

4 Simulação

A simulação do TPPE teve como principal objetivo estudar e testar o desempenho dos algoritmos de controle PID, Fuzzy e Robusto em malha fechada, descritos no Capítulo 3, que utilizaram o modelo matemático desenvolvido no Capítulo 2. Em toda a programação, foi utilizado o ambiente Matlab, no qual foram utilizadas algumas de suas funções como a ODE45, que permite resolver equações diferenciais com integrações numéricas de quarta e quinta ordem.

As rotinas programadas estão divididas em três arquivos:

- *Modelo*, onde se têm os parâmetros do TPPE e dos motores utilizados, as equações dinâmicas do TPPE e também dos motores, tudo dentro de uma função usada para fazer a integração numérica das equações dinâmicas.
- *Algoritmo de controle*, no qual se tem o programa dos controles PID, Fuzzy e Robusto.
- *Teste*, no qual se têm as condições de operação do sistema, ou seja, tempo e condições iniciais, além das linhas de código para a geração dos gráficos das respostas e da função que inicia a integração numérica do modelo implementado.
- *Visualização 3D*, onde se faz um desenho em três dimensões do sistema para se poder observar o desempenho dos algoritmos desenvolvidos (vide Figura 18).

Na Tabela IV têm-se os valores dos parâmetros do sistema utilizados no processo de simulação.

Tabela IV - Valores dos parâmetros do sistema utilizados no processo de simulação

Parâmetro	Descrição	Valor
D	Comprimento da haste	0,84 m
L	Metade da largura da base	0,83 m

R	Raio da roda	0,15 m
I3	Momento de inércia em relação ao eixo das rodas	1,0759 kg m ²
I2	Momento de inércia perpendicular ao eixo das rodas	2,0573 kg m ²
G	Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²
m _c	Massa da roda	3,8 kg
m _s	Massa da estrutura	42,2 kg
V _{max}	Tensão elétrica máxima de alimentação do motor	24 V
K _m	Constante de torque contra-eletromotriz	10 N.m/A
R _{motor}	Resistência de circuito de armadura	0.16 (Ω)
K _w	Constante de força contra-eletromotriz	0,98 RPM/A
J	Momento de inércia de carga	0,099 Kgm ²
B	Coefficiente de atrito viscoso	0,1 kgm/(rad/s)
L _a	Indutância do circuito de armadura	0,005 mH

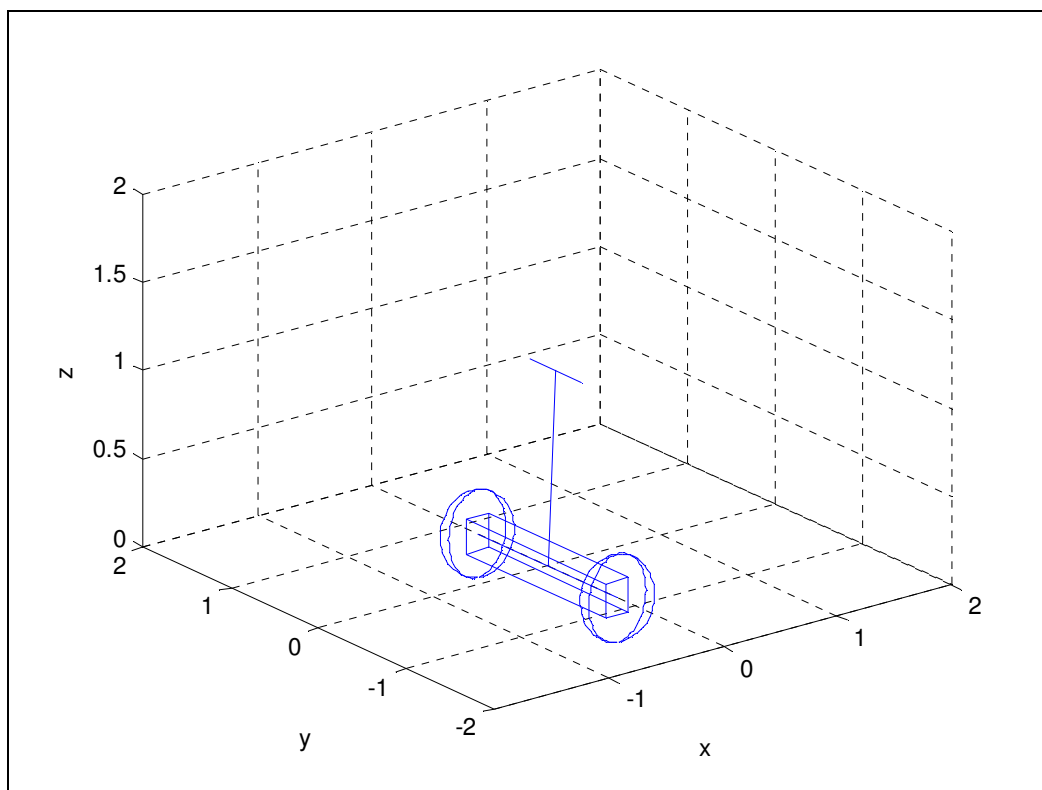


Figura 18: Desenho simplificado utilizado para a simulação 3D

4.1 Resultados da Simulação sem Controle

Nesta seção, se apresentam os resultados das simulações sem a ação de um controlador nem usuário, assim também sem torque de parte dos motores ($pwm=0$), de acordo com o esquema mostrado na Figura 19.

Na Figura 20, se apresenta a resposta sem controle, sem usuário, e sem torque nos motores, assim também sem atrito nem amortecedor para um ângulo inicial de 10 graus, onde se pode observar uma oscilação contínua.

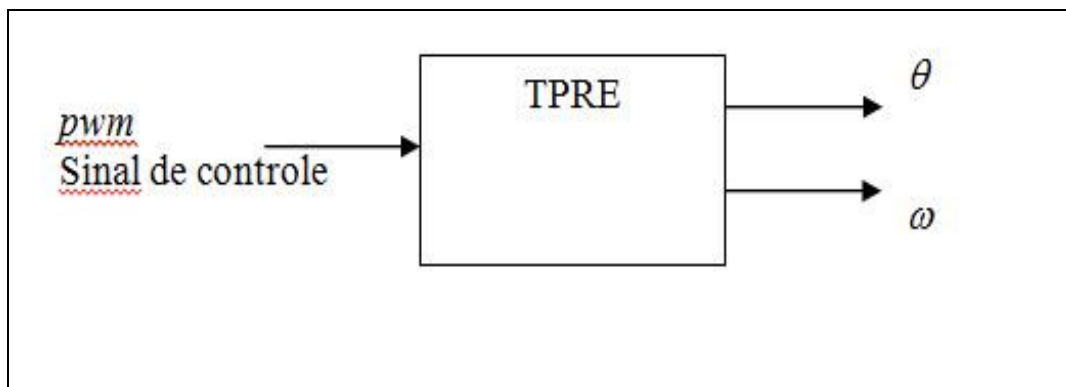


Figura 19: Diagrama de bloco sem nenhum controlador

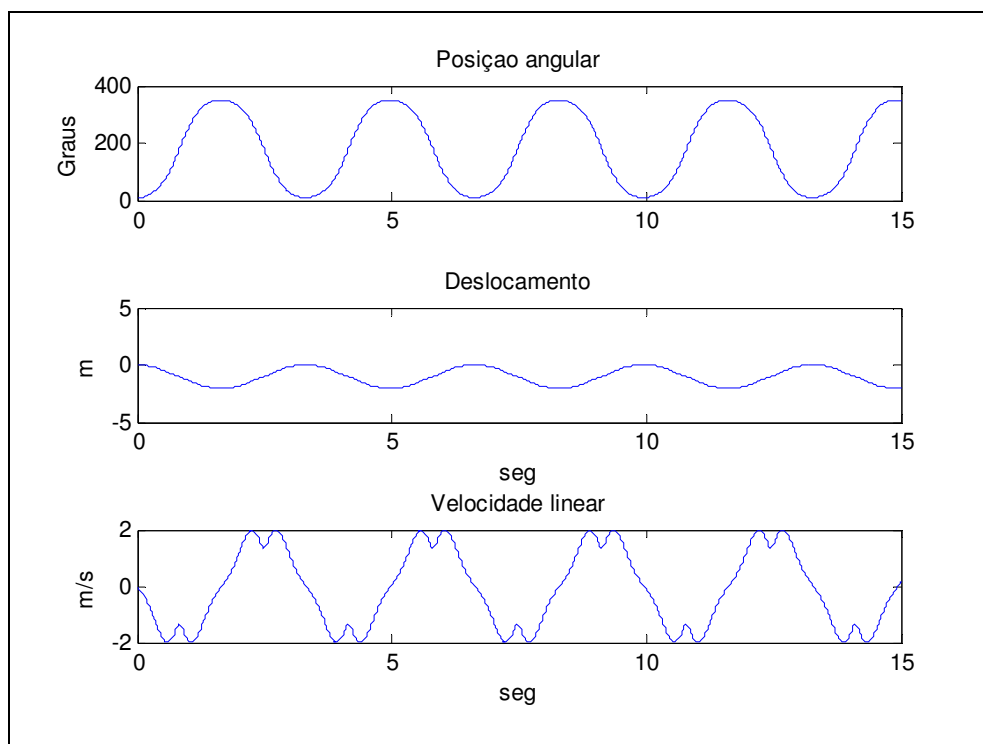


Figura 20: Resposta para o sistema sem ação de controle, sem usuário e sem atrito.

