

ESTUDO DE CASO EM ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM BRAÇO ROBÓTICO

Danilo Pereira dos Reis

Graduando em Engenharia Elétrica,
Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS

Heber Silva dos Santos

Graduando em Engenharia Elétrica,
Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS

Pedro Paulo Larcher Rodrigues

Graduando em Engenharia Elétrica,
Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS

Rogério Henrique Zuliani Scheolin

Esp. e Bacharel em Engenharia Elétrica – UNESP;
Docente das Faculdades Integradas de Três Lagoas - FITL/AEMS

RESUMO

Este artigo visa descrever de maneira sucinta a construção do braço robótico que é conectado a um sistema eletrônico analógico baseado no circuito integrado (CI) 7555 controlando o braço robótico de maneira a não possuir variações no resultado gráfico. O braço é acionado por servomotores que são controlados manualmente por meio de uma resistência variável. Com uso de um circuito integrado, ele gera um sinal pulse width modulation (PWM) possibilitando assim a movimentação do braço robótico, construído a partir de peças acrílicas, diversos itens eletrônicos, entre outros componentes como potenciômetro, capacitores, diodos que são conectados a cabos para alimentação do sistema e protoboards ou placa de circuito impresso em sua montagem. Com as ferramentas matemáticas baseadas nos critérios de Routh Hurwitz e Root-Locus, para conseguir os gráficos de estabilidade com auxílio de um software de alta performance e analisarmos a estabilidade do sistema e das movimentações rotacionárias do braço robótico. A estabilidade é buscada em todo campo desde o desenvolvimento até a operação, este trabalho visa comprovar se um sistema eletrônico analógico é estável ou não.

PALAVRAS-CHAVE: braço robótico; CI7555; BIBO estabilidade; *Root-Locus*.

1 INTRODUÇÃO

Desde sempre a humanidade vem buscando meios de facilitar e aperfeiçoar suas tarefas sejam diárias, ou específicas em seus trabalhos, porém, nem todas essas artimanhas saem como esperado, a estabilidade é o ponto chave para obtenção dos melhores resultados, sejam dos sistemas puramente eletrônicos, eletromecânicos, somente mecânicos ou estruturais que por sua vez variam de situação para situação, podendo até ter resultados catastróficos. Um exemplo de estabilidade é o sistema de controle de altitude automático dos aviões. O sistema se

caracteriza como estável, quando ocorrem ventos perturbadores e o avião continua na mesma altitude. Caso seja instável, a altitude cairá indeterminadamente podendo assim se chocar com a superfície terrestre.

Ela está diretamente ligada ao desempenho dos sistemas, devem-se considerar as diversas variáveis para que não haja problemas posteriores, o sistema estável tem como principal característica as entradas variantes para apenas uma resposta de saída. Podem-se defini-la de duas maneiras: estabilidade absoluta, quando um sistema é estável ou não e estabilidade relativa, quando um sistema estável pode-se atribuir graus de estabilidade.

Cada vez mais se busca facilidade e perfeição para realização de nossas tarefas, e necessita-se que esses meios sejam de total confiança. Os sistemas precisam estar preparados para as inúmeras variáveis que possam instabiliza-los, caso isso ocorra, por menor que seja a variação fora do previsto esse sistema tende a apresentar falhas na execução da tarefa, ocasionando um desgaste na estrutura e posteriormente um colapso.

A estabilidade é o ponto crucial de qualquer sistema, sendo assim, este trabalho visa à construção de um sistema para controle de um braço robótico, acionado por servomotores e controlado através de resistências variáveis e mostrar graficamente, após cálculos matemáticos, se esse sistema todo é estável ou não.

1.1 Circuito Integrado (CI) 7555

Um dos circuitos integrados mais versáteis já fabricados e utilizados em projetos é o CI 7555 (Figura 1), projetado para reunir funções muito usadas de maneira simples e exigir poucos periféricos. Suas aplicações incluem sincronismo de precisão, geração de pulso, sincronismo sequencial, geração de atraso de tempo, modulação por largura de pulso, modulação da posição do pulso, etc.

