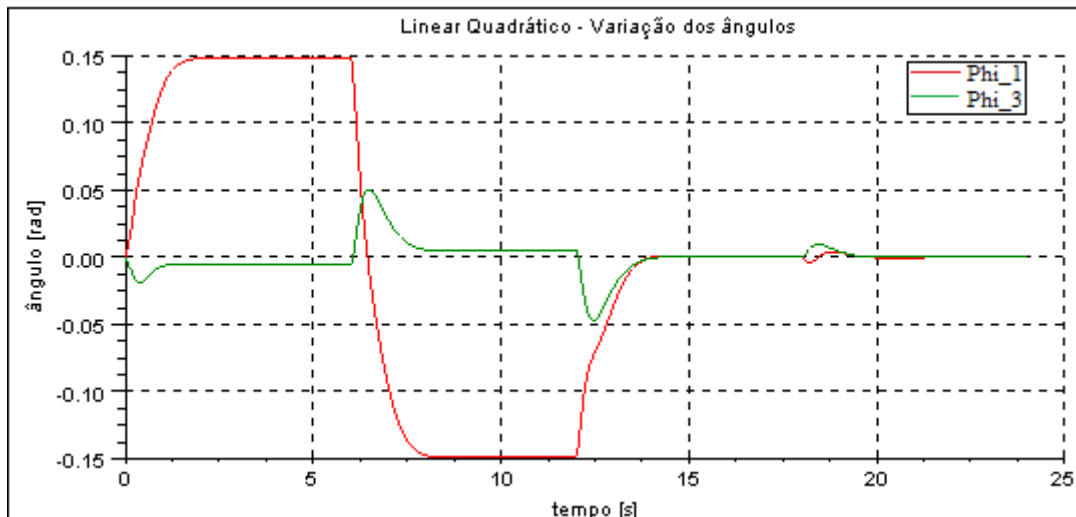
Cada roda possui mais 8 tabelas nesse formato, totalizando 81 regras de inferência para cada. Estes seguem uma disposição similar, mas variam “positivamente” com ϕ_3 (se ϕ_3 é positivo, as saídas migram para o lado positivo, e vice-versa) para ambas as rodas; a roda direita varia “negativamente” com $(\dot{\alpha}_D - \dot{\alpha}_E - 2h)$, enquanto a esquerda varia “positivamente”. Isso porque um valor positivo de h deve acelerar a roda direita em relação à esquerda.

4.3 Resultados

Para testar o desempenho do algoritmo de controle, foram usados os seguintes sinais de entrada:

$$M_1 = \begin{cases} 5 \text{ N.m,} & \text{se } 0s \leq t \leq 6s \\ -5 \text{ N.m,} & \text{se } 6s < t \leq 12s \\ 0 \text{ N.m,} & \text{se } t > 12s \end{cases}, h = \begin{cases} 0 \text{ rad/s,} & \text{se } 0s \leq t \leq 3s \\ 1 \text{ rad/s,} & \text{se } 3s < t \leq 9s \\ 0 \text{ rad/s,} & \text{se } 9s < t \leq 15s \\ -1 \text{ rad/s,} & \text{se } 15s < t \leq 21s \\ 0 \text{ rad/s,} & \text{se } t > 21s \end{cases}, f = \begin{cases} 0 \text{ rad/s,} & \text{se } 0 \leq t \leq 6s \\ 3 \text{ rad/s,} & \text{se } 6 < t \leq 12s \\ -1 \text{ rad/s,} & \text{se } 12s < t \leq 18s \\ 0 \text{ rad/s,} & \text{se } 18s < t \end{cases}$$