Na Figura 21, se apresenta a resposta sem controle, sem usuário, e sem torque nos motores, neste caso está se considerando o atrito e amortecedor para um ângulo inicial de 10 graus, onde se pode observar uma oscilação contínua que vai amortecendo até atingir o valor de zero.

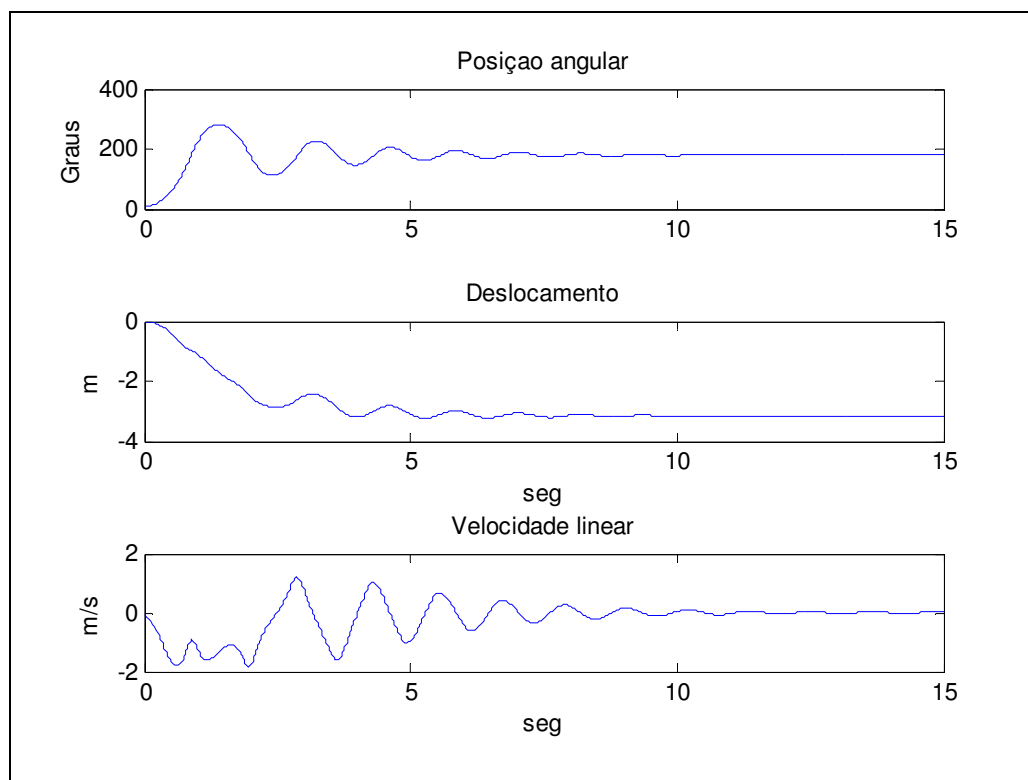


Figura 21: Resposta para o sistema sem ação de controle e com atrito.

4.2 Resultados da Simulação do Controle PID

Para o processo de sintonia dos parâmetros, se fizeram os seguintes passos baseados no método de Sensibilidade Limite ou Segundo Método de Ziegler-Nichols [22]:

- Inicializar os valores de $K_p = 0.1$, $K_d = 0$ e finalmente $K_i = 0$, e observar a resposta do sistema; aumentar gradativamente o valor de K_p , mantendo K_d e K_i iguais a zero, até atingir um tempo de resposta satisfatório.
- Logo depois de sintonizar o K_p , ele é reduzido seu valor em 10%, então começa o processo de sintonizar K_i , inicializando com o valor de 0.1. O

valor é aumentado até atingir erro zero em um tempo de acomodação satisfatório, mantendo K_d igual a zero.

- Depois de sintonizar K_p e K_i , começa o processo de sintonizar o K_d . Para isto, K_p é acrescentado em 20% e K_i reduzido em 50%, e o valor de K_d é aumentado até eliminar as oscilações.

4.2.1

Resultados da Simulação do Controle PID sem Usuário

Na Figura 22, pode-se observar o diagrama de blocos para a simulação do TPRE sem considerar a usuário dirigindo. As entradas de referência são a posição angular e a velocidade angular, dados por θ_{ref} e ω_{ref} , respectivamente.

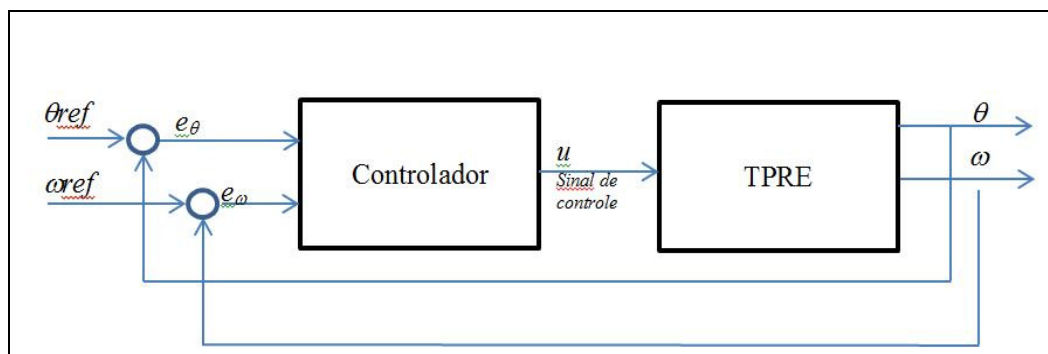


Figura 22: Diagrama de blocos para o controle do TPRE sem usuário.

Para os parâmetros de controle $K_p = 10 \text{ V/rad}$, $K_d = 1 \text{ V/rad/s}$ e $K_i = 0.2 \text{ V/rad.seg}$, massa de 40kg (ou seja, considerando somente a massa da estrutura sem usuário), os primeiros 2 segundos de simulação são apresentados a seguir.

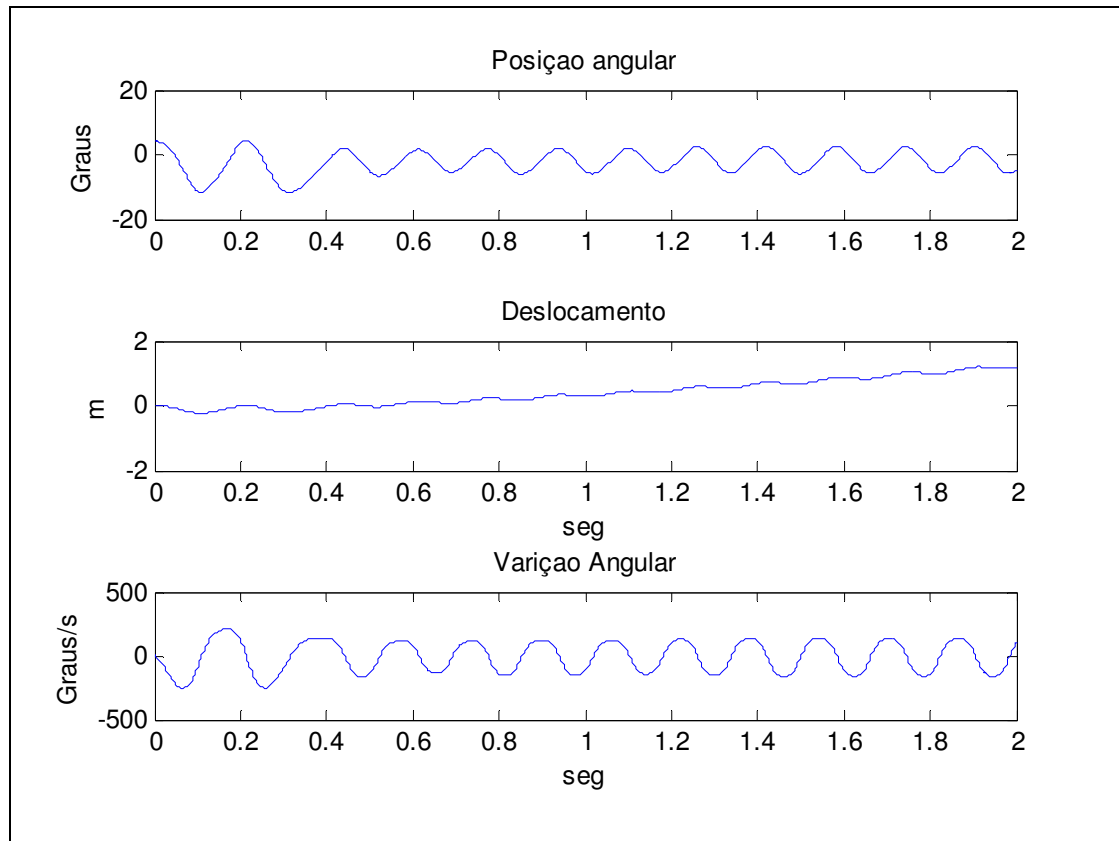


Figura 23: Resposta para um controle PID da posição angular, mostrando o deslocamento do veículo e a variação (velocidade) angular

Na Figura 23 se pode observar uma oscilação significativa, porém estável, com um período de 0,2s. No caso do deslocamento, pode-se observar uma pequena oscilação. No caso da velocidade angular, pode-se observar uma oscilação constante ao longo do tempo com um período de 0,2s.