Figura 1. Circuito integrado 7555.

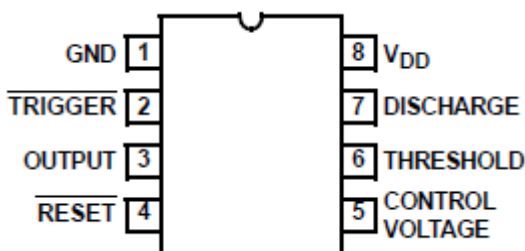


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

“Especificamente, o CI7555 é um controlador estável capaz de produzir atrasos ou frequências de tempo precisos. No modo de um disparo, a largura de pulso de cada circuito é precisamente controlada por um resistor externo e um capacitor. Para uma operação estável como um oscilador, a frequência de operação livre e o ciclo de trabalho são controlados com precisão por dois resistores externos e um capacitor” (INTERSIL, 2016. p.1). Conforme Figura 2, pode-se observar a descrição dos pinos de acordo com o datasheet do fabricante.

No projeto utilizou-se o circuito integrado 7555 em conjunto com a resistência variável para modular o pulso, sendo assim possibilita o controle da posição do servo motor, diante disso, o servo motor lê o tempo entre uma descarga e outra, para assim definir sua posição.

Figura 2. Descrição dos pinos do CI 7555.



Fonte: Extraído INTERSIL, 2016.

1.2 Servomotor

Servomotor é uma máquina mecânica ou eletromecânica, que apresenta movimento proporcional a um comando, em vez de girar ou se mover livremente sem um controle mais efetivo de posição como a maioria dos motores; servomotores são dispositivos de malha fechada, ou seja: recebem um sinal de controle; verificam a posição atual, atuam no sistema indo para a posição desejada.

“Em contraste com os motores contínuos que giram indefinidamente, o eixo dos servomotores possui a liberdade de apenas 180º graus (90 em cada direção), funciona exatamente como os tipos padrão, mas menores e são precisos quanto à posição. Posição “0” (pulso de 1,5 ms) é no meio, “90” (~ 2ms pulso) é todo para a direita, “-90” (pulso de ~1ms) é todo para a esquerda” (TOWERPRO, 2003. p. 1-2). Logo abaixo conforme Figura 3, vemos o servo que é utilizado no projeto.

Como em sua principal função, a movimentação do braço é de acordo com o ângulo referente ao tempo de pulso, e assim fazendo com que cada servo movimente as peças acrílicas e posicionando o braço robótico.

Figura 3. Serevomotor SG90



Fonte: Extraído TOWERPRO, 2003.

1.3 Estabilidade

A estabilidade de um sistema com retroação se relaciona diretamente com a localização das raízes da equação característica da função de transferência do sistema. O método de Routh-Hurwitz é introduzido como uma ferramenta útil para determinar a estabilidade do sistema. A técnica permite calcular o número de raízes da equação característica no semiplano da direita sem calcular efetivamente os valores das raízes. Assim, pode-se determinar a estabilidade sem o encargo adicional de determinar a localização das raízes características. Isto fornece um método de projeto para se determinar a localização das raízes características. Isto fornece um método de projeto para se determinar valores de certos parâmetros do sistema que conduzirão à estabilidade a malha fechada. Para sistema estáveis será introduzida a noção de estabilidade relativa, que permite calcular o grau de estabilidade (DORF; BISHOP, 1998).

