

# Sumário

<b>1</b>	<b>Plano Inicial</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Atividades realizadas</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Descrição do Problema</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Resultados de simulação</b>	<b>6</b>
4.1	Introdução . . . . .	6
4.2	Levantamento de requisitos dos robôs . . . . .	8
4.2.1	Levantamento de requisitos para o robô goleiro . . . . .	9
4.2.2	Levantamento de requisitos para o robô atacante . . . . .	10
4.2.3	Resumo dos requisitos encontrados . . . . .	11
4.3	Verificação do sistema . . . . .	12
4.3.1	Verificação da velocidade máxima . . . . .	12
4.3.2	Verificação dos parâmetros de segunda ordem . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Agradecimentos</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>18</b>

# Levantamento de Requisitos para Robô Jogador de Futebol

Felipe Celso Reis Pinheiro, Elder Moreira Hemerly

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

São José dos Campos, SP, Brazil

8 de agosto de 2017

## 1 Plano Inicial

### 1º bimestre (ago/set)

- Determinação dos parâmetros do robô goleiro a serem avaliados nas simulações

### 2º bimestre (out/nov)

- Simulações do sistema robótico do goleiro variando-se os parâmetros escolhidos

### 3º bimestre (dez/jan)

- Determinação dos requisitos a serem cumpridos pelo sistema do goleiro para que um dado desempenho seja atingido
- Confecção do relatório parcial.

### 1º bimestre (mar/abril)

- Conseguir senóides do robô para traçar o diagrama de Bode
- Simulação do efeito da aceleração considerando ruído de posição
- Medir parâmetros para simular o robô

### 2º bimestre (maio/jun)

- Levantamento do requisito de redução
- Confecção do relatório final

## 2 Atividades realizadas

- Determinação dos parâmetros do robô goleiro a serem avaliados nas simulações.
- Simulações do sistema robótico do goleiro variando-se os parâmetros escolhidos
- Determinação dos requisitos a serem cumpridos pelo sistema do goleiro para que um dado desempenho seja atingido.
- Determinação dos parâmetros do robô atacante a serem avaliados nas simulações.
- Simulações do sistema robótico do atacante variando-se os parâmetros escolhidos
- Determinação dos requisitos a serem cumpridos pelo sistema do atacante para que um dado desempenho seja atingido.
- Medição de parâmetros do robô e verificação dos requisitos
- Levantamento do requisito de aceleração dos robôs atacante e goleiro
- Levantamento do requisito de aceleração dos robôs atacante e goleiro, considerando tradeoff entre aceleração e velocidade
- Verificação e validação do sistema atual considerando simulação não linear

## 3 Descrição do Problema

Robótica móvel tem se mostrado uma área de grande destaque no contexto atual, tanto pela abrangência e profundidade das pesquisas envolvidas quanto pelo rápido crescimento na indústria atualmente. A fim de incentivar e estimular pesquisas na área, foram criadas diversas competições nacionais e internacionais, como a RoboCup, mais famosa competição mundial criada em 1997 que tem como objetivo fomentar o avanço da robótica e inteligência artificial com o desafio de até 2050 criar um time de robôs humanoides capazes de ganhar de um time de humanos em uma partida de futebol.

Da mesma forma, vários desafios e competições foram criados com o objetivo de promover o avanço tecnológico em cada campo da robótica, como é o caso do IEEE's Very Small Size Soccer (VSS). O VSS é uma liga de futebol de robôs autônomos mantida pela IEEE Robotics and Automation Society que consiste em uma partida de futebol disputada por três robôs diferenciais com dimensões máximas de 7,5x7,5x7,5cm. As informações da partida são captadas através de uma câmera acima do campo e processadas autonomamente por um computador, que a partir

desses dados toma decisões de movimento aos robôs, enviadas por rádio, de forma a ganhar a partida. A informação enviada pelo rádio ao sistema eletrônico do robô possui se enquadra em um protocolo criado pelo time, que contém informações acerca das velocidades comandadas para cada uma das rodas do robô.

A engenharia de sistemas é uma parte da engenharia que estuda a integração de sistemas complexos, com muitos graus de liberdade a serem alterados. O fabricante do produto costuma utilizar esses graus de liberdade em seu favor, de modo a melhorar a performance do seu produto, que serve a uma dada finalidade. Muito mais do que isso, o pensamento sistêmico é uma ferramenta utilizada para a resolução de problemas baseando-se na premissa que o comportamento de uma parte individual do sistema pode ser melhor compreendido no contexto de sua relação com o sistema como um todo ([1], pág.32). Ou seja, a partir da integração de cada parte com o todo, incluindo-se os efeitos de "trade-off" associados a cada subsistema, pode-se otimizar o mesmo, de forma a extrair o máximo desempenho do todo.

De certa forma, a engenharia de sistemas é uma maneira formal de pensar como deve ser feita a arquitetura de um sistema(design).O engenheiro de sistemas vai geralmente fazer o papel chave na liderança do desenvolvimento de uma arquitetura de sistema, definindo e alocando requisitos, avaliando "trade-offs" de design, equilibrando riscos técnicos entre sistemas, definindo e avaliando interfaces, fornecendo fiscalização de atividades de validação e verificação, entre outras tarefas ([2],pág. 3).

Essa maneira formal de se desenvolver uma arquitetura possui fases de desenvolvimento, e normalmente utiliza-se o modelo V de desenvolvimento. O desenvolvimento em V necessita de fases de concepção do projeto, elaboração de requisitos de projeto, desenvolvimento da arquitetura do sistema, desenvolvimento próprio das partes do sistema, integração das partes, teste e avaliação e , por fim, a operação de transição e manutenção. A ênfase desse trabalho, centra-se na fase de elaboração dos requisitos de projeto.