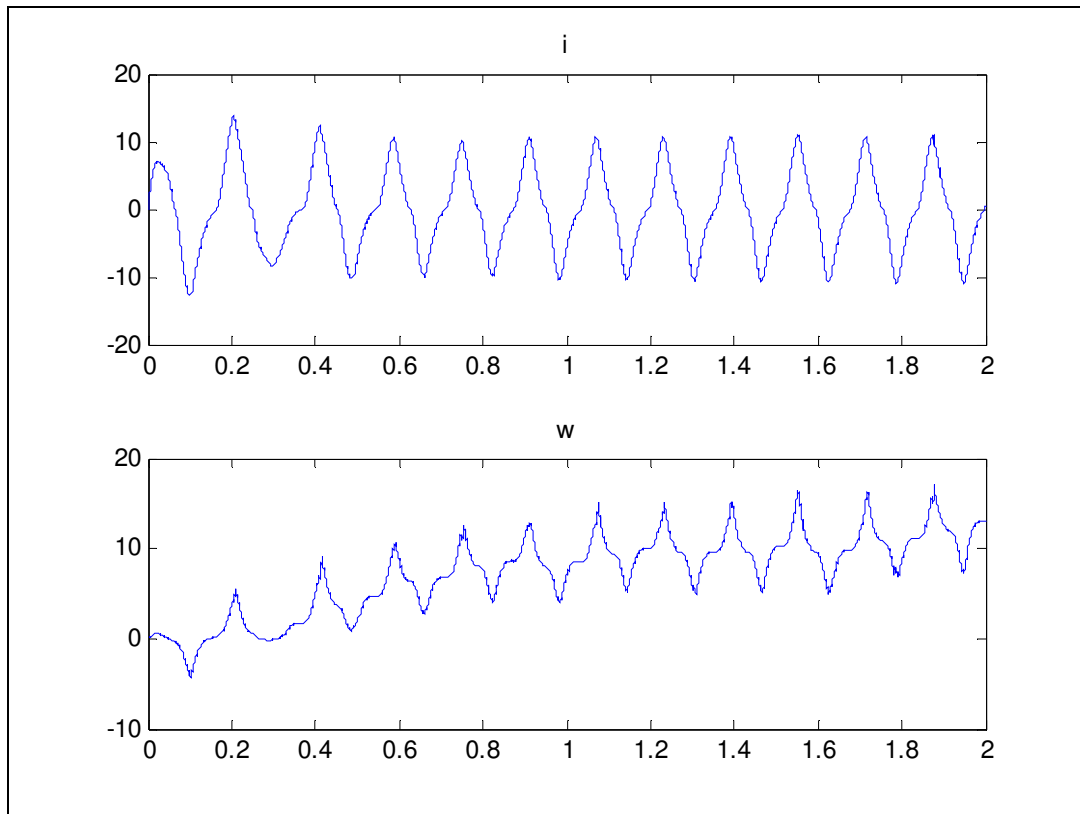


Figura 24: Resposta para um controle PID mostrando a corrente i do motor e a velocidade angular w das rodas.

Na Figura 24 se pode observar uma oscilação significativa na corrente com um período de 1.1s. e com picos ao longo do tempo, também pode-se observar que os valores não atingem valores perigosos para o motor. No caso da velocidade angular da roda também se pode observar uma oscilação, mas com um deslocamento linear que indica que o TPRE está avançando ao longo do tempo.

4.2.2

Resultados da Simulação do Controle PID em malha fechada com usuário

Na Figura 25, pode-se observar o diagrama de blocos para a simulação do TPRE considerando um usuário dirigindo o sistema. A entrada de referencia é velocidade linear do sistema dx_{ref}/dt .

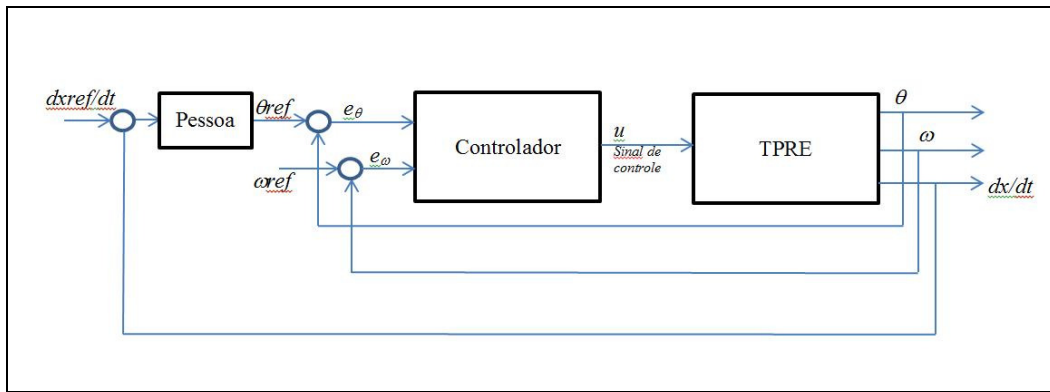


Figura 25: Diagrama de blocos para o controle do TPRE considerando um usuário dirigindo.

A Figura 26 mostra o resultado da simulação com um tempo de simulação de 30 segundos, para uma velocidade de referência de 1m/s. O erro de velocidade linear é em torno de 0,1m/s, ao longo do tempo, com um tempo de estabilização de 4,5 segundos mas com uma oscilação contínua com amplitude de 0.1m/s. No caso da posição angular, pode-se notar que há uma oscilação inicial que, depois de 4,5 segundos, se estabiliza, mas mesmo assim não converge ao valor estável. No caso do deslocamento, a resposta é estável e contínua ao longo do tempo.

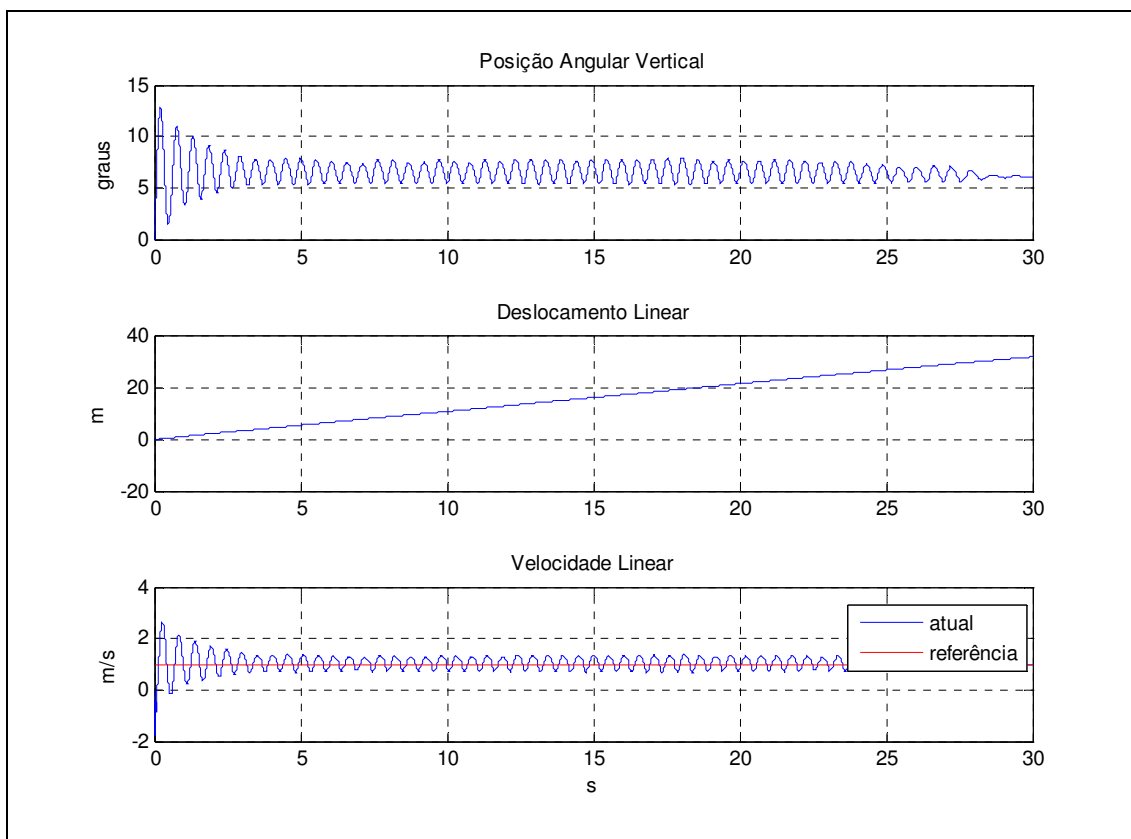


Figura 26: Resposta para um controle PID de posição angular, deslocamento e a velocidade linear em uma malha fechada com a usuário, para uma velocidade linear de referência de 1m/s.

