

Levantamento de Requisitos para Robô Jogador de Futebol

Felipe Celso Reis Pinheiro

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Rua H8A, 119, CTA

12.228-460 - São José dos Campos/SP

Bolsista PIBIC - CNPq

fcrpfelipe96@gmail.com

Elder Moreira Hemerly

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Divisão de Engenharia Eletrônica

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50

12.228-900 – São José dos Campos / SP

hemerly@ita.br

Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Laboratório de Sistemas Computacionais Autônomos

Divisão de Ciência da Computação

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50

12.229-900 – São José dos Campos / SP

mmaximo@ita.br

Resumo: O desenvolvimento de robôs requer conhecimento multidisciplinar com o objetivo de realizar a integração dos múltiplos subsistemas. Para analisar a relação e os “trade-offs” entre esses subsistemas de um robô da categoria “Very Small Size”, utilizaram-se métodos de simulação determinísticos e não-determinísticos (método de Monte Carlo). A partir dessas simulações, definiram-se requisitos de desempenho para que seja possível projetar um robô com o menor desempenho sendo ainda capaz de cumprir a sua missão. O critério de desempenho varia com o papel do robô analisado (goleiro e atacante).

Palavras-chave: Engenharia de sistemas, Robótica, Levantamento de requisitos, Engenharia de controle

1. INTRODUÇÃO

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 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, visando ganhar a partida (7th Latin American IEEE Robotics Competition (2008)).

Os fabricantes de produtos costumam utilizar os graus de liberdade do sistema em análise a seu favor, de modo a melhorar o desempenho 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 (MITRE (2014), 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 (NASA (2007), pág. 3).

Essa maneira formal de se desenvolver uma arquitetura possui fases e normalmente utiliza-se o modelo em 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 apropriado das partes do sistema, integração das partes, teste e avaliação e, por fim, a operação de transição e manutenção. Esse trabalho está centrado na fase de elaboração dos requisitos de projeto.

De modo a atingir esse objetivo, 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 comprova 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 o desempenho de um dado sistema. Para se atingir um bom desempenho, pode ser necessário gastar bastante recurso comprando componentes de alto rendimento, por exemplo. Por outro lado, o desempenho desse sistema pode estar saturado, ou seja, elevados gastos podem não mais corresponder a um bom benefício.

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, utiliza-se 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. O atacante, possui uma estratégia mais complexa. Esse robô se posiciona antes da bola e, por meio de algum algoritmo que gere trajetórias, 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), podem-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, podem-se estabelecer valores limítrofes de alto desempenho, a partir dos quais o aumento ou a diminuição não influenciam de forma significativa no 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, além de minimizar o número de gols sofridos. Atingir um bom desempenho em saldo de gols é um requisito de alto nível que o sistema possui para construir um bom desempenho.

2. LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

2.1 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, em que a bola surge em uma posição aleatória do campo e se dirige a uma posição também aleatória no gol com uma velocidade determinada (1 m/s). 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 baseando-se no tamanho do campo. O campo possui 1,5 metros de comprimento, e sabe-se que a bola não atravessa o campo inteiro em 1 segundo no meio de uma partida. Os parâmetros de simulação podem ser encontrados na tabela 1. Já, no caso do atacante, o robô deve seguir uma trajetória

Tabela 1: Tabela com parâmetros adotados na simulação do robô goleiro

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

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, isto é, 1 realização da simulação é representativa o suficiente. Como a simulação a ser efetuada para avaliar o sistema do atacante é determi-

nística, 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).

$$J(\mathbf{x}_{atacante}) = \sum_{k=1}^N (\mathbf{x}_{atacante}[k] - \mathbf{x}_{trajetoria}[k])^T \cdot (\mathbf{x}_{atacante}[k] - \mathbf{x}_{trajetoria}[k]) \quad (1)$$

Onde $\mathbf{x}_{atacante}$ é a posição bidimensional do atacante (eixo x e eixo y), e $\mathbf{x}_{trajetoria}$ é a posição prevista do robô de acordo com a trajetória desejada. 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 PINHEIRO *et al.* (2016), o método aplicado para levantar os requisitos consiste em aproximar a função de transferência do robô de velocidade comandada (entrada, $v_{reference}$) para velocidade real (saída, v) em um sistema de segunda ordem, com frequência natural e fator de amortecimento conhecidos, conforme (2).