De modo a atingir esse requisito, a engenharia de sistemas analisa e otimiza o desempenho de cada subsistema individualmente, minimizando também o custo financeiro para se atingir ainda um bom desempenho. Por exemplo, no caso dos robôs VSS, podemos otimizar o goleiro e o atacante separadamente. No caso de um goleiro, sabe-se intuitivamente que um bom robô desse tipo deve ser rápido o suficiente para defender as bolas que venham em sua direção. Pode-se , portanto, utilizar atuadores que cumprem esse requisito , produzindo um robô que atinge velocidades de 10 m/s. Isso porém, acarretaria um grande custo financeiro, além de ser uma velocidade exagerada dadas as dimensões do campo. No caso das simulações feitas no artigo, utilizando-se um robô que atinge 1 m/s, o desempenho do goleiro em probabilidade de defesa

seria praticamente o mesmo. Isso prova que o robô que pode atingir 10 m/s representaria uma grande perda de recursos.

Essa perda de recursos pode ser observada na relação entre o custo e a eficiência de um dado sistema. Para se atingir uma grande eficiência, é necessário gastar bastante recurso comprando ótimos componentes, por exemplo. Por outro lado, a eficiência desse sistema pode estar saturada, ou seja, elevados gastos podem não mais corresponder a um bom aumento na eficiência.

Observando dessa forma, a aplicação correta dos conhecimentos de engenharia de sistemas é imprescindível para o funcionamento coordenado de cada subsistema, constituindo um importante pilar para um bom projeto dos robôs VSS. No time de robôs da ITAndroids, utilizamos um robô goleiro, um zagueiro e um atacante. Na estratégia atual, o goleiro é fixo, o zagueiro e o atacante se alternam dependendo das circunstâncias do jogo. O robô goleiro possui uma estratégia simples: tenta prever a posição de chegada da bola na linha do gol e se posiciona nesse local para evitar a marcação do ponto adversário. Já, o atacante, possui uma estratégia mais complexa. Esse robô se posiciona antes da bola e, por meio de um algoritmo (por exemplo, RRT, ou algoritmo de campos potenciais), planeja uma trajetória de modo a atingir a bola num certo ângulo para marcar o gol. A estratégia do zagueiro é apenas de agir como um segundo goleiro na altura do meio de campo, mantendo a bola no campo de ataque adversário.

Com o objetivo de realizar um projeto de robô VSS a um baixo custo financeiro, porém com um alto desempenho, faz-se uma análise simulada do desempenho do robô com a variação de certos parâmetros. Alguns parâmetros escolhidos, por exemplo, envolvem a velocidade máxima dos robôs, coeficientes de funções de transferência envolvidos no problema e atraso na realimentação da malha de controle. Simulando a estratégia adotada para o atacante e o goleiro e adotando um critério de desempenho definido para cada um dos robôs (no caso, o atacante e o goleiro), pode-se extrair gráficos de desempenho em função do valor de parâmetro escolhido. Por meio do gráfico, pode-se observar a influência da variação de um dado parâmetro no desempenho do sistema. Por meio disso, pode-se estabelecer valores limítrofes de alto desempenho, a partir dos quais o aumento ou a diminuição não influenciam de forma significativa no bom desempenho. Esses valores serão os requisitos de desempenho.

No contexto do VSS, a finalidade do produto é constituir um time com outros três robôs, de modo a fazer o maior número de gols possível no time adversário. Attingir uma boa performance em gols, é um requisito de alto nível que o sistema possui para construir um bom desempenho.

## 4 Resultados de simulação

### 4.1 Introdução

Conforme já citado, o objetivo é otimizar o sistema com base em critérios de desempenho estabelecidos. Para o caso do robô goleiro, de forma simplificada, uma bola com uma determinada velocidade, em uma dada posição do campo e com um determinado ângulo é direcionada ao gol. A posição da bola é escolhida de forma aleatória, a sua velocidade é um parâmetro de simulação controlado pelo usuário (fixamos em 1 m/s), e a sua direção é escolhida a partir de um ponto aleatório no interior do gol, ao qual a bola estará se direcionando em linha reta. O goleiro sempre começa no meio do gol. O critério de desempenho escolhido corresponde à porcentagem de bolas defendidas pelo goleiro.

Para o estudo dos requisitos do goleiro, é utilizado portanto o método de Monte Carlo para lidar com a posição inicial não determinística da bola. Dessa forma, são realizadas 1000 simulações para cada variação de parâmetro escolhida, onde a bola surge em uma posição aleatória do campo e se dirige ao gol com uma velocidade determinada (1 metro por segundo). A quantidade de simulações foi escolhida empiricamente, de modo a reduzir o ruído no cálculo da porcentagem de defesa devido às variáveis aleatórias envolvidas no problema.

A velocidade da bola adotada para a simulação do goleiro foi escolhida empiricamente, baseando-se na experiência da equipe nessa competição. (tabela 1).

Tabela 1: Tabela com parâmetros adotados na simulação

Parâmetro de simulação	Valor numérico
Velocidade da bola	1m/s
Número de repetições por parâmetro	1000

Já, no caso do atacante, o robô deve seguir uma trajetória planejada para atingir a bola em um determinado ângulo (o ângulo que mire para o gol). Não há, a princípio, parâmetros não determinísticos na simulação, o que faz com que o método de Monte Carlo não seja necessário. Como a simulação a ser efetuada para avaliar o sistema do atacante é determinística, não faria sentido repetir a simulação várias vezes e aplicar um método estatístico para avaliar o robô. Nesse caso, o somatório do erro quadrático (em posição) do robô em relação a uma trajetória de referência escolhida (em cada passo da simulação) corresponde ao critério de desempenho a ser adotado, conforme (1).

$$\sum_{k=1}^N (x_{atacante}[k] - x_{trajetoria}[k])^2 \quad (1)$$

A trajetória de referência utilizada para os testes do atacante foi escolhida com "trajectory optimization", utilizando como base trajetórias reais feitas por um robô VSS.