Pode-se observar na Figura 27 o resultado de uma simulação de 30 segundos para uma velocidade de referência de 2m/s. Nesta, o erro de velocidade linear é em torno de 0,1m/s ao longo do tempo, com um tempo de estabilização de 3 segundos, mas com uma oscilação contínua com amplitude de 0.1m/s. No caso da posição angular pode se notar que existe uma oscilação inicial que depois de 4,5 segundos se estabiliza, mas mesmo assim não converge ao valor estável. No caso do deslocamento, a resposta é estável e contínua, ao longo do tempo.

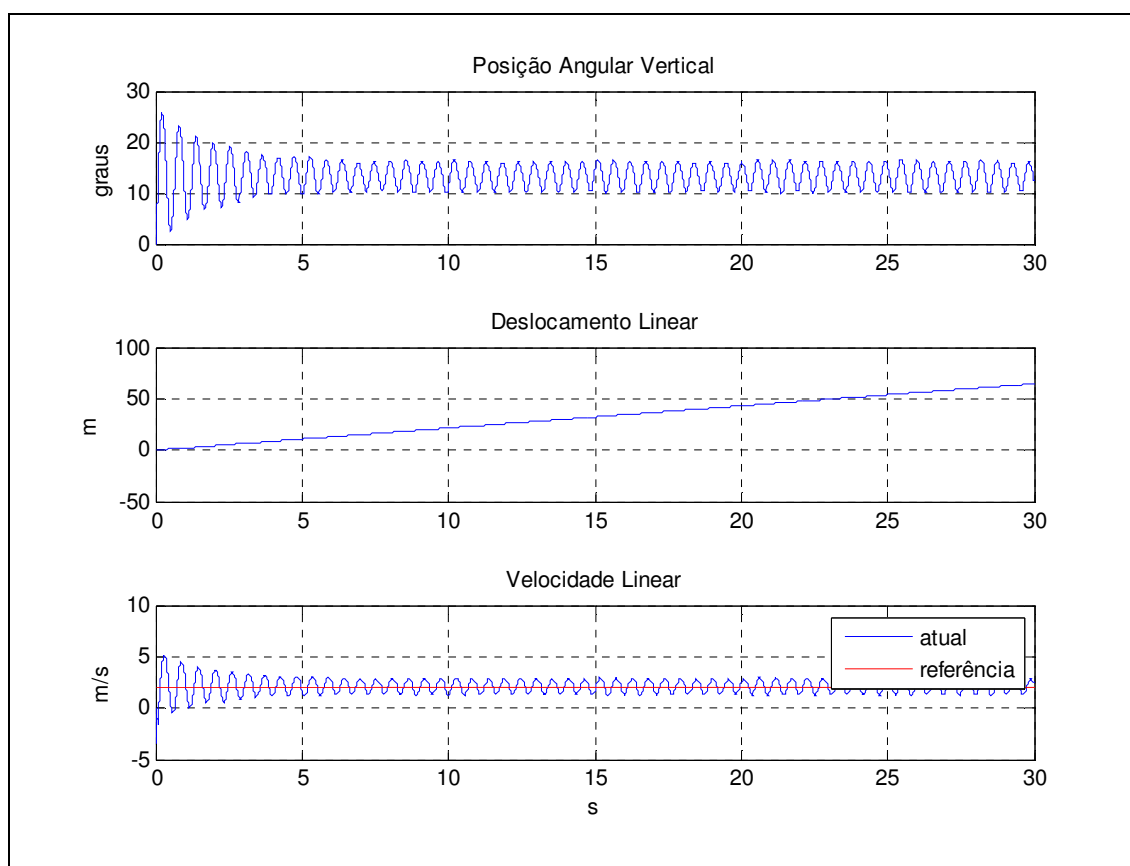


Figura 27: Resposta para um controle PID da posição angular, deslocamento e a velocidade linear em uma malha fechada com o usuário para uma velocidade linear de referência de 2m/s.

4.3

Resultados da Simulação do Controle Fuzzy

As simulações com o controle Fuzzy utilizaram os parâmetros:

$u_{ang} = 80$: Limite de universo de discurso para a posição angular

$u_{vel} = 0.1$: Limite de universo de discurso para a variação da posição angular

$u_{sal} = 100$: Limite de universo de discurso para a saída de controle

O universo discreto e normalizado para a posição angular é

$$ce=[-1 \ -0.8 \ -0.6 \ -0.4 \ -0.2 \ 0 \ 0.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1] \cdot (u_{ang})$$

e o universo discreto e normalizado para a variação da posição angular:

$$cc=[-1 \ -0.6 \ -0.3 \ -0.15 \ -0.1 \ 0 \ 0.15 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.6 \ 1] \cdot (u_{vel})$$

O conjunto de regras de decisão 11x11 é dado por

$$rules = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,8 & 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,8 & 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0,8 & 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 \\ 1 & 1 & 1 & 0,8 & 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 \\ 1 & 1 & 0,8 & 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 & -0,8 \\ 1 & 0,8 & 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 & -0,8 & -1 \\ 0,8 & 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 & -0,8 & -1 & -1 \\ 0,6 & 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 & -0,8 & -1 & -1 & -1 \\ 0,2 & 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 & -0,8 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0,1 & 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 & -0,8 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -0,1 & -0,2 & -0,6 & -0,8 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} u_{sal}$$

4.3.1

Resultados da Simulação do Controle Fuzzy sem Usuário

Na Figura 28, pode-se observar o diagrama de blocos para a simulação do TPRE sem considerar a usuário dirigindo, onde as entradas de referencia são a posição angular e a velocidade angular iguais ao zero.

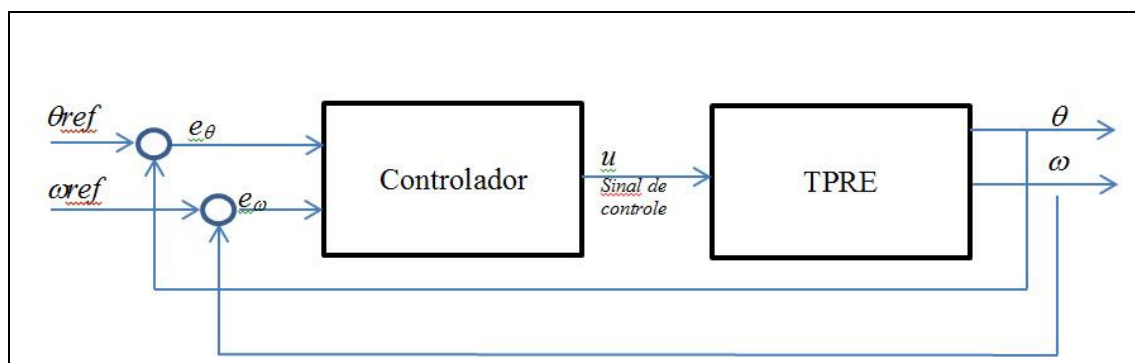


Figura 28: Diagrama de blocos para o controle do TPRE sem usuário.