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

Em que ω_n é a frequência natural do sistema e ξ é o fator de amortecimento. O sistema de segunda ordem acima consiste em uma boa aproximação para fins de simulação (PINHEIRO *et al.* (2016)), porém, com o objetivo melhorar a simulação do sistema, no procedimento de levantamento de requisitos tratado nesse trabalho, utilizou-se uma maneira diferente de se escrever esse sistema de segunda ordem. Com essa escrita diferente, pode-se obter valores de aceleração e velocidade, simulando-os apropriadamente sem ter tanto ruído de simulação (o que poderia ocorrer com a utilização de derivadas numéricas), além de permitir obter os efeitos da variação dos parâmetros de segunda ordem no sistema (figura 1). Fazendo uma análise do diagrama de blocos da figura 1, chega-se à seguinte função de transferência em (3).

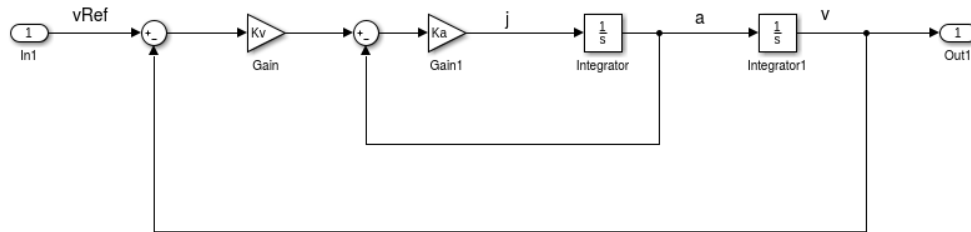


Figura 1: Diagrama de blocos do sistema de 2ª ordem

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

Onde K_v e K_a são constantes que dependem dos parâmetros de segunda ordem do sistema. Por fim, isso conduz a relações entre ω_n, ξ e K_v, K_a (4).

$$K_a = 2\xi\omega_n, K_v \cdot K_a = \omega_n^2 \quad (4)$$

Portanto, para simular a dinâmica de segunda ordem utilizando a função de transferência descrita em (3), pode-se utilizar equações a tempo discreto em (5).

$$\begin{bmatrix} v_{k+1} \\ a_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_k \\ a_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \end{bmatrix} j_k \quad (5)$$

Onde v_k corresponde à velocidade, a_k à aceleração e j_k ao tranco do robô no passo k de integração. Em (5), pode-se observar a equação de “update” da cinemática, na qual a variável T corresponde ao passo de integração. 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. De (3), tem-se

$$\ddot{v}(t) = \omega_n^2 v_{ref}(t) - \omega_n^2 v(t) - 2\xi\omega_n \dot{v}(t) \Rightarrow j(t) = \omega_n^2 v_{ref}(t) - \omega_n^2 v(t) - 2\xi\omega_n a(t) \quad (6)$$

Adotando $j_k = j(t) = j(kT)$, $kT \leq t \leq (k+1)T$, podem-se reescrever as equações p/ v_{k+1} e a_{k+1} em (5) como:

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

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

Onde v_{ref} é a velocidade de referência desejada para o robô. 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 os requisitos 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.

2.2 Levantamento de Requisitos dos Robôs

No artigo PINHEIRO *et al.* (2016), realizou-se o levantamento de requisitos do robô goleiro e do atacante considerando os critérios anteriormente citados.

A sequência de requisitos adotada segue a mesma utilizada no artigo PINHEIRO *et al.* (2016). A diferença do levantamento feito no artigo citado e neste trabalho consiste na presença do requisito de aceleração máxima para o robô. Com esse acréscimo, a sequência de levantamento seguiu a seguinte ordem: inicialmente levantam-se os requisitos de aceleração e velocidade máxima para o robô, depois levantam-se os parâmetros ω_n e ξ , 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, segue-se 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 fixos de acordo com os valores obtidos nas etapas anteriores.