No artigo [3], o método aplicado para levantar os requisitos consistia em aproximar a função de transferência do robô de velocidade comandada (entrada) para velocidade real (saída) em um sistema de segunda ordem, com frequência natural e fator de amortecimento conhecidos, conforme tratado em (2).

$$\frac{V(s)}{V_{reference}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

O sistema de segunda ordem acima consiste uma boa aproximação para fins de simulação, porém, com o objetivo de analisar mais a fundo esse sistema, no procedimento de levantamento de requisitos tratado nesse trabalho, utilizou-se uma maneira diferente de se escrever esse sistema de segunda ordem. Essa maneira permite fazer melhores considerações não só a respeito da velocidade de cada sistema analisado, como também da aceleração (figura 1).

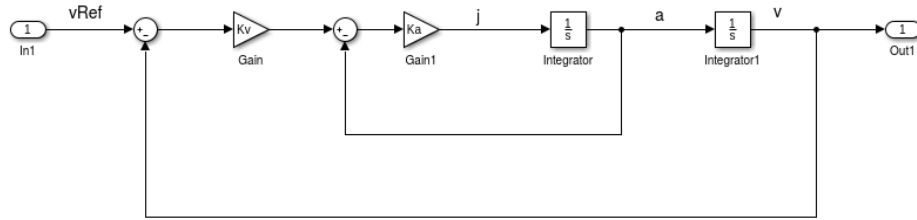


Figura 1: Sistema de 2ª ordem

Fazendo uma análise do diagrama de blocos da figura 1, pode-se chegar a seguinte função de transferência em (3).

$$\frac{V(s)}{V_{reference}(s)} = \frac{K_v K_a}{s^2 + K_a s + K_a K_v} \quad (3)$$

Por fim, isso conduz a relações entre  $\omega_n, \xi$  e  $K_v, K_a$ .

$$K_a = 2\xi\omega_n \quad (4)$$

$$K_v K_a = \omega_n^2 \quad (5)$$

Portanto, para simular a dinâmica de segunda ordem utilizando a função de transferência descrita em (3), pode-se utilizar equações a tempo discreto em (6).

$$\begin{bmatrix} v_{k+1} \\ a_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_k \\ a_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \end{bmatrix} j_k \quad (6)$$

Em (6), pode-se observar a equação de update da cinemática, onde a variável  $T$  corresponde ao passo de simulação. A rigor, o robô da categoria VSS possui duas rodas, e a equação completa envolveria 4 variáveis de estado (velocidade e aceleração das rodas esquerda e direita). A princípio, considerando que o sistema constitui um robô diferencial ideal, e portanto sem acoplamento entre o movimento das rodas, pode-se analisar cada parte separadamente, e estender a análise da roda direita para a roda esquerda por simetria. Analisando as equações provenientes da malha de segunda ordem, pode-se construir uma equação a diferenças para a atualização da aceleração (em (7)).

$$a_{k+1} = (1 - 2\xi\omega_n T)a_k + \omega_n^2(v_{ref,k} - v_k)T \quad (7)$$

Além disso, pode-se construir uma equação para a atualização da velocidade (em (8)).

$$v_{k+1} = v_{ref,k} \frac{T^2}{2} \omega_n^2 + \left(1 - \frac{T^2}{2} \omega_n^2\right) v_k + (T - T^2 \xi \omega_n) a_k \quad (8)$$

Por fim, para aproximar ainda mais a simulação da realidade, sabe-se que os atuadores reais possuem limitações de velocidade máxima e aceleração. Assim, os modelos implementados na simulação consideraram essa saturação. Neste trabalho, um dos objetivos principais é levantar o requisito de aceleração máxima e velocidade máxima para esse sistema, de tal modo que o recurso a ser gasto com atuadores seja otimizado visando eficiência do sistema integrado.

## 4.2 Levantamento de requisitos dos robôs

No artigo [3], realizou-se o levantamento de requisitos do robô goleiro e do atacante considerando os critérios anteriormente citados.

Um sistema robótico consiste de uma integração de sistemas mecânicos, eletrônicos e computacionais. A rigor, o levantamento de requisitos requer que a simulação seja feita considerando a interação e os "trade-offs" envolvidos na otimização dos subsistemas. Porém, como isso seria computacionalmente custoso, escolhemos uma sequência de parâmetros para simular de tal modo a reduzir a complexidade computacional da análise.

A sequência de requisitos adotada segue a mesma utilizada no artigo [3]. A diferença do levantamento feito no artigo citado e nesse trabalho consiste na presença do requisito de aceleração máxima para o robô. Com esse acréscimo, a sequência de levantamento seguiu a seguinte



ordem: inicialmente levanta-se os requisitos de aceleração e velocidade máxima para o robô, depois levanta-se os parâmetros de segunda ordem do robô ( $\omega_n$  e  $\xi$ ), e em seguida levanta-se o requisito de atraso máximo para a malha de controle do sistema.

É importante lembrar que durante o levantamento de requisitos, o levantamento segue uma ordem na qual o requisito que está sendo levantado é variado, os que já foram levantados possuem seu valor igual ao levantado, e os que não foram e não estão sendo levantados são mantidos otimizados.