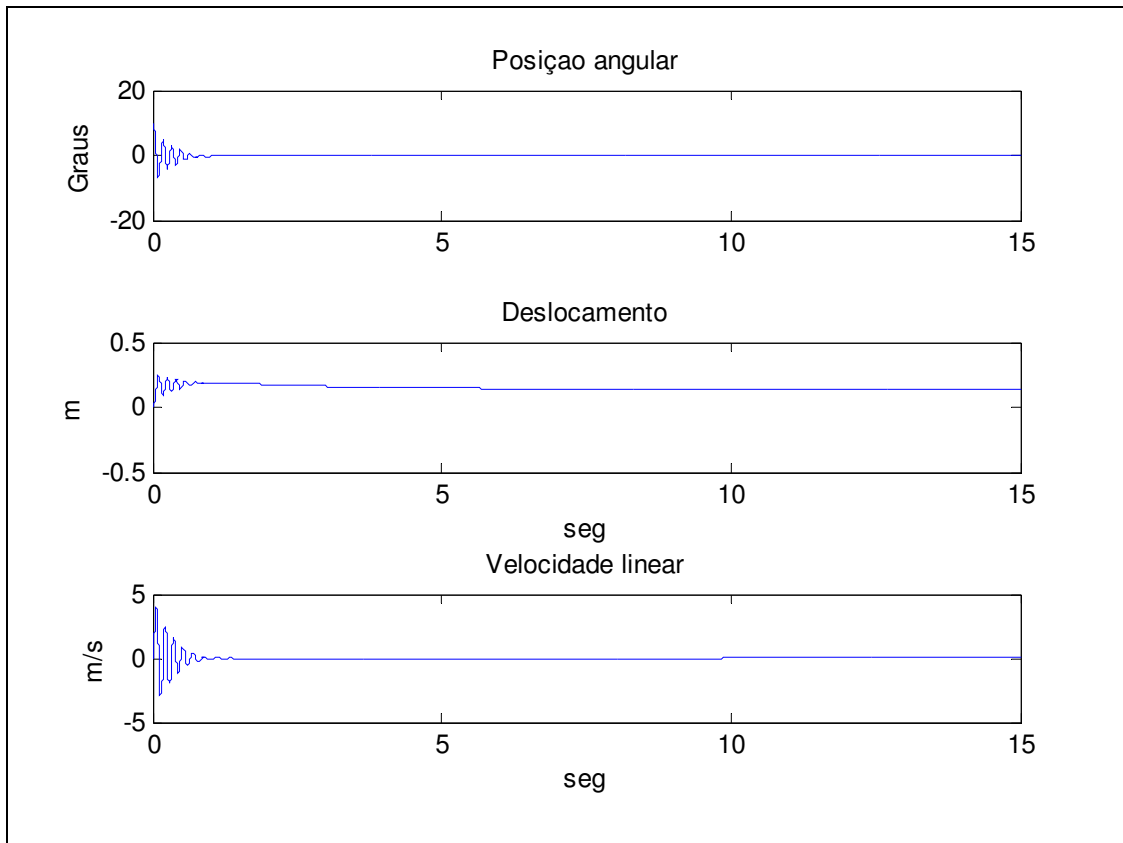


Figura 29: Resposta para um controle Fuzzy da posição angular, deslocamento e velocidade linear

Na Figura 29 se pode observar uma oscilação pouco significativa com um pico inicial de grande magnitude, porém os restantes das oscilações são bem pequenos. O tempo de estabilização é de 1 segundo aproximadamente. No caso do deslocamento linear, se pode observar uma pequena oscilação, porém pouco significativa. No caso da velocidade linear tem-se uma oscilação inicial que logo depois se estabiliza em 1,8 segundos aproximadamente.

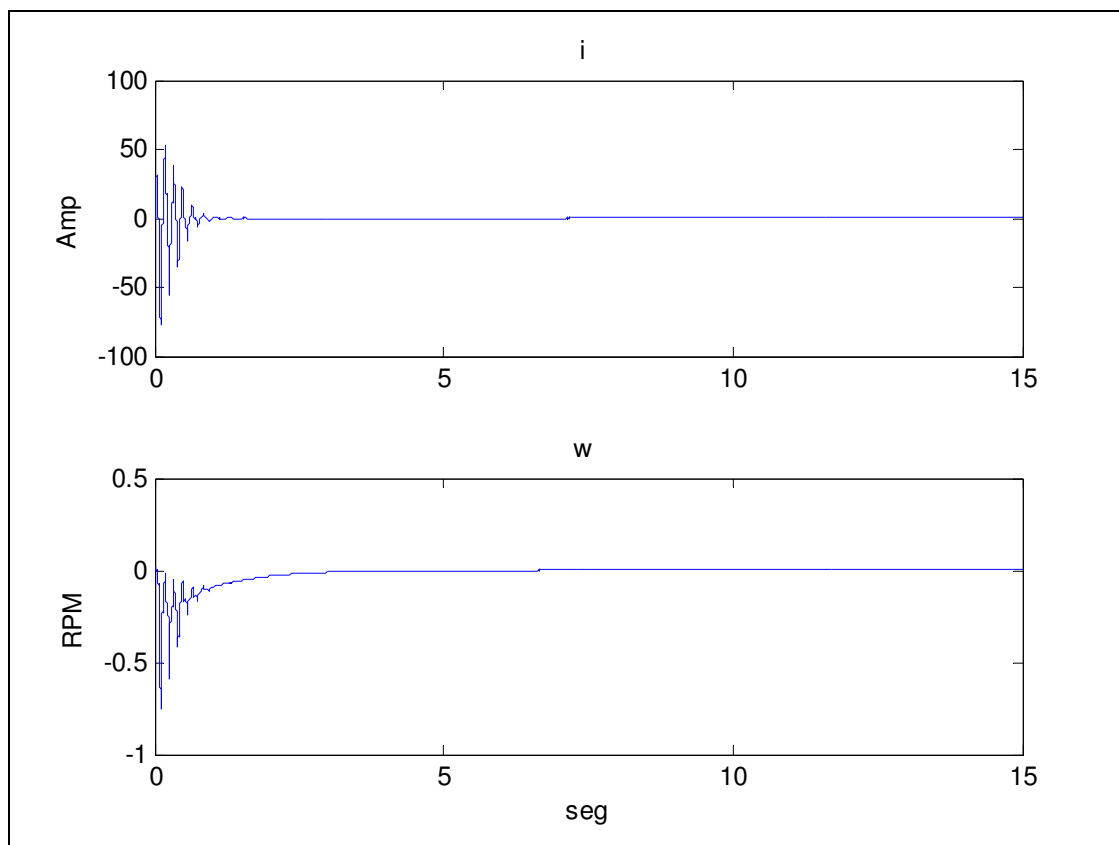


Figura 30: Resposta para um controle Fuzzy da corrente i do motor e a velocidade angular w nas rodas

Na Figura 30 se pode observar uma oscilação pouco significativa na corrente do motor, com picos iniciais de maior magnitude sem se tornar perigoso para o motor, seguido de picos menores iniciais até atingir a estabilização. No caso da velocidade angular da roda, também se pode observar uma pequena oscilação inicial que logo depois se estabiliza, mas se tem um deslocamento inicial que indica que o TPRE de deslocou uma distancia de 0,2m.

4.3.2

Resultados da Simulação do Controle Fuzzy em Malha Fechada com Usuário

Na Figura 31 se pode observar o diagrama de blocos para a simulação do TPRE considerando um usuário dirigindo o sistema., sendo a entrada de referencia a velocidade linear do sistema dx_{ref}/dt .

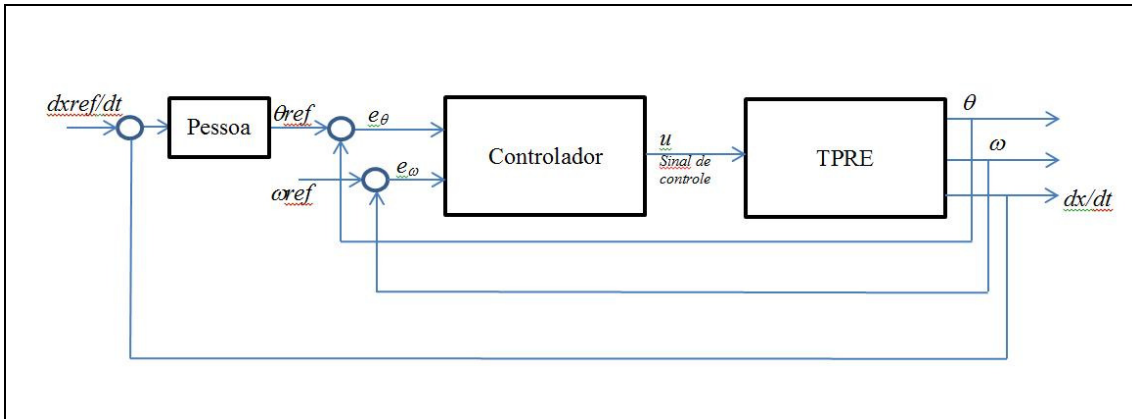


Figura 31: Diagrama de blocos para o controle do TPRE considerando um usuário dirigido.

A Figura 32 mostra uma simulação de 30 segundos para uma velocidade de referência de 1m/s. Nesta, o erro de velocidade linear é em torno de 0,01m/s, ao longo do tempo, com um tempo de estabilização de 2s. Note-se que, mesmo assim, há uma oscilação no início. No caso da posição angular, pode-se notar que há uma oscilação inicial que depois de 2.2 segundos se estabiliza. Mesmo assim, continua estável ao longo do tempo. No caso de deslocamento, a resposta é estável e contínua ao longo do tempo.