2.2.1 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 iguais a de um robô perfeito (ω_n muito grande, $\xi \simeq 0,7$, atraso nulo na malha e erro de sensor nulo). Simulou-se o desempenho do robô goleiro para uma determinada faixa de velocidade e aceleração máxima. O gráfico levantado encontra-se na figura 2. Nota-se que para altas velocidades e acelerações máximas, a probabilidade de defesa aumenta, o que é esperado intuitivamente. Por outro lado, à medida que esses parâmetros possuem seu valor reduzido, o desempenho vai se degradando. Nota-se, pelo gráfico, que a partir de determinados valores, a probabilidade de defesa se torna bem próxima a 100,0%. Um ponto utilizado como requisito (probabilidade de defesa de 93,1%), e que demarca bem essa região, corresponde a aceleração máxima de $6,0m/s^2$ e velocidade máxima de $0,7m/s$.

Feito então o primeiro levantamento, segue-se a sequência levantando o ω_n e o ξ do sistema de segunda ordem utilizado. O levantamento foi feito considerando-se a velocidade e aceleração máximas 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

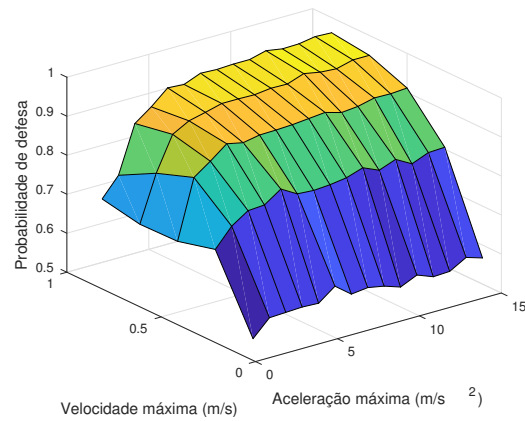


Figura 2: Levantamento de requisito de velocidade e aceleração máximas

da malha. O gráfico encontra-se na figura 3. Observando-se o gráfico, pode-se notar que a frequência natural faz uma

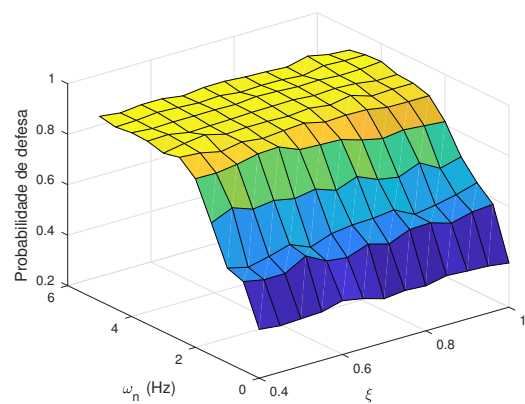


Figura 3: Levantamento do requisito de frequência natural e fator de amortecimento

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 , no mínimo $2,5 Hz$ para a frequência natural e de , no mínimo $0,6$ para o fator de amortecimento, obtendo-se assim uma probabilidade de defesa de $90,1\%$.

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

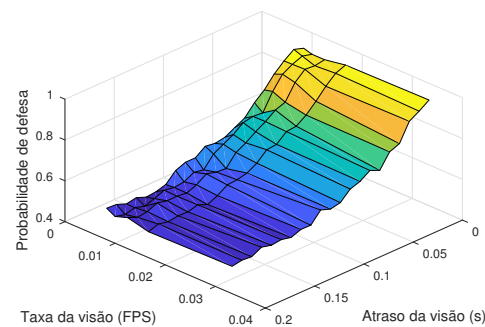


Figura 4: Levantamento de requisito de taxa da câmera e atraso

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 máximo de $0,02s$, obtendo-se assim uma probabilidade de defesa

de 89,1%.

2.2.2 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

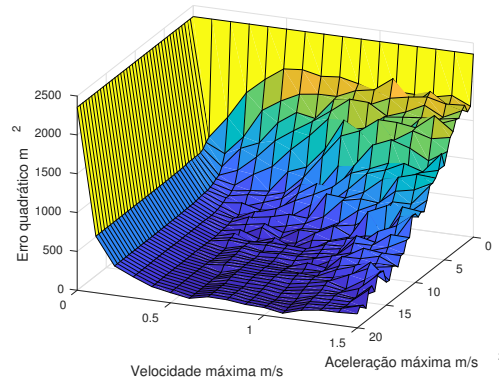


Figura 5: Levantamento de requisito de velocidade e aceleração máxima para o robô atacante

a figura, que trata da relação do erro quadrático do robô em relação à trajetória de referência (1), constata-se que não basta somente aumentar a velocidade máxima do robô. A aceleração máxima também exerce influência considerável no desempenho, e isso pode ser constatado intuitivamente. Um robô que possui uma velocidade máxima muito alta para efetuar as curvas, tenderia a ter mais dificuldade em desacelerar quando preciso.