Os gráficos a seguir mostram os resultados obtidos

Figura 7. Gráficos dos ângulos ϕ_1 e ϕ_3 do controle LQR

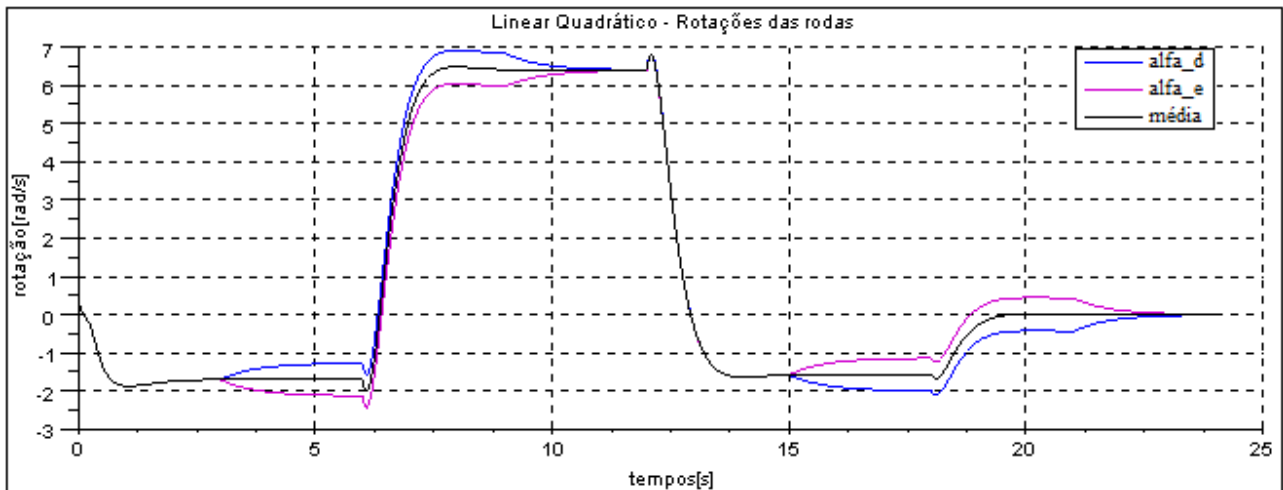


Figura 8. Gráfico das velocidades angulares das rodas no controle LQR

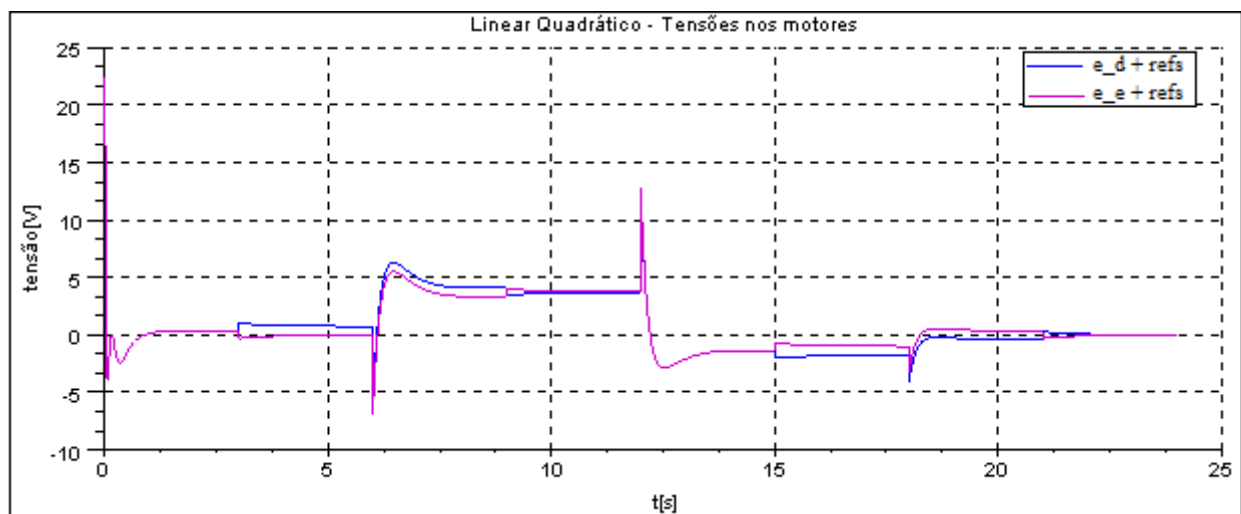


Figura 9. Gráfico das tensões nos motores no controle LQR

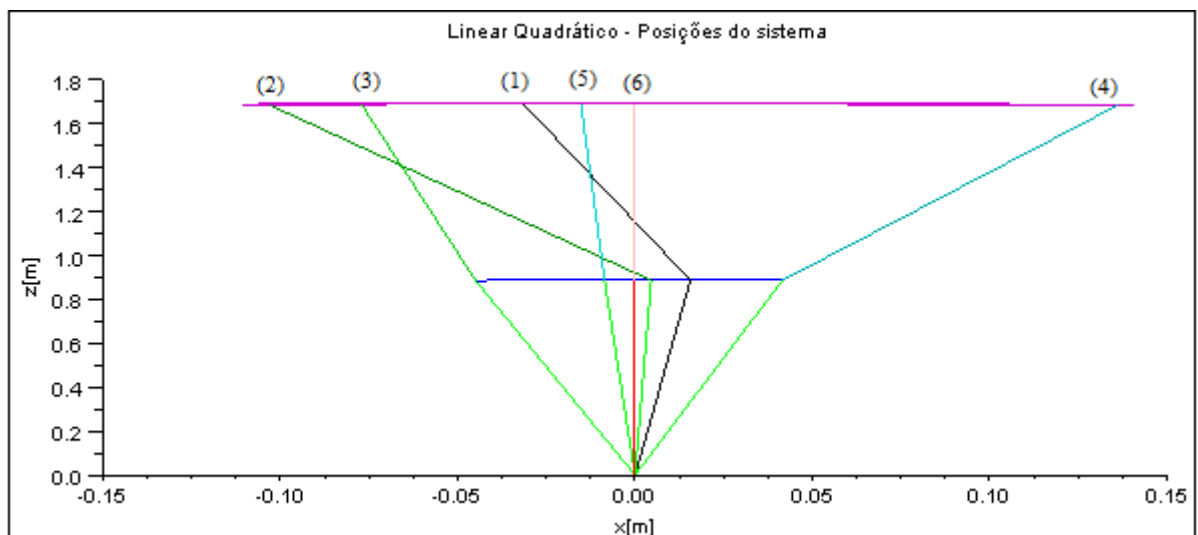


Figura 10. Posições assumidas pelo sistema (a origem é o centro de massa 3), no controle LQR

As Fig.(7) a (9) mostram os valores das grandezas variando no tempo quando da aplicação do controle LQR. Já a Fig.(10) mostra algumas das posições assumidas pelo usuário em diferentes instantes: (1) - $t=0,50s$; (2) - $t=1,25s$; (3) - $t=6,50s$; (4) - $t=12,50s$; (5) - $t=18,40s$; (6) - $t=24,0s$.

A linha aproximadamente horizontal no topo representa as posições do topo da cabeça do usuário. A linha horizontal no meio representa as posições de seu quadril. As retas ligando a origem à linha do quadril representam o elo 2, enquanto as retas entre a linha do quadril e a da cabeça representam o elo 1. Nesta representação, os ângulos são

positivos no sentido anti-horário, e o sentido positivo de x é da direita para esquerda. As escalas de x e z são diferentes, para dar destaque aos valores de x , que são bem menores (da ordem de centímetros).