1.4 Método de *Root-Locus* (Método do Lugar das Raízes)

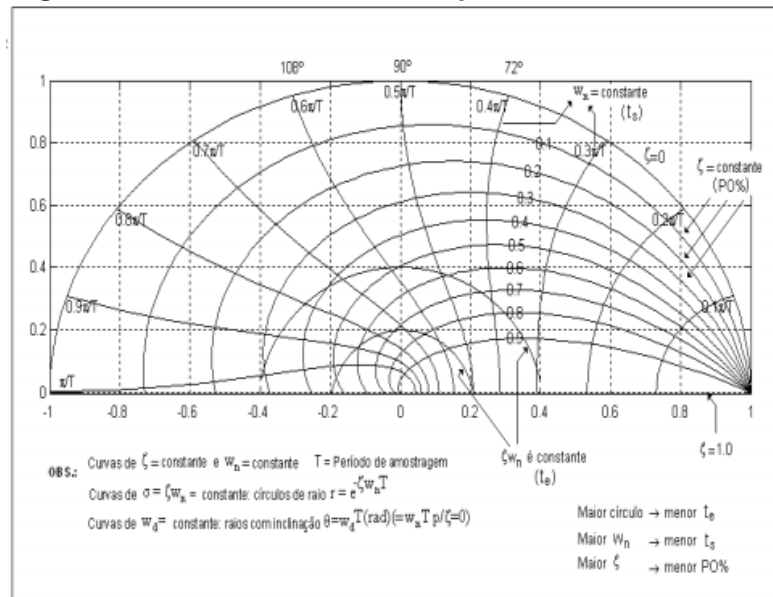
Essa prática tem sido utilizada e melhorada extensamente dentro da engenharia de controle. Ela é um método gráfico de esboçar, no plano S , o lugar geométrico das raízes a medida da variação de um parâmetro de entrada. Dito isso, esse método do lugar das raízes tende a oferecer ao engenheiro uma sensibilidade das raízes do sistema. A técnica usada em conjunto com o critério de Routh-Hurwitz é usada com grande vantagem (EVANS, 1954 apud ROBERT, 1996).

O método abordado atribui informações gráficas, pode-ser usada a fim de obter um esboço aproximado em relação à obtenção de informação qualitativa referente à estabilidade e desempenho do sistema.

Segundo OGATA (1994), o método do lugar das raízes desenvolvido para sistemas de tempo contínuo pode ser estendido para sistemas de tempo discreto

sem modificações, exceto que o limite de estabilidade é alterado do eixo Y no plano S para o círculo unitário no plano Z, conforme figura 4. A razão pela qual o método do lugar das raízes pode ser estendido a sistemas de tempo discreto é que a equação característica para os sistemas de tempo discreto é da mesma forma que para o sistema de tempo contínuo no plano S.

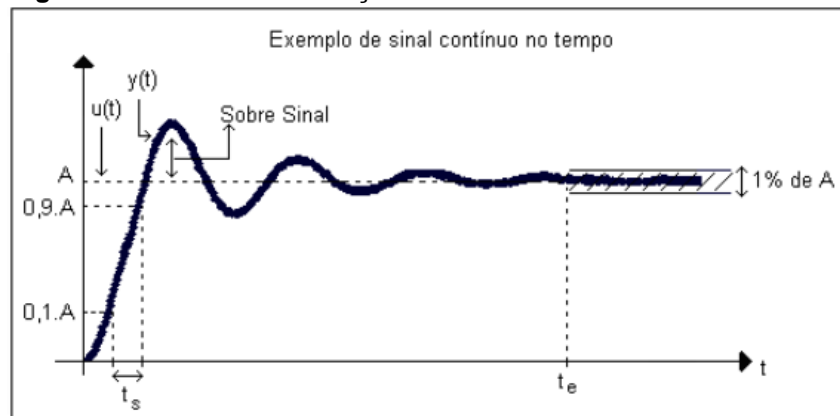
Figura 4. Limite de estabilidade no plano Z.



Fonte: Extraído UNESP, 2013.

Outro gráfico de simulação de sistemas, representado na figura 5, pode auxiliar para melhor enxergar o resultado da localização da raiz.

Figura 5. Gráfico de Simulação de Sistema



Tempo de Subida (t_s) – Tempo que leva para o sinal sair de 10% até atingir 90%; Sobre Sinal (P.O) – Erro ou parte do sinal que ultrapasse os 100%; Tempo de Estabelecimento (t_e) – Tempo que leva para o sinal estabilizar em uma faixa de 1%, 0,5% para cima e 0,5% para baixo.