#### 4.2.1 Levantamento de requisitos para o robô goleiro

Inicialmente, levantou-se o requisito de aceleração juntamente com o de velocidade, mantendo os outros parâmetros do robô otimizados. Simulou-se o desempenho do robô goleiro para uma determinada faixa de velocidade e aceleração máxima. O gráfico levantado encontra-se na figura 2.

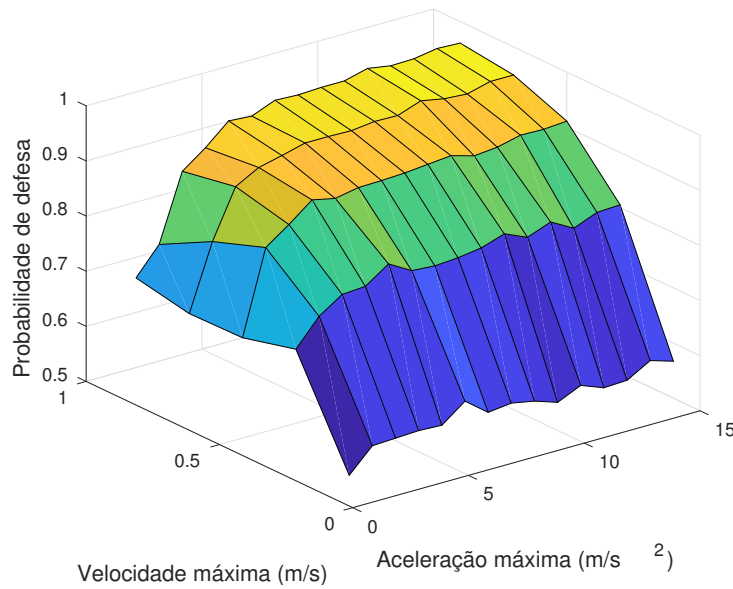


Figura 2: Levantamento de requisito de velocidade e aceleração máxima

Nota-se que para altas velocidades e acelerações máximas, a probabilidade de defesa aumenta, o que é esperado intuitivamente. Por outro lado, a medida que esses parâmetros possuem seu valor reduzido, o sistema vai piorando em desempenho. Nota-se, pelo gráfico, que a partir de determinados valores, a probabilidade de defesa se torna bem próxima a 1.0. Um ponto utilizado como requisito, e que demarca bem essa região, corresponde a aceleração máxima de  $6.0 m/s^2$  e velocidade máxima de  $0.7 m/s$ . Neste primeiro levantamento, todos os outros parâmetros de simulação utilizados foram considerados otimizados.

Feito então o primeiro levantamento, segue-se a sequência levantando o  $\omega_n$  e o  $\xi$  do sistema

de segunda ordem utilizado. O levantamento foi feito considerando-se a velocidade e aceleração máxima do robô de acordo com o requisito já levantado. Simulou-se, conforme o requisito anterior, uma faixa de frequência natural e de fator de amortecimento da malha. O gráfico encontra-se na figura 3.

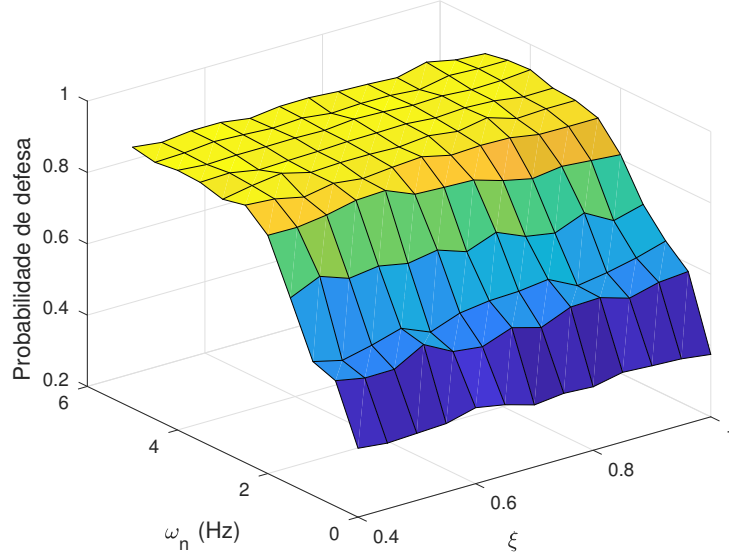


Figura 3: Levantamento do requisito de frequência natural e fator de amortecimento

Observando-se o gráfico, pode-se notar que a frequência natural faz uma diferença significativa para o desempenho do goleiro, já o fator de amortecimento não possui muita influência na faixa de valores adotada.

Para essa situação, o requisito adotado foi de  $2.5Hz$  para a frequência natural e de 0.6 para o fator de amortecimento.

Por fim, levantou-se conjuntamente o requisito de atraso do sistema e taxa da câmera utilizada para a visão. Com isso, obteve-se o desempenho da figura 4.

Nota-se que a taxa da câmera não influencia significativamente o desempenho do goleiro na faixa de taxas analisada. Já, a presença de atraso na malha de controle acarreta grandes perdas de desempenho, e, para esse caso, adotou-se como requisito um atraso de  $0.02s$ .

#### 4.2.2 Levantamento de requisitos para o robô atacante

O levantamento de requisitos para o robô atacante seguiu a mesma sequência do efetuado para o robô goleiro. O primeiro levantamento (aceleração máxima e velocidade máxima) seguiu conforme mostrado na figura 5.