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 máxima de $0,6m/s$ e uma aceleração máxima de $8,0m/s^2$, ponto em que o erro quadrático é de $157m^2$. Esse valor permanece quase que inalterado nos demais pontos da curva.

Seguindo a sequência de requisitos, levantaram-se os fatores ω_n e ξ 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

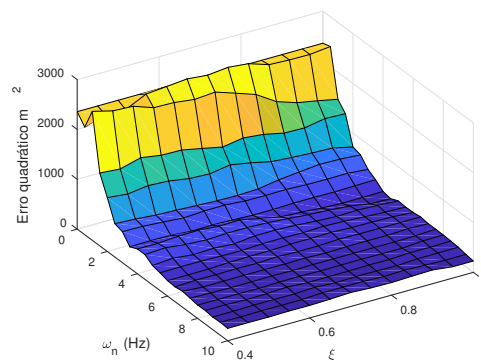


Figura 6: Levantamento de requisito de ω_n e ξ para o robô atacante

robô goleiro: a frequência natural do sistema de segunda ordem fazendo diferença significativa no desempenho, enquanto o fator de amortecimento faz pouca diferença. Nesse caso, adotou-se como requisito mínimo $\omega_n = 5Hz$ e no mínimo $\xi = 0.6$. O valor de ξ foi escolhido com o objetivo de conferir uma boa margem de fase ao sistema. 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. Nesse ponto escolhido, o valor de erro quadrático obtido é de $367,3m^2$. Esse valor de erro permanece praticamente constante para demais valores de ξ e ω_n .

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

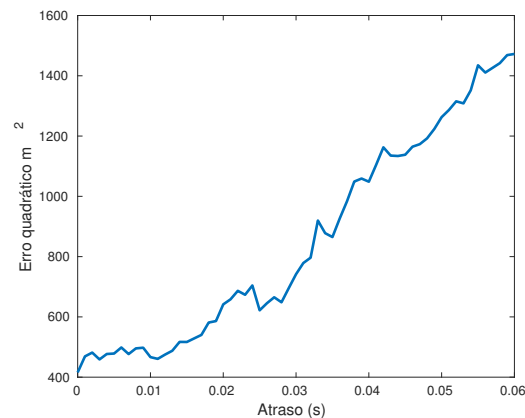


Figura 7: Levantamento de requisito de atraso para o robô atacante

requisito, adotou-se o valor de atraso máximo para a malha de controle como sendo de $0,013s$. Nesse ponto, o valor de erro quadrático obtido é de $487,7m^2$. Para os demais pontos, o erro passa a aumentar em uma taxa considerável.

2.2.3 Resumo dos Requisitos Encontrados

A tabela 2 resume os requisitos obtidos até então.

Tabela 2: Resumo dos requisitos levantados

Função do robô	Velocidade máxima (m/s)	Aceleração máxima (m/s^2)	ω_n máximo (Hz)	ξ mínimo	Atraso máximo (s)
Atacante	0,6	8,0	5,0	0,6	0,013
Goleiro	0,7	6,0	2,5	0,6	0,02

2.3 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.

2.3.1 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. Na prática, as baterias convencionais utilizadas para um robô de pequeno porte como um VSS consistem de lipos de 2 células (7,4V). Para efetuar o cálculo de velocidade máxima atingida pelo motor, fez-se a consideração de que na maior parte da partida apenas 6,0V são aplicados aos terminais dos motores. Portanto, a velocidade atingida máxima corresponderia à nominal de 630 rpm (9). Sabe-se que, porém, o motor pode suportar velocidades maiores que essa. No entanto, essa prática não é recomendada pois pode-se encurtar o tempo de vida do

componente elétrico.

$$\omega_{SI} = \omega_{rpm} \frac{2\pi}{60} \Rightarrow \omega_{SI} = 65,97 \text{ rad/s} \quad (9)$$

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

$$v = \omega R \Rightarrow v = 1,979 \text{ m/s} \quad (10)$$

Onde v é a velocidade linear e R o raio das rodas do robô. Portanto, o sistema atende a especificação de velocidade máxima, tanto para o caso do robô goleiro quanto para o caso do robô atacante.