Fonte: Extraído UNESP, 2013.

2 OBJETIVOS

O intuito do artigo é provar a estabilidade do sistema de maneira técnica, onde se pode ter contato com os resultados através de gráficos e usando um protótipo de braço robótico como exemplo para estabilidade de um sistema analógico, a mesma se dá por meio da localização das raízes do sistema dentro de um círculo de raio unitário. Para se provar a estabilidade foi utilizado métodos matemáticos, com intuito de obter a resolução dos cálculos como routh-hurwitz e root-locus que mostra a resposta gráfica.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para desenvolvimento do presente trabalho foi definido as equações para designar os componentes necessários, tais como resistores e capacitores, afim dos mesmos controlarem o acionamento do micro servomotor e conseqüentemente os movimentos do braço sem que possa haver erros, falhas ou atrasos.

As equações 1 e 2, foram utilizadas de forma a encontrar os valores para as resistências, o tempo de alta foi definido pelo datasheet do componente, o capacitor fixo e somente resta a incógnita do resistor.

A equação 1 foi utilizada de forma a encontrar o resistor que limita o tempo do pulso afim de não ultrapassar o tempo de máximo, estabelecido pelo fabricante.

$$\text{Tempo máximo: } 0,7 * (R1 + 50k) * C \quad (1)$$

Sendo:

Tempo máximo: tempo máximo de resposta do micro servomotor;

R1: Resistor;

C: Capacitor.

A equação 2 foi utilizada de forma a encontrar o resistor que limita o tempo do pulso afim de não ser inferior ao tempo de mínima, estabelecido pelo fabricante.

$$\text{Tempo mínimo: } 0,7 * R2 * C \quad (2)$$

Sendo:

Tempo mínimo: tempo mínimo de resposta do micro servomotor;

R2: Resistor;

C: Capacitor.

Logo em seguida, fez-se necessário definir os componentes eletrônicos para construção do protótipo do braço robótico. Os componentes foram escolhidos de forma a respeitar a largura de pulso aceita pelo servomotor e as equações do 7555. Para o servomotor utilizado, tem-se que o tempo em alta equivalente à posição 0° de 600µs e para 180° 1200 µs, segundo o *datasheet*. Como resistência variável, foram utilizados potenciômetros de 50 kΩ.

Escolhida a resistência a ser utilizada, faz-se os cálculos de tempo novamente para determinar o tempo real do PWM para o potenciômetro zerado e em sua resistência máxima.

Pode-se perceber então que este resistor foi suficiente para garantir o ângulo 0°, pois o tempo em alta foi menor que 600 µs. Entretanto, para que o motor saia da posição 0° foi necessário que a resistência aumente a ponto de fazer com o que o tempo ultrapasse os 600 µs.

Como já dito anteriormente, apenas o potenciômetro por si só foi suficiente para atingir a marca dos 1200 µs, portanto, a soma de R1 com o potenciômetro com sua resistência também foi suficiente para que o servomotor atinja os 180°. Como a posição máxima corresponde a 1200 µs, o aumento da resistência pelo potenciômetro a partir deste ponto não influencia na posição do servomotor.

O servomotor conta com um sistema de controle com realimentação e para que seja possível este ler a posição final em que se encontra, foi necessário um tempo razoável em baixa no PWM para que o servomotor chegue a sua posição final antes de receber outra instrução.

O tempo de 15,4 ms foi suficiente para que o servomotor faça seu movimento e o controle atue.

O capacitor C₂, que foi utilizado apenas como filtro, foi de 12 nF, como indica o *datasheet* do mesmo. O diodo utilizado um diodo rápido (1N4148), por conta da alta frequência do circuito.

A Tabela 1 mostra, em resumo, os componentes utilizados para a confecção do braço robótico.