Observando-se a figura, que trata da relação do erro quadrático do robô em relação à trajetória de referência, constata-se que não basta somente aumentar a velocidade máxima do robô. A aceleração máxima também faz bastante influência no desempenho, e isso pode ser constatado

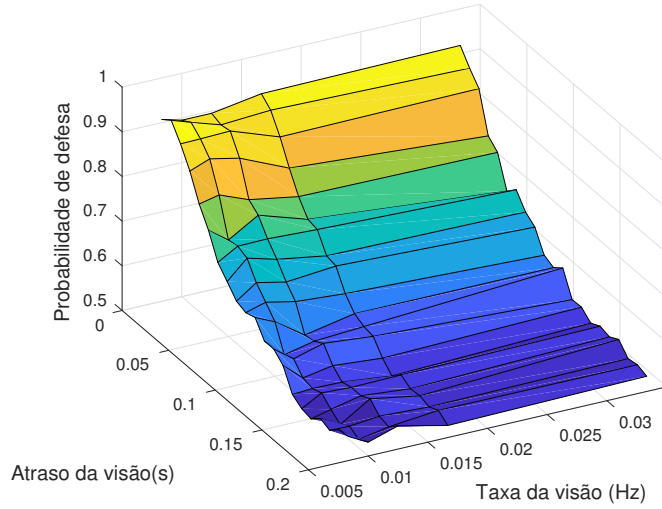


Figura 4: Levantamento de requisito de taxa da câmera e atraso

intuitivamente. Um robô que possui uma velocidade máxima muito alta para efetuar as curvas, tenderia a ter mais dificuldade em desacelerar quando preciso. Isso faria com que o robô seguisse menos a curva, e portanto tivesse um erro quadrático mais alto.

Portanto, para que as curvas sejam realizadas, é necessário um certo equilíbrio entre velocidade e aceleração máxima. Para a escolha de um requisito, adotou-se a velocidade de  $0.6m/s$  e uma aceleração de  $8m/s^2$ .

Seguindo a sequência de requisitos, levantou-se os fatores  $\omega_n$  e  $\xi$  para o sistema do robô atacante. O gráfico do levantamento encontra-se na figura 6.

O gráfico do levantamento ilustra o mesmo comportamento presente no caso do robô goleiro: a frequência natural do sistema de segunda ordem fazendo diferença significativa no desempenho, enquanto que o fator de amortecimento faz pouca diferença. Nesse caso, adotou-se como requisito  $\omega_n = 5Hz$  e  $\xi = 0.707$ . Nota-se que a frequência natural adotada como requisito para o robô atacante é o dobro da frequência natural adotada para o robô goleiro como requisito.

Por fim, levantados os requisitos anteriores, simulou-se o efeito do atraso na malha de controle (figura 7).

Como requisito, adotou-se o valor de atraso máximo para a malha de controle como sendo de  $0.02s$ . O valor encontrado coincide com o valor de atraso máximo para o robô goleiro.

#### 4.2.3 Resumo dos requisitos encontrados

A tabela 2 resume os requisitos obtidos até então.

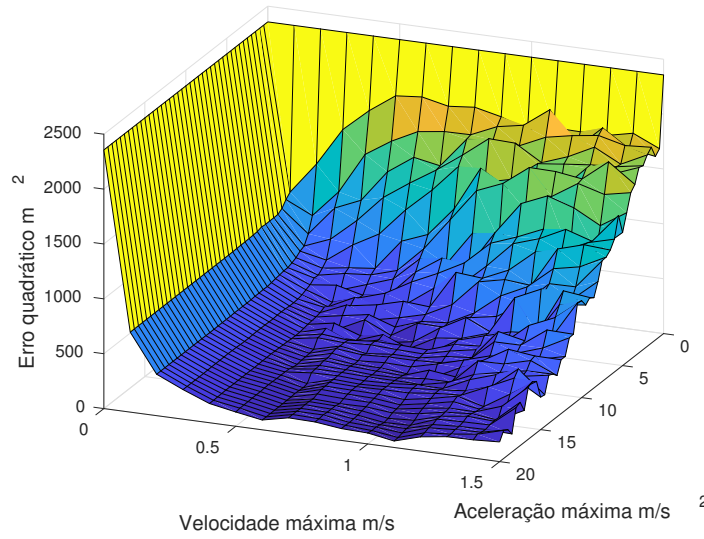


Figura 5: Levantamento de requisito de velocidade e aceleração máxima para o robô atacante

Tabela 2: Resumo dos requisitos levantados

Função do robô	Velocidade máxima ( $m/s$ )	Aceleração máxima ( $m/s^2$ )	$\omega_n$ (Hz)	$\xi$	Atraso (s)
Atacante	0.6	8.0	5.0	0.7	0.02
Goleiro	0.7	6.0	2.5	0.6	0.02

### 4.3 Verificação do sistema

Nessa parte do trabalho, realizou-se a verificação de uma parte dos requisitos trabalhados até então. O hardware do robô, conforme já citado, consiste de duas rodas, dois motores, uma estrutura mecânica e uma placa de circuito impresso. Nesse último item, está localizado o microcontrolador, que realiza o controle da parte eletrônica. A interface com a parte elétrica do robô é feita por meio de um driver de motor.