2.3.2 Verificação dos Parâmetros de Segunda Ordem

Além disso, verificaram-se por meio do levantamento feito no artigo que foi aceito para publicação na conferência LARS (Simpósio Latino Americano de Robótica) VERONESE *et al.* (2017) os valores atuais dos parâmetros de segunda ordem do robô, com o objetivo de verificar se os requisitos levantados estão sendo atendidos. Para a obtenção analítica desses valores, para fins de simplificação, desprezaram-se nessa análise os efeitos de acoplamento entre as rodas. O modelo para os motores utilizados no robô foi obtido a partir do artigo OKUYAMA *et al.* (2015). Considerando o vetor de estados \mathbf{x} como sendo as velocidades de ambas as rodas do robô, pode-se representar o sistema robótico em um espaço de estados (DORF and BISHOP (1998), pág. 497) na forma descrita em (11). A partir da planta do robô, pode-se obter a função de transferência de velocidades comandadas para velocidades reais em ambas as rodas.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (11)$$

As matrizes do modelo de espaço de estados podem ser obtidas a partir do levantamento feito no artigo VERONESE *et al.* (2017). Assim, tem-se o descrito em (12).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -6,4855 & 0,9460 \\ 0,9460 & -6,4855 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 68,1908 & -9,9463 \\ -9,9463 & 68,1908 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para a consideração de desacoplamento, realizam-se simplificações (13).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -6,4855 & 0 \\ 0 & -6,4855 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 68,1908 & 0 \\ 0 & 68,1908 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Por fim, como as equações agora estão desacopladas, podem-se desenvolver as funções de transferência da planta a partir de (11) considerando os sinais de controle separados, conforme mostrado em (14).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r \\ u_l \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde u_r e u_l correspondem aos sinais de controle enviados às rodas direita e esquerda, respectivamente. O desenvolvimento da equação está descrito em (15).

$$\dot{\omega}_r = a\omega_r + bu_r \quad (15)$$

Onde ω_r corresponde à velocidade angular da roda direita do robô. Desenvolvendo, finalmente, a função de transferência da planta desacoplada pode ser obtida (16).

$$G(s) = \frac{\omega_r(s)}{U_r(s)} = \frac{b}{s - a} \quad (16)$$

A partir da planta, deve-se definir um controlador que, no caso do robô real, trata-se de um proporcional-integrativo (17). O controlador foi utilizado na sua forma digital com método de integração retangular. As constantes analógicas equivalentes utilizadas atualmente no robô foram $K_p = 0,5$ e $K_i = 200$.

$$u = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt, e(t) = x_{referencia} - x(t) \Rightarrow C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (17)$$

Onde $e(t)$ é o sinal de erro. Deve-se ainda considerar o efeito da amostragem da implementação digital. Esse atraso (FRANKLIN *et al.* (1993)) pode ser incluído na malha por meio das aproximações de Padé (18). A taxa de amostragem utilizada foi de $T = 0,005s$.

$$D(s) = e^{-s\frac{T}{2}} \simeq \frac{4 - sT}{4 + sT} \quad (18)$$

A função de transferência global da malha de controle em malha fechada pode ser encontrada. Por fim, substituindo todas as constantes utilizadas, chega-se em (19).

$$G_{mf}(s) = \frac{D(s)C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)D(s)} \Rightarrow G_{mf}(s) = \frac{\omega_r(s)}{\omega_{referencia}(s)} = \frac{-0,001337s^2 + 855,7}{0,00125s^3 + 1,007s^2 + 6,486s + 855,7} \quad (19)$$

Onde $G_{mf}(s)$ corresponde à função de transferência de malha fechada. O diagrama de Bode (NISE (2011), pág. 537) da função foi obtido na figura 8. Para a análise do diagrama, utilizou-se inicialmente o pico de ressonância (OGATA (2010),