Tabela 1 – Lista de Componentes	
Componentes	Quantidade
Kit braço robótico	1
Servomotores	4
Potenciômetros	4

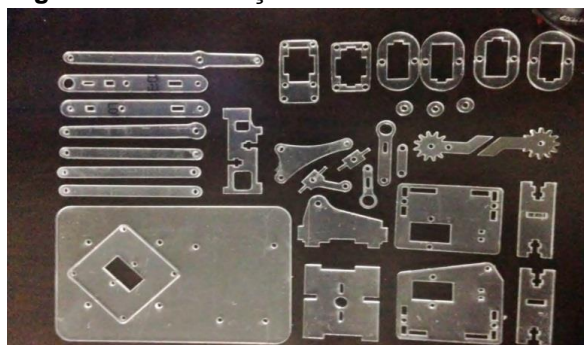
Continuação da Tabela 1.	
CI 7555	4
Capacitor (100nF)	4
Capacitor (12nF)	4
Resistor de 8k Ω	4
Resistor de 220k Ω	4
Diodo 1N4148	4

Tabela: Elaborado pelo próprio autor.

Para a montagem do braço robótico, seguiram-se os seis passos descritos a seguir.

1º Passo: Montar o kit do braço robótico, este kit vem desmontado conforme Figura 6 a seguir, acompanhado de um manual de montagem e componentes extras.

Figura 6. Kit do braço robótico desmontado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2º Passo: Depois do braço montado conforme a Figura 7 abaixo fixando os servomotores, um na base, responsável pelo movimento giratório, dois nas laterais, um do lado esquerdo e outro do lado direito, onde se tornaram responsáveis pelos movimentos dos braços de abaixar e subir, por último o servo da pinça, que foi responsável por abrir e fecha-la.

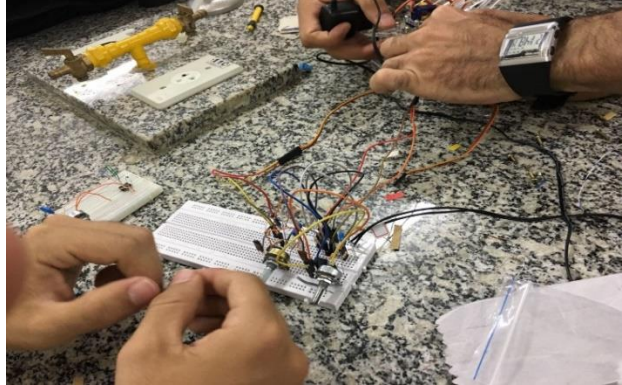
Figura 7. Braço robótico montado e com servos motores fixados.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3º Passo: Depois de montado o braço e fixados os servos motores em seus devidos lugares, monta-se o sistema eletrônico no *protoboard* conforme a Figura 8.

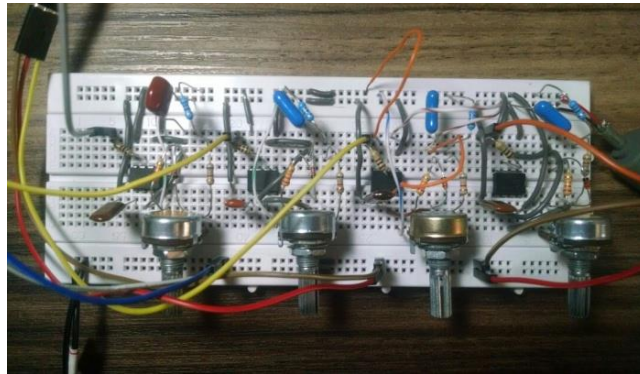
Figura 8. Montagem do sistema na protoboard.



Fonte: Elaborado pelos autores.