#### 4.3.1 Verificação da velocidade máxima

O motor utilizado no robô é um Pololu 50:1 Micro Metal Gearmotor, com uma tensão nominal de 6V e velocidade sem carga nominal de 630rpm. Experimentalmente, sabe-se que ao motor pode ser aplicada uma tensão de até 8.0V, e que velocidades maiores podem ser atingidas, alcançando um máximo de 750rpm. Essa velocidade máxima pode ser convertida para o sistema internacional de unidades, conforme desenvolvido em (9).

$$\omega_{SI} = \omega_{rpm} \frac{2\pi}{60} \Rightarrow \omega_{SI} = 78.54 rad/s \quad (9)$$

O raio da roda do robô atual é de 3cm, o que leva a uma velocidade linear calculada em

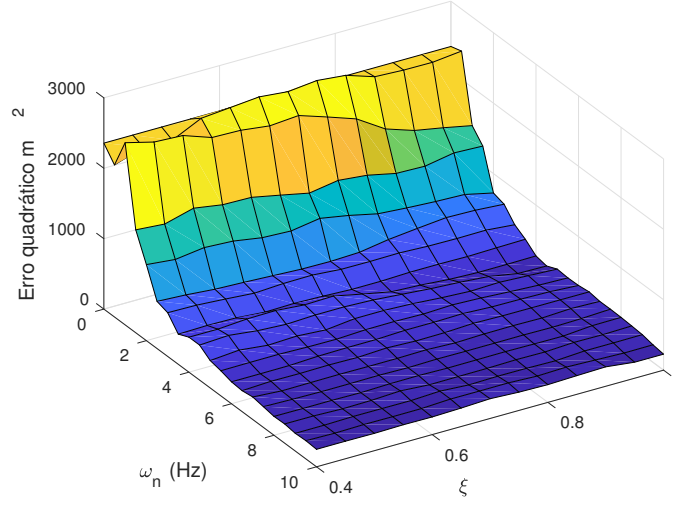


Figura 6: Levantamento de requisito de  $\omega_n$  e  $\xi$  para o robô atacante

$$v = \omega R \Rightarrow v = 2.35m/s \quad (10)$$

Portanto, o sistema atende a especificação de velocidade máxima, tanto para o caso do robô goleiro quanto para o caso do robô atacante.

#### 4.3.2 Verificação dos parâmetros de segunda ordem

Além disso, verificou-se por meio do levantamento feito no artigo que ainda será publicado na conferência LARS (Simpósio Latino Americano de Robótica) [4] o valor dos parâmetros de segunda ordem do robô. Para a obtenção analítica desses valores, para fins de simplificação, desprezou-se nessa análise os efeitos de acoplamento entre as rodas.

Considerando o vetor de estados  $x$  (11) como sendo as velocidades de ambas as rodas do robô, pode-se representar o sistema robótico em um espaço de estados na forma descrita em (12). A partir da planta do robô, pode-se obter a função de transferência de velocidades comandadas para velocidades reais em ambas as rodas.

$$x = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

As matrizes do modelo de espaço de estados podem ser obtidas a partir do levantamento feito no artigo [4]. Assim, tem-se o descrito em (14).

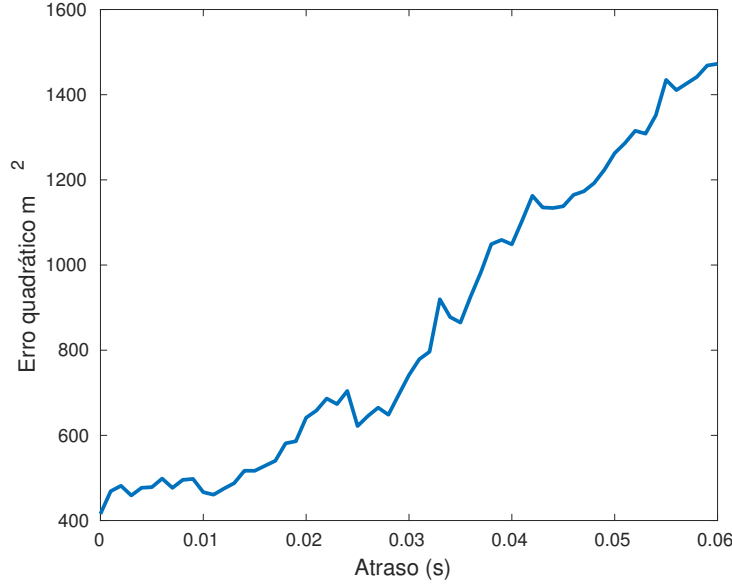


Figura 7: Levantamento de requisito de atraso para o robô atacante

$$A = \begin{bmatrix} -6.4855 & 0.9460 \\ 0.9460 & -6.4855 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 68.1908 & -9.9463 \\ -9.9463 & 68.1908 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Para a consideração de desacoplamento, faz-se a seguinte simplificação:

$$A = \begin{bmatrix} -6.4855 & 0 \\ 0 & -6.4855 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 68.1908 & 0 \\ 0 & 68.1908 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Por fim, como as equações agora estão desacopladas, pode-se desenvolver as funções de transferência da planta a partir de (12) considerando os sinais de controle separados, conforme mostrado em (15).

$$\dot{x} = Ax + Bu = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r \\ u_l \end{bmatrix} \quad (15)$$

O desenvolvimento da equação está descrito em (16).

$$\dot{\omega}_r = a\omega_r + bu_r \quad (16)$$

Desenvolvendo, finalmente, a função de transferência da planta desacoplada pode ser obtida (17).

$$G(s) = \frac{\omega_r(s)}{U_r(s)} = \frac{b}{s - a} \quad (17)$$

A partir da planta, deve-se definir um controlador, que no caso do robô real trata-se de um proporcional-integrativo (18). O controlador foi utilizado na sua forma digital com método

de integração retangular. As constantes analógicas equivalentes utilizadas foram  $K_p = 0.5$  e  $K_i = 200.0$ .

$$u = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt, e(t) = x_{referencia} - x(t) \Rightarrow C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (18)$$

Deve-se ainda considerar o efeito da amostragem da implementação digital. Esse atraso pode ser incluído na malha por meio das aproximações de Padé ((19)).

$$D(s) = e^{-sT} = \frac{2 - sT}{2 + sT} \quad (19)$$

A função de transferência global da malha de controle em malha fechada pode ser expressa como em (20).

$$G_{mf} = \frac{D(s)C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)D(s)} \quad (20)$$

Substituindo todas as constantes utilizadas, chega-se em (21).

$$G_{mf} = \frac{\omega_r(s)}{\omega_{referencia}(s)} = \frac{-0.001337s^2 + 855.7}{0.00125s^3 + 1.007s^2 + 6.486s + 855.7} \quad (21)$$

O diagrama de Bode da função foi obtido na figura 8.