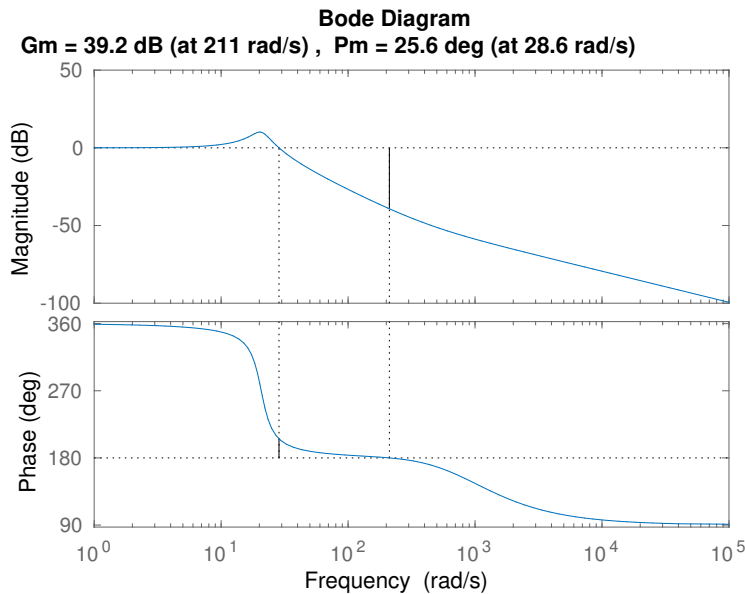


Figura 8: Diagrama de bode da função de transferência global do robô em malha fechada

pág. 412) do diagrama de Bode e comparou-se com o pico de ressonância obtido a partir do sistema de segunda ordem descrito pelos requisitos (20).

$$P_r = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{1}{2 \cdot 0,6\sqrt{1-0,6^2}} \simeq 1,04 = 0,34 \text{ dB} \quad (20)$$

O pico de ressonância obtido pelo diagrama de Bode da função de transferência em (19) foi de 10,42 dB . Nota-se que o pico está muito acima do esperado pelo requisito. A banda passante do robô a partir do diagrama de Bode foi de 31,61 rad/s. Por fim, a partir do ω_n obtido pelo levantamento, pode-se obter um requisito de banda passante para $\omega_n = 5Hz$ e $\xi = 0,6$ (21).

$$BW = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2 + \sqrt{2 - 4\xi^2 + 4\xi^4}} \Rightarrow BW = 36,07 \text{ rad/s} \quad (21)$$

A partir da margem de fase obtida pelo diagrama de Bode (25,6 graus), pode-se concluir que o robô encontra-se bem próximo de uma situação instável. Além disso, os requisitos de pico de ressonância e de banda passante não foram atendidos, o que leva a uma conclusão: pode-se melhorar consideravelmente a margem de fase em que se encontra o sistema.

A partir do artigo VERONESE *et al.* (2017), 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

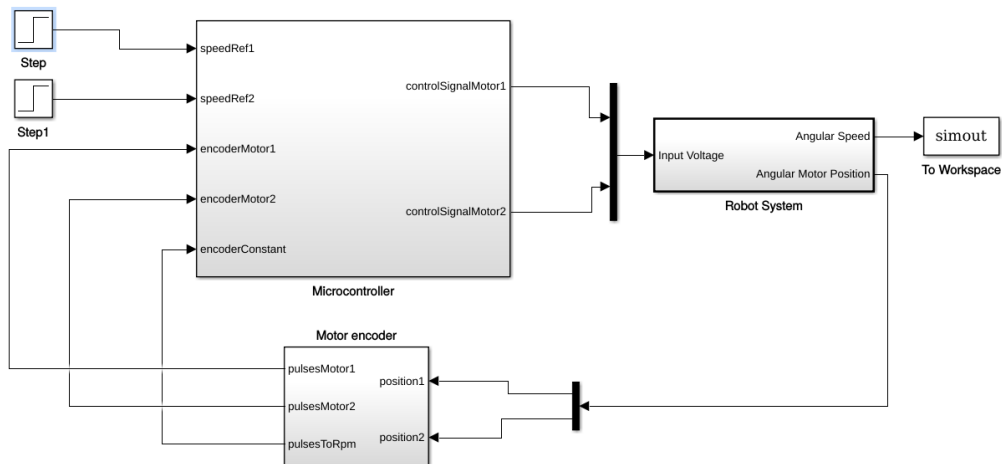


Figura 9: Simulador não-linear do robô

bloco consiste no bloco do microcontrolador, onde está o código embarcado do sistema e toda a conversão de informação eletrônica (baixa potência) para elétrica (alta potência). 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 ($\simeq 10,47rad/s$) 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 situação próxima da instabilidade, apresentando resposta consideravelmente oscilatória e com um grande sobressinal.