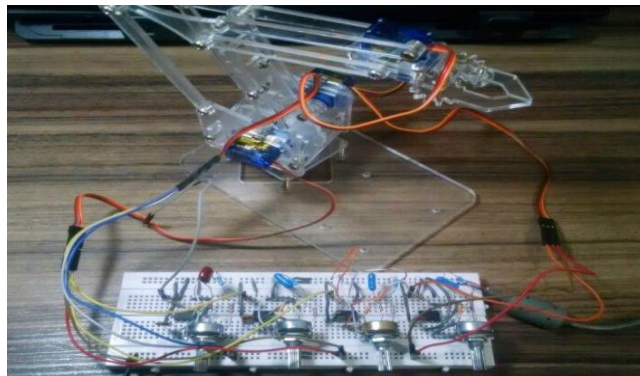
4º Passo: Conforme mostra a Figura 9, os sistemas de comando dos servomotores ficaram prontos, como podemos ver o sistema possui quatro potenciômetros um para cada servo do braço.

Figura 9. Sistemas de controle dos servos motores.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10. Conexão entre os servos e o sistema de controle.

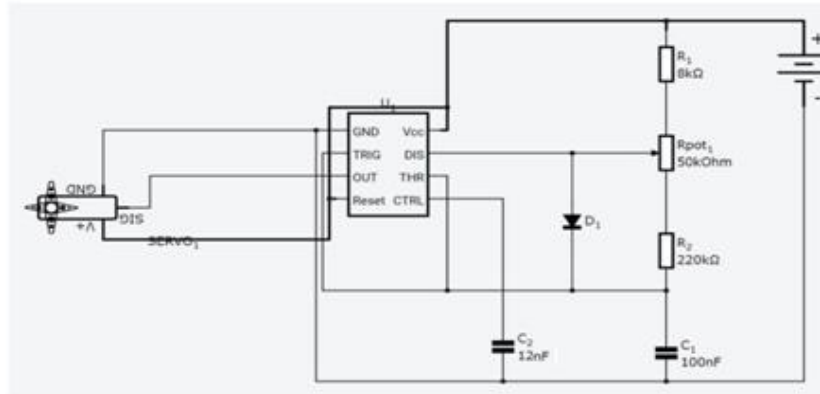


Fonte: Elaborado pelos autores.

5º Passo: Nesse passo foi realizada a ligação entre os servos e o sistema de controle, conforme a Figura 10.

A Figura 11 mostra o sistema utilizado para acionar o servomotor.

Figura 11. Sistema eletrônico de acionamento do servomotor.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nesta configuração, o pino TRIG foi conectado diretamente ao pino THR, fazendo com que o sistema seja ligado e “resetado” automaticamente. O capacitor C1 encontra-se inicialmente descarregado, deixando então os pinos TRIG e THR a 0 V. Assim, devido aos comparadores internos do 7555, OUT foi levada a Vcc. Neste momento o capacitor C1 começa a ser carregado através do potenciômetro (Rpot1) e do resistor R₁, passando pelo diodo, sem interferência do pino 7. Quando a tensão de C1 ultrapassar 2/3 de Vcc, a saída OUT vai para 0 V, o pino 7 foi aterrado e o capacitor C1 passa a ser descarregado através do resistor R2. Quando a tensão de C1 atingir 1/3 de Vcc, a saída foi elevada novamente a Vcc e C1 volta a ser carregado, repetindo o processo anterior. Isto ocorre até que se interrompa a alimentação do sistema ou que o pino 4 seja aterrado. O pino 5 não foi utilizado nesta configuração, então coloca-se um capacitor apenas para servir de filtro e não deixar o pino flutuando. O resistor R1 serve para impedir um curto-circuito entre a fonte e o pino 7, que foi aterrado, quando o potenciômetro estiver com resistência zerada. O sistema da Figura 11 foi reproduzido quatro vezes, já que foram acionados quatro servomotores.