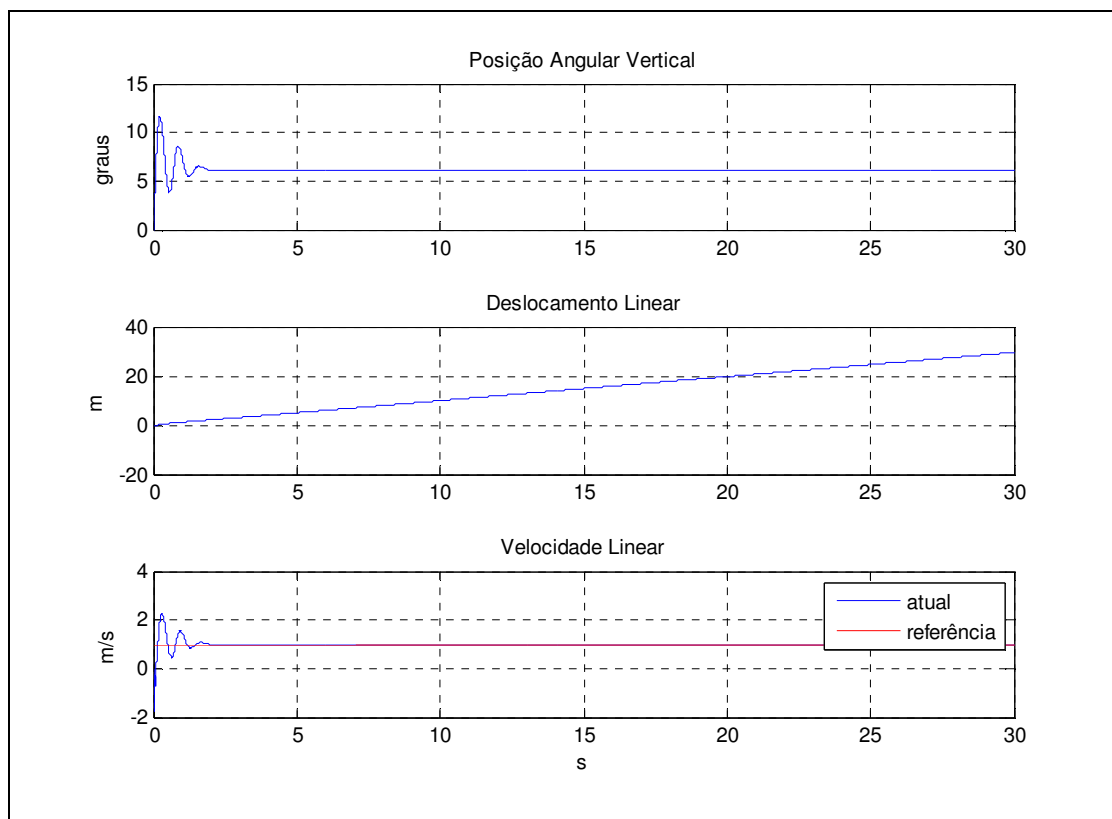


Figura 32: Resposta para um controle Fuzzy da posição angular, deslocamento e velocidade linear em uma malha fechada com o usuário para uma velocidade linear de referência de 1m/s.

A Figura 33 apresenta uma simulação de 30 segundos para uma velocidade de referência de 2m/s. Nesta, o erro de velocidade linear é em torno de 0,01m/s, ao longo do tempo, com um tempo de estabilização de 4,5 segundos. No caso da posição angular, pode-se notar que há uma oscilação inicial, que depois de 2 segundos se estabiliza e continua dessa forma ao longo do tempo. No caso do deslocamento, a resposta é estável tipo rampa, e continua assim ao longo do tempo. Note-se que há uma pequena queda de 0.1 segundo aproximadamente, no início da simulação, que seria devido à inércia do sistema.

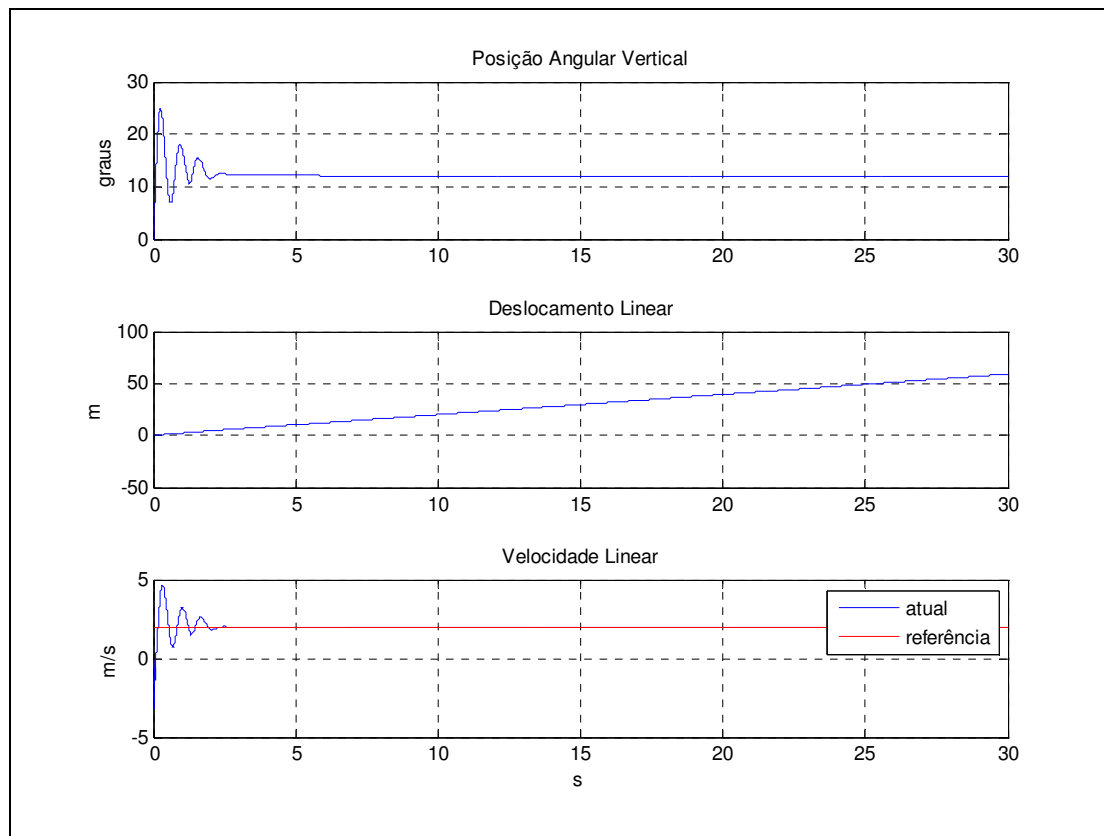


Figura 33: Resposta para um controle Fuzzy da posição angular, deslocamento e velocidade linear em uma malha fechada com o usuário para uma velocidade linear de referência de 2m/s.

4.4 Resultados da Simulação do Controle Robusto

Partindo do modelo linearizado correspondente à Equação (3.33) e da Equação do modelo não linear (2.2), tem-se

$$A = \frac{\partial \ddot{\phi}}{\partial \phi} = \frac{(m_s + 3m_c)(mgL)}{I_2 + I_3 - m^2 L^2} \quad (4.1)$$

$$B = \frac{\partial \ddot{\phi}}{\partial u} = \frac{-mL}{R(I_2 + I_3 - m^2 L^2)} \quad (4.2)$$

Logo, a partir das Equações (4.1), (3.32), e substituindo-se os valores dos parâmetros do sistema, temos

$$F = 29,99 \phi + \lambda(\dot{\phi} - \dot{\phi}_{ref}) \quad (4.3)$$

e, substituindo os valores dos parâmetros do sistema em (4.2), temos:

$$B = -0,1679 \quad (4.4)$$

Das Equações (4.3) e (4.4) temos o ganho da lei de controle:

$$K = \left| \frac{F}{B} \right| + \mu \quad (4.5)$$

Finalmente, de (4.5) e com $\lambda=0.005$ e $\mu=5$, temos a lei de controle para o sistema TPRE:

$$u = K \operatorname{sgn}(s) \quad (4.6)$$

4.4.1

Resultados da Simulação do Controle Robusto sem Usuário

Na Figura 34, pode-se observar o diagrama de blocos para a simulação do TPRE sem considerar o usuário dirigindo. As entradas de referência são a posição angular e a velocidade angular iguais a zero.