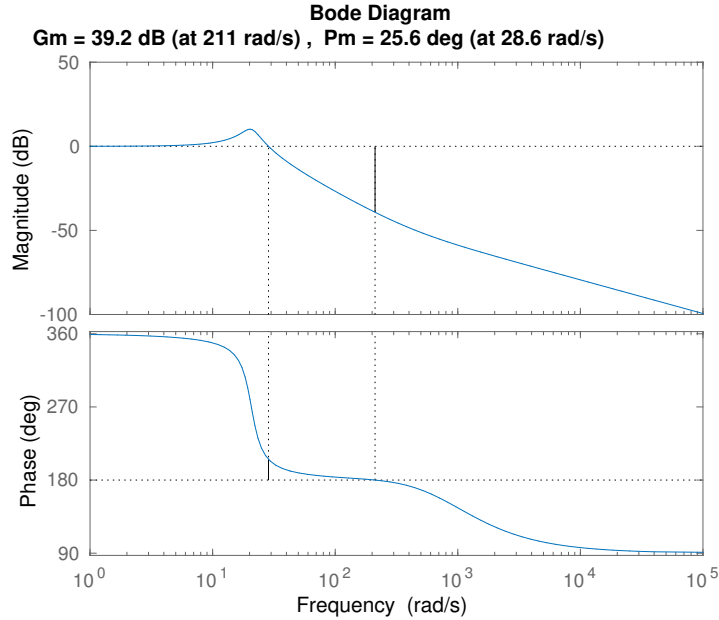


Figura 8: Levantamento de requisito de atraso para o robô atacante

Para a análise do diagrama, utilizou-se inicialmente o pico de ressonância([5], pág. 412 ) da função (22).

$$P_r = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (22)$$

Com isso, pode-se obter um valor de  $\xi$  aproximado para o sistema de segunda ordem equivalente.

$$\xi_{equivalente} = 0.1567 \quad (23)$$

Portanto, o robô está bem pouco amortecido, e, conseqüentemente, com uma baixa margem de fase, conforme mostrado na figura 8.

Por fim, a partir da banda passante, pode-se obter um valor de  $\omega_n$  aproximado para o sistema de segunda ordem equivalente (24).

$$\omega_n = \frac{BW}{\sqrt{1-2\xi^2} + \sqrt{2-4\xi^2+4\xi^4}} \Rightarrow \omega_n = 20.71 \text{ rad/s} \quad (24)$$

Portanto, o robô encontra-se próximo da instabilidade e não atende ao requisito de frequência natural especificado pelo levantamento de requisitos do atacante. Originalmente, esse requisito corresponde a  $\omega_n = 5 \cdot 2\pi = 10\pi \simeq 31.41 \text{ rad/s}$ . Portanto, ainda há bastante o que se aperfeiçoar para que se obtenha um robô atacante otimizado.

A partir do artigo [4], pode-se construir o sistema robótico em malha fechada, analisando-se a função de transferência de velocidade comandada para velocidade real. O sistema foi reproduzido no Simulink, incluindo o sistema de realimentação efetuado por um encoder incremental. O controlador utilizado nessa simulação consiste do controlador proporcional-integrativo implementado na prática para esse robô (figura 9).

Na figura, o primeiro bloco consiste no bloco do microcontrolador, onde está o código embarcado do sistema e toda a conversão de informação eletrônica para elétrica. O segundo bloco consiste no sistema robótico como um todo, considerando os motores de ambas as rodas, voltagem máxima da bateria, sua massa, momento de inércia da estrutura e o efeito de acoplamento entre as rodas.

Por fim, fez-se a simulação do sistema descrito, analisando-se nesse momento a função de transferência descrita em (2). Portanto, inicialmente aplicou-se um degrau de entrada de 100rpm em ambas as rodas. O gráfico obtido por meio da simulação pode ser encontrado na figura 10. Pode-se notar que o robô encontra-se de fato em uma região próxima da margem de estabilidade, apresentando resposta consideravelmente oscilatória e com um grande sobressinal.