Após finalizar os cálculos e construção do protótipo, contou-se com auxílio do software MATLAB (MATrix LABoratory) para obtenção dos gráficos por meio dos passos (1) apresenta-se a função de transferência $G(s)=1/(s+1)$ representado através da Figura 12, função essa dada como única para todo motor de corrente

contínua; (2) obter função $G(z)$, para isso precisa-se definir um valor para o Tempo, valor esse definido como $T=1$, após isso, através do comando “c2d (sys,T,'z')”, o software dá a função $G(z)$, representada na Figura 13; (3) para obter a localização da raiz dentro do *Root-Locus*, executou os comandos “rlocus (sys1)” e “zgrid” e (4) para obter o gráfico de simulação do sistema, executou o comando “stepplot (sys1)”.

Figura 12. Função de transferência no sistema inserida.

```
>> s = tf('s')
s =
    s
Continuous-time transfer function.
>> % Função G(s)
>> sys= 1/(s+1)
sys =
    1
-----
    s + 1
Continuous-time transfer function.
```

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 13. Função $G(z)$.

```
>> % Função G(z) para T=1
>> T=1
T =
    1
>> sys1= c2d(sys,T,'z')
sys1 =
    0.6321
-----
    z - 0.3679
Sample time: 1 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Fonte: Elaborado pelos autores.

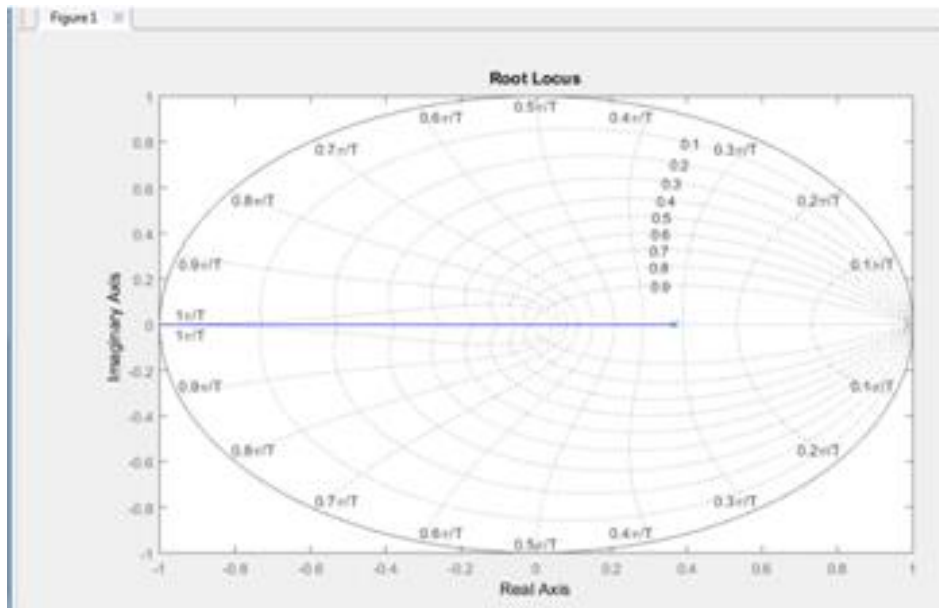
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa etapa apresentam-se os resultados dos gráficos de *Root-Locus*, onde foi determinado a localização da raiz do sistema e simulação do mesmo, de acordo com os métodos apresentados e comandos dentro do programa MATLAB temos a exemplificação gráfica da localização da raiz dentro do *Root-Locus* (Figura 14).

Nota-se que a localização da raiz esta a (0,4;0), ou seja, 0,4 no eixo X (*real axis*) e 0 no eixo Y (*imaginary axis*), isso determina quando foi meu tempo de estabelecimento no gráfico de simulação (Figura 15).

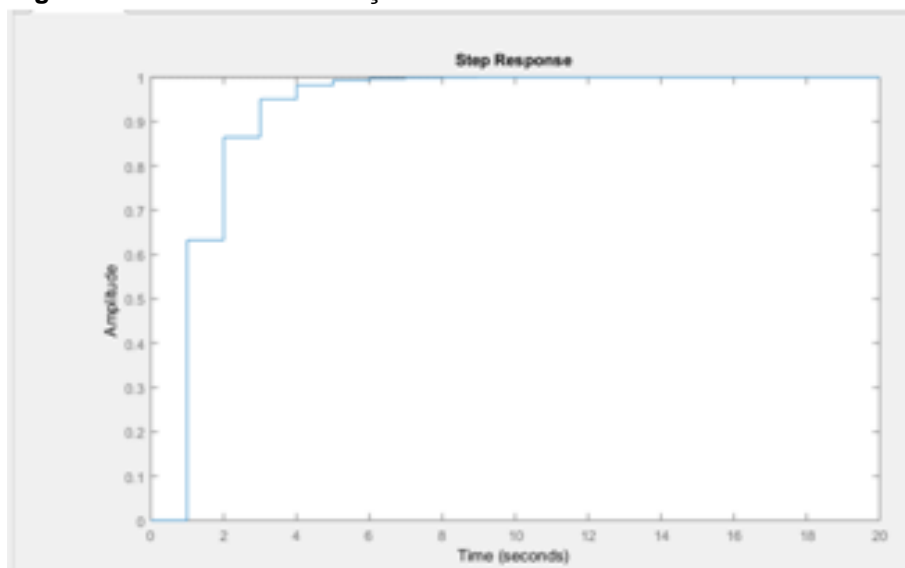
O Gráfico 15 foi simulação do Gráfico 14 baseando-se na Figura 5 em conjunto com a resposta do gráfico da Figura 16, tem-se a conclusão de que o sistema tem um tempo de estabelecimento de 0,4 s, não possui sobre sinal (P.O) e conseqüentemente seu tempo de estabelecimento foi de 0,4 s.