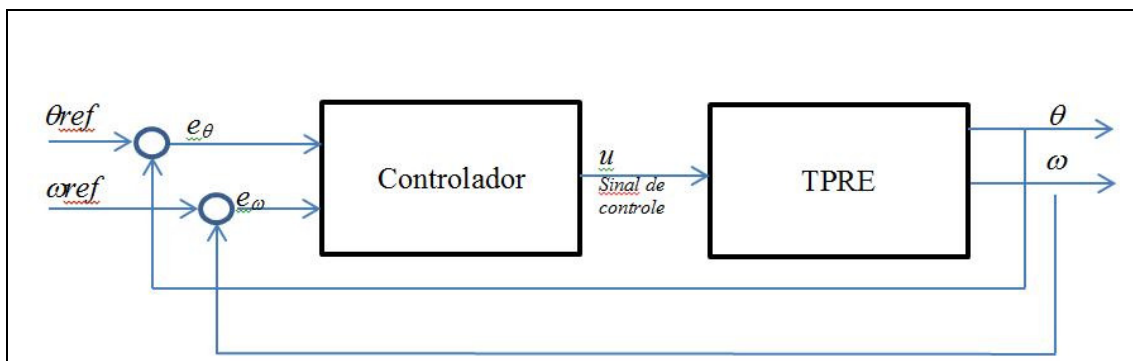


Figura 34: Diagrama de blocos para o controle do TPRE sem usuário.

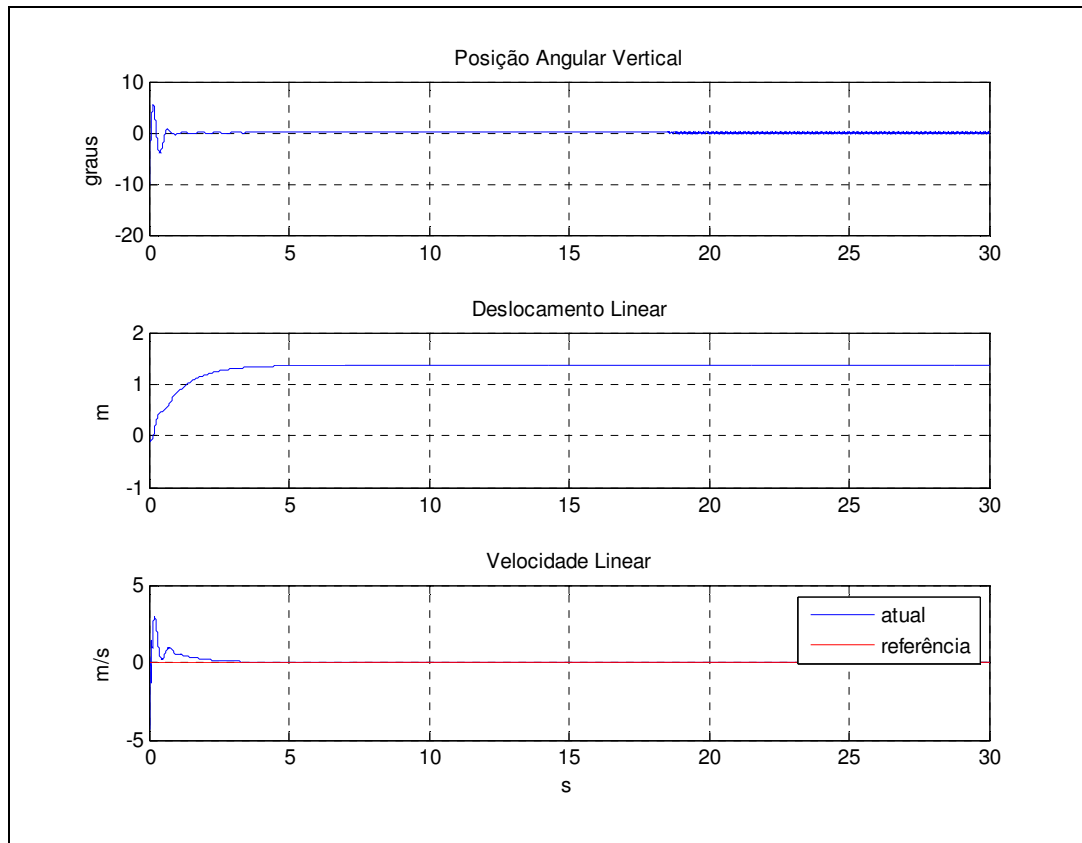


Figura 35: Resposta para um Controle Robusto da posição angular, deslocamento e velocidade linear.

Na Figura 35 se pode observar uma oscilação pouco significativa com um pico inicial de grande magnitude, mas os restantes das oscilações são bem pequenos até atingir a estabilidade. O tempo de estabilização é de 3.5 segundos. No caso do deslocamento linear, se pode observar uma pequena oscilação, porém pouco significativa. No caso da velocidade linear, se pode observar um pico inicial e uma oscilação pequena inicial que logo depois se estabiliza.

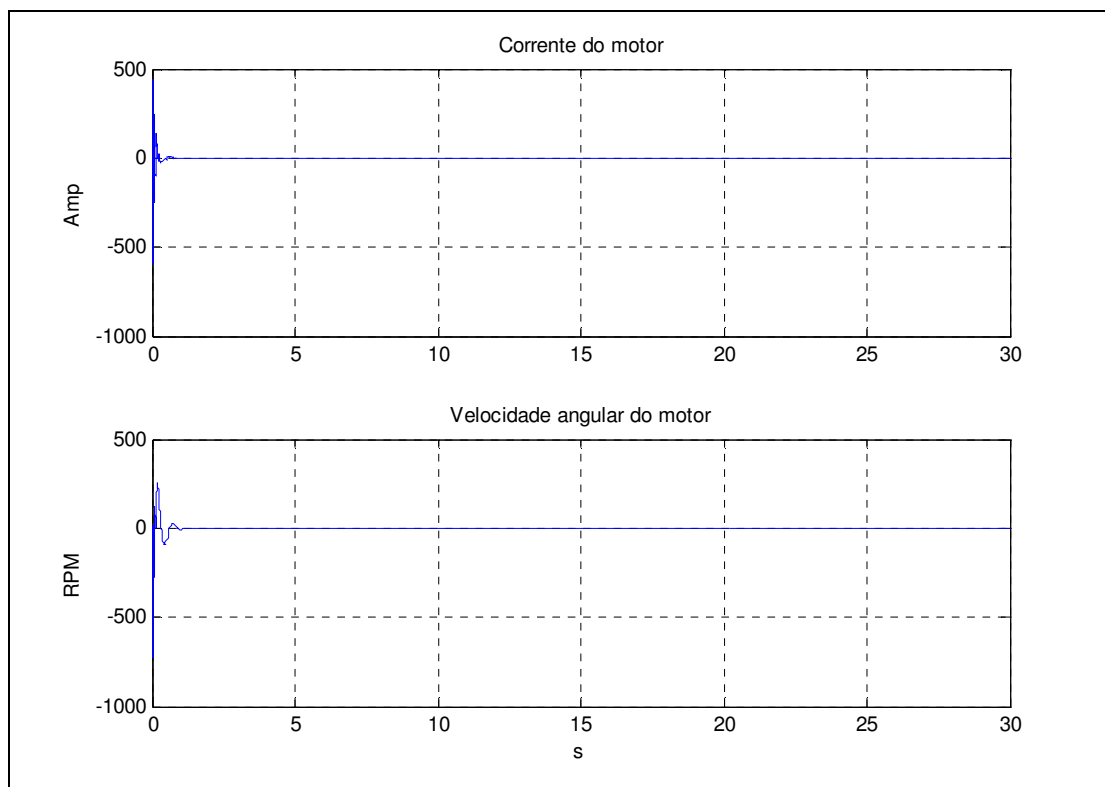


Figura 36: Resposta para um controle Robusto da corrente i do motor e da velocidade angular nas rodas.

Na Figura 36 se pode observar um pico de grande magnitude, com capacidade de estourar o motor, isto é devido à característica própria do controle que puxa o máximo que puder dos recursos, neste caso a corrente, para atingir a estabilidade, esta resposta ajuda a se reparar na colocação de limites no sinal de controle quando for feita a programação no controlador do TPPE.

4.4.2

Resultados da Simulação do Controle Robusto em malha fechada com usuário

Na Figura 37, pode-se observar o diagrama de blocos para a simulação do TPPE considerando um usuário dirigindo o sistema. A entrada de referencia é a velocidade linear do sistema dx_{ref}/dt .