3. CONCLUSÕES

Por meio desse trabalho, é possível se ter uma melhor compreensão do problema do Very Small Size Soccer. Os gráficos mostram o efeito da variação de cada um dos parâmetros escolhidos no desempenho dos sistemas.

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, que a margem de fase do sistema precisa ser melhorada, com o objetivo de atender aos requisitos levantados.

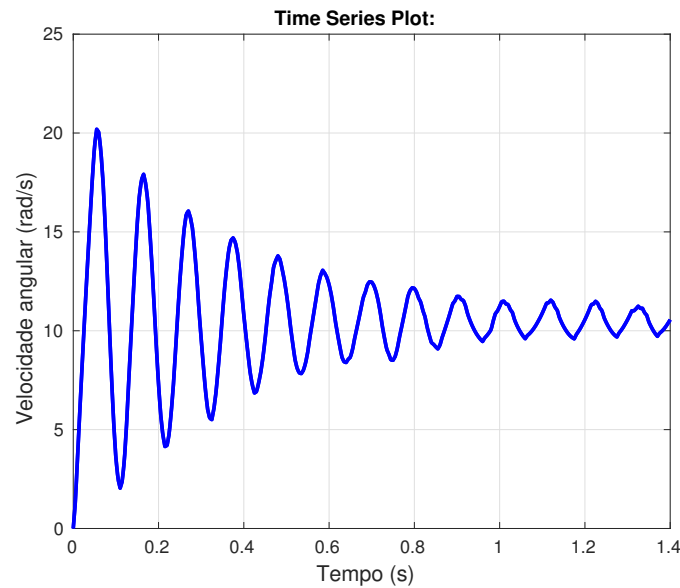


Figura 10: Resposta ao degrau do robô

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, por prover ajuda financeira para realizar esse projeto, à ITAndroids, por compartilhar conhecimento e ferramentas que tornam esse projeto possível e ao aluno Samuel Cerqueira, que construiu a primeira versão do simulador dos robôs.

5. REFERÊNCIAS

- 7th Latin American IEEE Robotics Competition, 2008. "Rules for the ieev very small competition". http://www.cbrobotica.org/wp-content/uploads/2014/03/VerySmall12008_en.pdf. Accessed: 2017-08-07.
- DORF, R.C. and BISHOP, H.R., 1998. *Sistemas de Controle Modernos*. LTC.
- FRANKLIN, G.F., POWELL, J.D. and NAEINI, A.E., 1993. *Feedback Control of Dynamic Systems, 3rd Edition*. Addison-Wesley Publishing Company.
- MITRE, 2014. *Systems Engineering Guide*. MITRE.
- NASA, 2007. *Systems Engineering Handbook*. NASA.
- NISE, N.S., 2011. *Control Systems Engineering, 6th Edition*. Wiley.
- OGATA, K., 2010. *Modern Control Engineering, 5th edition*. Prentice Hall.
- OKUYAMA, I.F., MAXIMO, M.R.O.A. and PINTO, S.C., 2015. "System identification of a hobby dc motor using a low cost acquisition setup". *Sociedade Brasileira de Automação Inteligente (SBAI)*.
- PINHEIRO, F.C.R., PINTO, S.C., OKUYAMA, I.F., MAXIMO, M.R.O.A. and VIANA, N.L., 2016. "Performance requirements derivation for ieev very small size competition". *"Latin American Robotics Symposium (LARS)"*.
- VERONESE, P.B., OKUYAMA, I.F., PINHEIRO, F.C.R., MAXIMO, M.R.O.A. and GÓES, L.C.S., 2017. "Experimental measurement of parameters for modeling a differential drive soccer robot". *"Proceedings of the Latin American Robotics Symposium (LARS)"*.