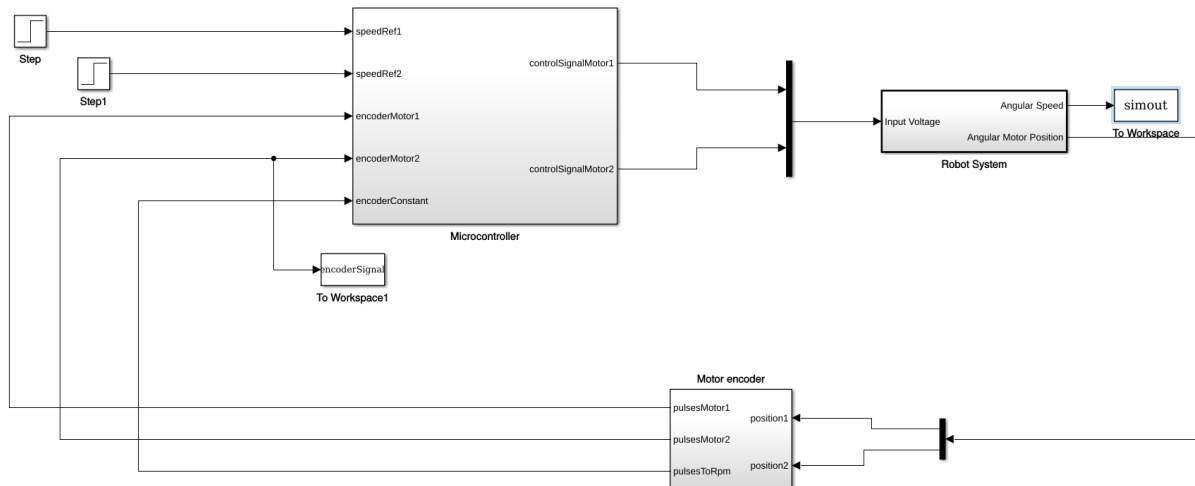


Figura 9: Simulador não-linear do robô

## 5 Conclusão

Por meio desse trabalho, é possível entender melhor acerca do problema do Very Small Size Soccer. Os gráficos mostram o efeito da variação de cada um dos parâmetros escolhidos no desempenho dos problemas.

O requisito de aceleração levantado, embora não verificado com o sistema atual, mostra bastante acerca do desempenho do robô atacante ao executar as curvas com altas velocidades. Nesse caso, altas velocidades podem prejudicar o desempenho do robô, caso baixas disponibilidades de aceleração possam ser utilizadas para desacelerar o sistema.

Por fim, a verificação mostrou, a partir do levantamento de requisitos, quais pontos do robô precisam ser melhorados com urgência a fim de que o sistema possa ser melhor aproveitado. No caso, verificou-se que a frequência natural do sistema é um importante parâmetro a ser melhorado.

## 6 Agradecimentos

Agradeço ao CNPQ, por prover ajuda financeira para realizar esse projeto. Agradeço à ITAndroids, por compartilhar conhecimento e ferramentas que tornam esse projeto possível, ao aluno Samuel Cerqueira, que construiu o simulador dos robôs, ao prof. Marcos Máximo pelas sugestões, ideias e conselhos e ao prof. Dr. Elder por tornar o projeto possível.

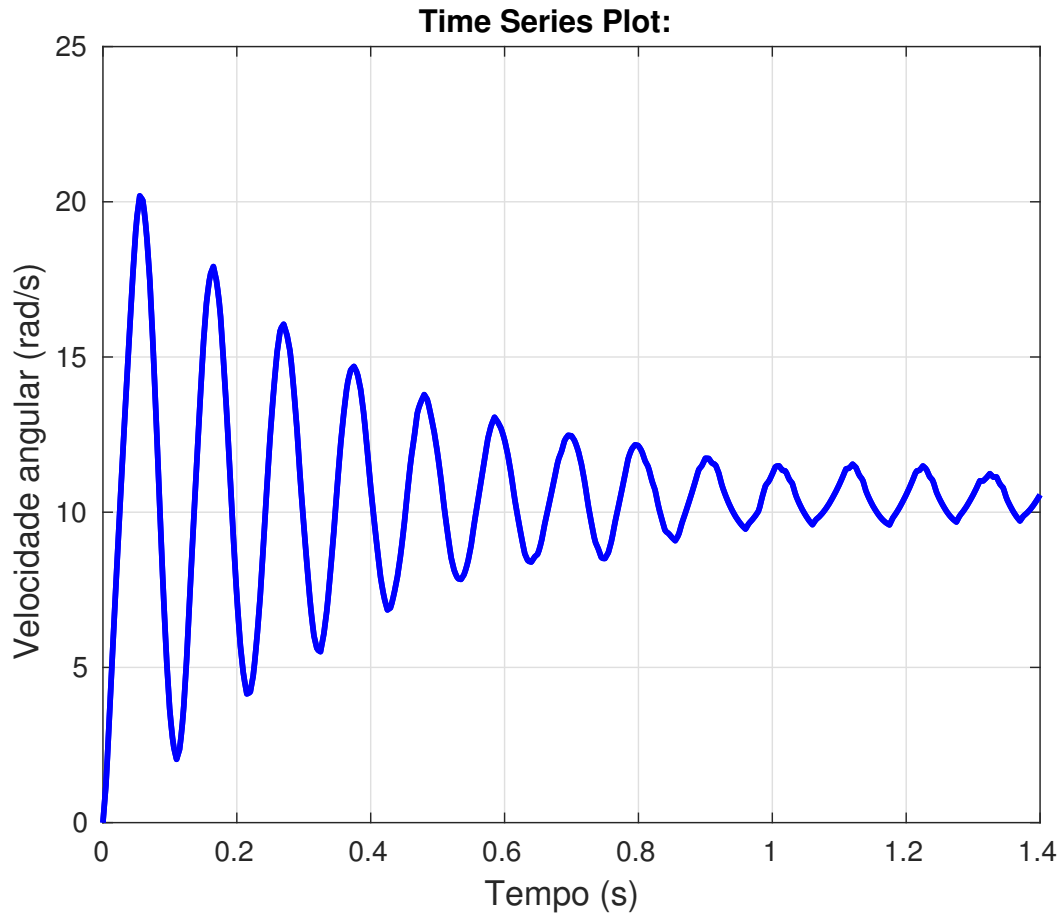


Figura 10: Resposta ao degrau do robô

## 7 Bibliografia

- [1] MITRE, *Systems Engineering Guide*. MITRE, 2014.
- [2] NASA, *Systems Engineering Handbook*. NASA, 2007.
- [3] S. C. PINTO, *Performance Requirements Derivation for IEEE Very Small Size Competition*. LARS, 2016.
- [4] P. B. VERONESE, *Experimental Measurement of Parameters for Modeling a Differential Drive Soccer Robot*. LARS, 2017.
- [5] K. OGATA, *Modern Control Engineering, 5th edition*. Prentice Hall, 2010.

## Referências