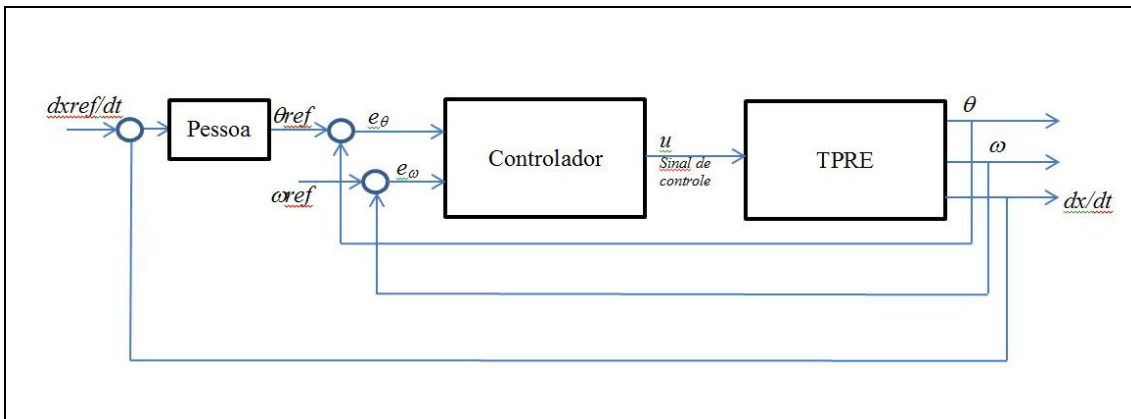


Figura 37: Diagrama de blocos para o controle do TPRE considerando uma usuário dirigido.

A Figura 38 apresenta uma simulação de 30 segundos para uma velocidade de referência de 1m/s. Nesta, o erro de velocidade linear é em torno de 0,01m/s, ao longo do tempo, com um tempo de estabilização de 2s. Note-se que, mesmo assim, há uma oscilação no início. No caso da posição angular, pode-se notar que tem uma oscilação inicial que depois de 2,2 segundos se estabiliza. Mesmo assim, continua estável ao longo do tempo. No caso de deslocamento linear, a resposta é estável e assim continua ao longo do tempo.

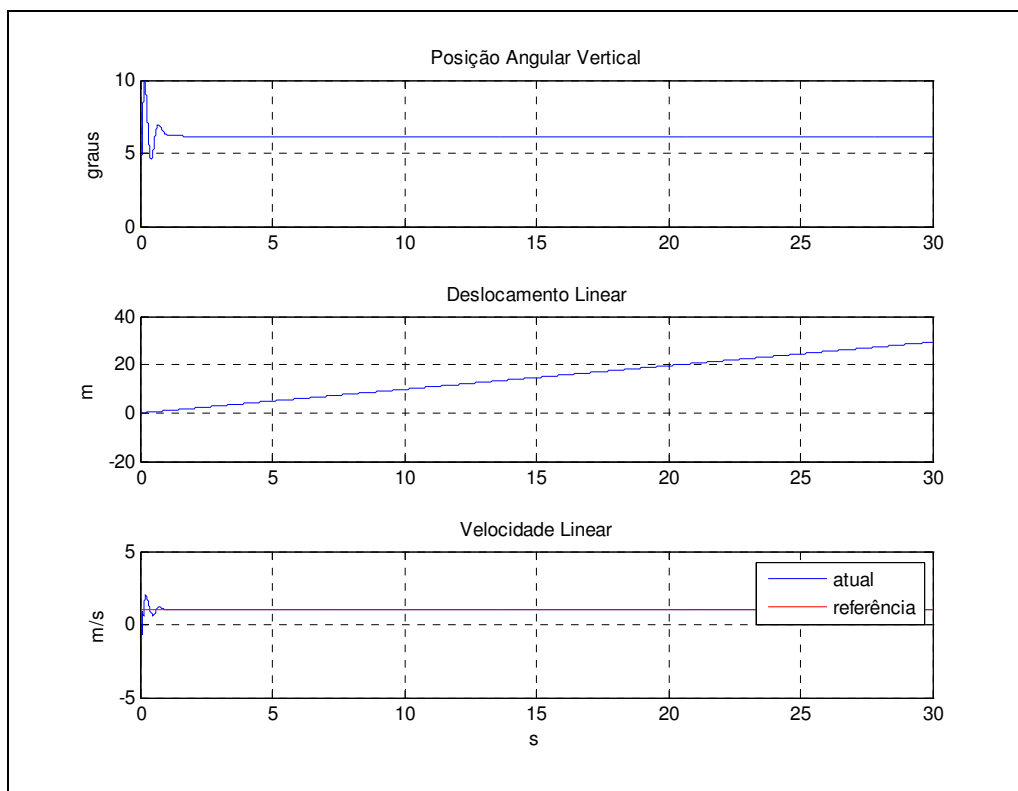


Figura 38: Resposta para um controle Robusto da posição angular, deslocamento e velocidade linear em uma malha fechada com a usuário para uma velocidade linear de referência de 1m/s.

A Figura 39 apresenta o resultado de uma simulação de 30 segundos para uma velocidade de referência de 2m/s. Nesta, o erro de velocidade linear é em torno de 0,005m/s, ao longo do tempo, com um tempo de estabilização de 2 segundos. No caso da posição angular, pode-se notar que há uma oscilação inicial, que depois de 2.2 segundos se estabiliza e continua dessa forma ao longo do tempo. No caso do deslocamento linear, a resposta é estável tipo rampa e continua assim ao longo do tempo. Note-se que há uma pequena queda de 0.5 segundo aproximadamente, no início da simulação, que seria devido à inércia do sistema.

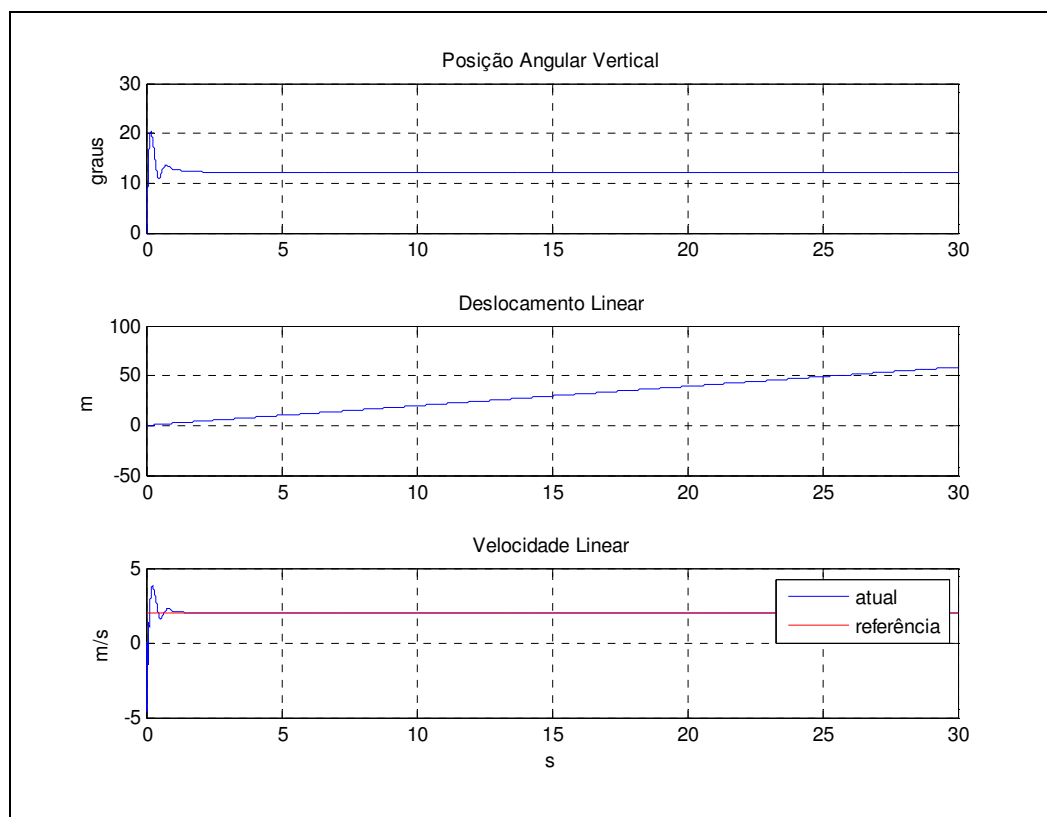


Figura 39: Resposta para um controle Robusto da posição angular, deslocamento e velocidade linear em uma malha fechada com a usuário para uma velocidade linear de referência de 2m/s.

4.5 Comparações das Estratégias de Controle

Na tabela a seguir têm-se os resultados dos controles para diferentes métricas, pode-se observar com relação ao Pico Máximo (*Overshoot*), o erro no estacionario e o consumo de corrente nos controles Fuzzy e Robusto têm valores menores ao do controle PID.

Tabela V: Comparações entre as estratégias de controle sem usuário

	PID	Fuzzy	Robusto
RMS da posição angular (graus)	5,1	1,12	0,76
Pico Máximo da posição angular (<i>Overshoot</i>) (graus)	10,1	8,3	8,5
Erro do estacionário (graus)	2,2	0,1	0,01
Consumo de corrente (Amp-h)	189	108,1	129,2

No seguinte capítulo se apresentam as características do protótipo construído, assim como as características dos componentes utilizados no TPPE, como os sensores, motores, placas, tipo de material da estrutura, e o software de programação.