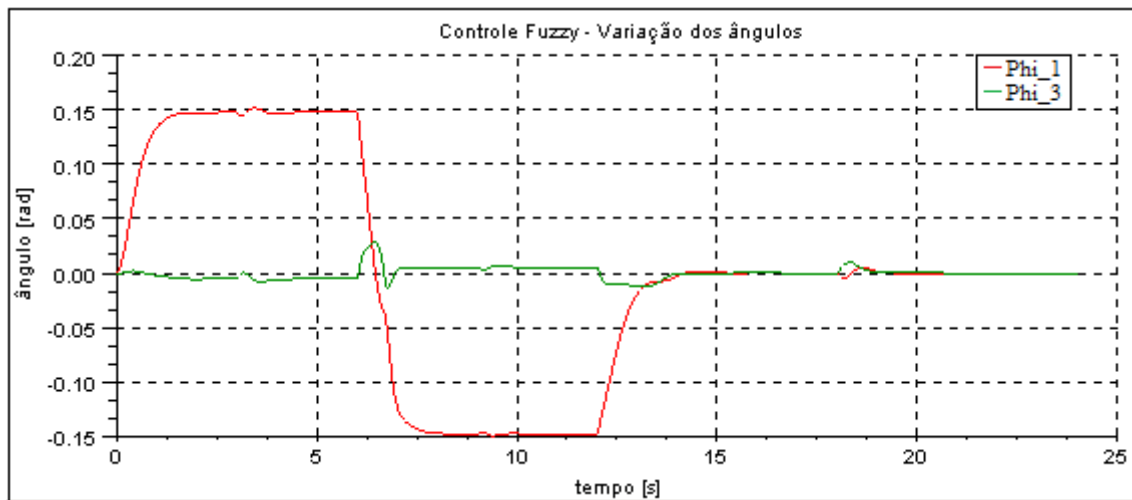


Figura 11. Gráficos dos ângulos ϕ_1 e ϕ_3 do controle fuzzy

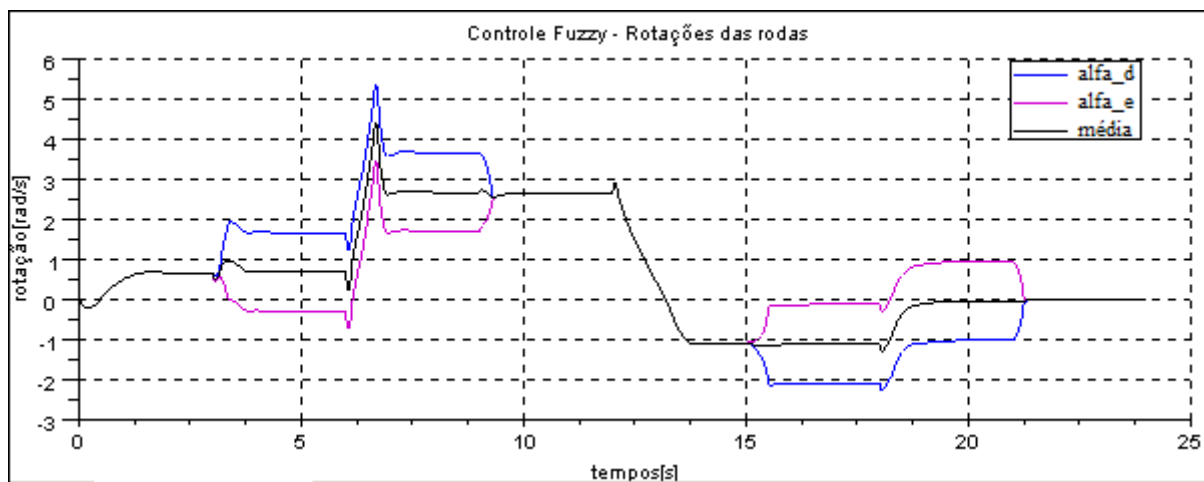


Figura 12. Gráfico das velocidades angulares das rodas no controle fuzzy



Figura 13. Gráfico das tensões nos motores no controle fuzzy

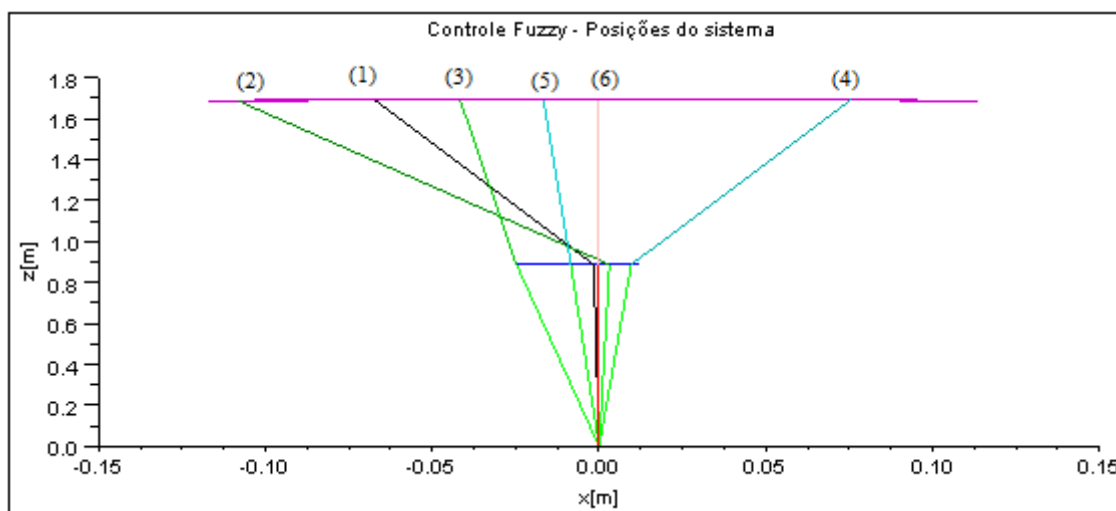


Figura 14. Posições assumidas pelo sistema (a origem é o centro de massa 3), no controle fuzzy

As Fig.(11) a (13) mostram os valores das grandezas variando no tempo quando da aplicação do controle fuzzy. Já a Fig.(14) mostra algumas das posições assumidas pelo usuário em diferentes instantes: (1) - $t=0,50s$; (2) - $t=1,25s$; (3) - $t=6,50s$; (4) - $t=12,50s$; (5) - $t=18,40s$; (6) - $t=24,0s$.

As linhas da Fig.(14) seguem o mesmo padrão de representação da Fig.(10)

Foram feitos testes com valores mais altos de M_1 , aplicados como degrau, com ambos os sistemas de controle, para averiguar até que ponto a estabilidade é mantida. O controle LQR consegue manter o equilíbrio com M_1 de até $30N.m$, ao passo que o controle fuzzy desestabiliza com M_1 de $8 N.m$.