Figura 14. Resposta Root-Locus.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 15. Gráfico de simulação do sistema.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5 CONCLUSÃO

Cada dia busca-se meios para avançar tecnologicamente, e devido a isso nossos sistemas necessitam ter mais confiança e exatidão na hora de realizar uma tarefa. Esses sistemas são obrigados a estarem preparados para quaisquer variáveis, caso isso não ocorra, ele irá expor falhas ao longo do tempo. Esse trabalho visa à construção de um sistema para controle de um braço robótico,

acionado e controlado através de componentes eletrônicos e amostragem gráfica, após cálculos matemáticos, se esse sistema todo é estável ou não.

Essa amostragem é decorrente do Método de *Root-Locus*, onde através disso localiza-se o lugar das raízes da equação, apontadas sobre um círculo de raio unitário no plano Z. A localização dessa raiz deu-se sobre o eixo X, próximo ao valor de 0,4 s, e com isso, por meio de outro gráfico de simulação, este sistema de controle proposto tem um tempo de estabelecimento próximo de 0,4 s.

Dito isso, esse trabalho pode ser de grande auxílio para futuros projetos de sistemas analógicos e digitais, pois segue os mesmos princípios para simulação gráfica da estabilidade de um sistema, e com isso podemos concluir que esse trabalho provou ter um sistema analógico estável dentro de seus limites físicos, pois como já citado, seu tempo de estabelecimento é aproximadamente 0,4 s.

REFERÊNCIAS

CLARK, ROBERT N. Control System Dynamics, 1a ed., Nova Iorque – USA, p. 215, 1996.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Sistemas de Controle Modernos, 8a ed., LTC, Rio de Janeiro – BR, p. 230, 1998.

INTERSIL. ICM7555. 2016. Disponível em: <<https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/icm7/icm7555-56.pdf>>. Acesso em 05 abr de 2018.

OGATA, K. – Discrete-time Control Systems, 2a ed., Prentice-Hall – USA, p. 173, 1994.

TOWERPRO. Servomotor SG90. 2003. Disponível em: <<http://akizukidenshi.com/download/ds/towerpro/SG90.pdf>>. Acesso em 05 abr de 2018.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP. Apostila de Controle Digital. 2013. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lpc1672/controle-digital.pdf>>. Acesso em 05 abr de 2018.