Também foram feitos testes variando parâmetros do usuário, para simular diferentes pessoas usando o aparelho, mas mantendo exatamente o mesmo algoritmo sintonizado para usuário mediano. Foram utilizados um modelo mais alto, com comprimentos multiplicados por fator 1,2, e um mais baixo, com multiplicação por fator 0,8. As massas foram multiplicadas pelo quadrado desses fatores, as constantes de rigidez e de amortecimento do quadril e o momento M_1 foram multiplicados pelos fatores ao cubo, e os momentos de inércia foram multiplicados pelos fatores elevados à quarta potência. Isso foi feito para se manter o índice de massa corporal constante, o equilíbrio e amortecimento do quadril similares aos do usuário médio, e as inércias proporcionais às demais grandezas. Manteve-se os sinais h e f iguais aos apresentados na página 6 deste artigo.

Os resultados dos testes com parâmetros diferentes forneceram gráficos com mesmo aspecto dos aqui apresentados, com algumas diferenças de tempo de reação e alguma flutuação da velocidade no caso de usuário mais alto usando controle fuzzy.

5. Conclusões

Tanto o controle LQR como o difuso foram capazes de controlar o sistema não apenas com usuário médio, para o qual foi feita sintonia, mas também para usuários maiores e menores. A simulação do controle LQR foi útil para obter informações que auxiliaram na criação das regras de controle difuso.

Embora o controle LQR tenha se mostrado mais lento para responder aos comandos de curva (h), ele apresentou resultados mais suaves, com menos sobressinais do que o controle fuzzy.

Os dois métodos de controle mostraram comportamentos diferentes diante da inclinação do tronco do usuário, representado pela entrada M_1 : quando $M_1 > 0$ (usuário se inclinando para frente), o controle LQR faz com que o veículo ande para trás, ao passo que o controle fuzzy primeiro impõe um deslocamento para trás, para depois avançar para frente – ver Fig.(8) e Fig.(12), no trecho $0s < t < 3s$, enquanto os demais sinais são nulos. Isso pode ter influenciado na tolerância à magnitude de M_1 , que é menor no caso do fuzzy.

Todas as simulações mostraram que o controle difuso usado tem transições bruscas das ações de controle (picos de tensão). Além disso, alterações abruptas do comando de curvas (h) causam flutuações na velocidade de avanço, e uma variação abrupta dos sinais M_1 e f simultaneamente produz um sobressinal na velocidade.

É possível que o refinamento da fuzzificação das variáveis de condição, valores de saída distintos e/ou um método de defuzzificação diferente fornecessem resultados mais próximos do ideal de conforto e segurança.

Como o modelo utilizado agrega numerosas simplificações, tanto da dinâmica dos corpos como do comportamento de uma pessoa montada no veículo, a viabilidade de tal sistema precisa ser verificada com modelos mais completos que considerassem as não linearidades do sistema, um modelo mais realista de uma pessoa, ruídos, características do hardware de sensoriamento e processamento, entre outros. Então, poderiam ser realizados experimentos com pessoas reais e protótipos, procurando atender a critérios de conforto e segurança. O desempenho frente a ladeiras e terreno irregular também precisaria ser estudado.

6. Referências

- HANAVAN JR., E.P., 1964, “A mathematical model of the human body”, Behavioral Sciences Laboratory, Aerospace Medical Research Laboratories, Aerospace Medical Division, Air Force Systems Command, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio
- PAQUET, V. e FEATHERS, D., 2004, “An anthropometric study of manual and powered wheelchair users”, International Journal of Industrial Ergonomics 33, págs. 191-204
- SIMÕES, M.G., SHAW, I.S., 2007, “Controle e modelagem fuzzy”, São Paulo, Editora Blucher, FAPESP

7. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

CONTROL DESIGN OF A TWO-WHEEL ELECTRIC VEHICLE FOR PARAPLEGICS USING FUZZY LOGIC

Gabriel Kimito Kiyohara

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Mechanical Engineering Department
e-mail: gabriel_kimito@yahoo.com.br

Abstract. This is a study of modeling and control of a self-balancing vehicle suited for paraplegic users. First, there is the physical and mathematical modeling of the system formed by the vehicle and the user riding it. Then, in order to control it, there is the project of a fuzzy control algorithm, tuned through numerical simulations. Tests with LQR control and different parameter sets were also used to study the fuzzy algorithm's performance.

Keywords. Data Modeling, Fuzzy Logic.