

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### **UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO NA SINTONIA DOS PARÂMETROS DE UM CONTROLADOR PID PARA O CONTROLE DE UM SISTEMA *BALL AND BEAM***

GUILHERME C. DA SILVA<sup>1</sup>, BRUNO R. GAMINO<sup>2</sup>, GRACILIANO A. DAMAZO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Bacharelado em Engenharia da Computação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Birigui, cardoso.guilherme1@aluno.ifsp.edu.br

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, Professor, IFSP, Campus Birigui, bruno.rafael@ifsp.edu.br

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, Professor, IFSP, Campus Birigui, graciliano@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.08.02.02-4 Programação Linear, Não-Linear, Mista e Dinâmica

**RESUMO:** O presente trabalho propôs utilizar o Algoritmo Genético para sintonizar os parâmetros de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) aplicado a um sistema *Ball and Beam*, que é considerado um sistema não linear e instável em malha aberta. O sistema *ball and beam* possui uma viga em que, uma bola é deslocada sobre ela, com a viga tendo a sua posição angular constantemente modificada a fim de se controlar a posição da bola. Para realizar o controle do sistema foi utilizado um controlador PID, sendo que seus parâmetros foram ajustados pela meta-heurística algoritmo genético. O algoritmo genético é uma técnica que se adapta aos tipos de problemas de otimização existentes, na qual explora o universo de soluções possíveis para o problema e retorna a melhor solução encontrada. Para fins de comparação, também foi realizado a sintonia dos parâmetros do controlador PID a partir do método clássico de Ziegler-Nichols. Simulações computacionais foram realizadas e os resultados obtidos mostraram que os parâmetros encontrados pelo algoritmo genético proporcionaram melhor qualidade no controle do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmo Genético; Sistema *Ball and Beam*; Controlador PID; Meta-Heurísticas.

### **USE OF THE GENETIC ALGORITHM IN TUNING THE PARAMETERS OF A PID CONTROLLER TO CONTROL A BALL AND BEAM SYSTEM**

**ABSTRACT:** The present work proposed using the Genetic Algorithm to tune the parameters of a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller applied to a Ball and Beam system, which is considered a nonlinear and unstable open-loop system. The ball and beam system has a beam on which a ball is moved on it, with the beam having its angular position constantly modified in order to control the position of the ball. To control the system, a PID controller was used, and its parameters were adjusted by the genetic algorithm meta-heuristic. The genetic algorithm is a technique that adapts to the types of existing optimization problems, in which it explores the universe of possible solutions to the problem and returns the best solution found. For comparison purposes, the PID controller parameters were also tuned using the classic Ziegler-Nichols method. Computational simulations were carried out and the results obtained showed that the parameters found by the genetic algorithm provided better quality in system control.

**KEYWORDS:** Genetic Algorithm; Ball and Beam System; PID Controller; Metaheuristics.

### **INTRODUÇÃO**

O sistema *Ball and Beam* é considerado um dos sistemas clássicos presentes na engenharia de controle (Rana; Usman; Shareef, 2011). Consiste numa bola que se movimenta em apenas dois sentidos em cima de uma viga, esta última, apresenta sua posição angular sendo constantemente alterada por uma

alavanca que é acoplada a um servo motor, a fim de se obter o controle da posição da bola (Gomes; Figueiredo, 2020). Tal sistema é considerado instável em malha aberta devido ao fato de, sem as correções de erros durante seu funcionamento, a bola simplesmente cairá da viga no primeiro momento em que a posição angular da viga for modificada, desse modo, trata-se de um sistema que deve ser controlado em malha fechada, onde a saída do sistema (posição da bola) irá influenciar no sinal de entrada do controlador (retroalimentação), a fim de se corrigir os erros no sistema.

Apesar de, na literatura, existir uma variedade de controladores disponíveis para uso, pesquisas realizados por Takatsu, Itoh e Araki (1998) demonstraram que o controlador PID tem sido o mais utilizado, devido a sua característica de fácil manipulação pelos profissionais (Dorf; Bishop, 2001). A ação de ajuste dos parâmetros do PID é chamada de sintonia do controlador (Braga, 2016).

O PID pode ser sintonizado tanto por métodos determinísticos, como o método de Ziegler-Nichols, quanto por métodos estocásticos, como as meta-heurísticas. A meta-heurística Algoritmo Genético (AG) tem sido utilizada na literatura na solução de diferentes problemas e será aplicada neste trabalho na sintonia do controlador PID. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é a utilização da meta-heurística AG na sintonia dos parâmetros do controlador PID para o controle de um sistema *Ball and Beam*. Ademais, para fins de comparação dos resultados, a sintonia do PID também será realizada com a utilização do Segundo Método de Ziegler-Nichols.

## MATERIAL E MÉTODOS

Através do uso da mecânica lagrangeana, obteve-se a modelagem do sistema *ball and beam*. Na Figura 1 é mostrado a representação do sistema.

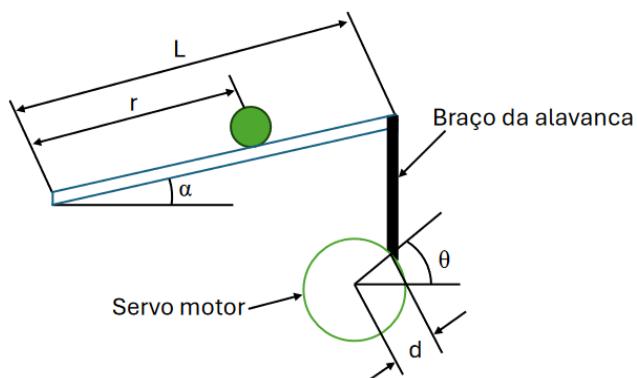


FIGURA 1. Representação do sistema *Ball and Beam*.

Na Equação (1) é mostrado a equação dinâmica que caracteriza o movimento da bola no sistema *ball and beam* (Yassuda, 2019; Tahir *et al.*, 2019; Mendoza *et al.*, 2022), onde  $J$  é o momento de inércia da bola,  $R$  é o raio da bola,  $m$  é a massa da bola,  $g$  é a aceleração gravitacional,  $\alpha$  é referente a posição angular da viga com relação a posição horizontal e  $r$  é a posição da bola na viga. Linearizando a Equação (1), existe ainda a relação existente entre a posição angular da viga com a posição horizontal do servomotor, mostrada na Equação (2), onde  $L$  é o comprimento da viga,  $\theta$  é a posição angular do motor e  $d$  é o raio da engrenagem que une o motor com o braço que sustenta a viga (Yassuda, 2019; Nascimento, 2021).

$$0 = \left(\frac{J}{R^2} + m\right)\ddot{r} + mg \sin \alpha - mr\dot{\alpha}^2 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{d}{L}\theta \quad (2)$$

Substituindo a Equação (2) na Equação (1), aplicando a transformada de Laplace e reorganizando a expressão, obtém-se a função de transferência  $G(s)$  evidenciada na Equação (3), onde  $R(s)$  é a posição da bola (saída do sistema) e  $\theta(s)$  é a posição angular do motor (entrada do sistema) (Yassuda, 2019).

$$G(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = \frac{-mgd}{L\left(\frac{J}{R^2}+m\right)s^2} \quad \left[\frac{m}{rad}\right] \quad (3)$$

Ademais, existe a função de transferência  $G_c(s)$  que caracteriza o controlador PID (Ogata, 2010), na Equação (4) é mostrado a expressão, onde  $K_p$  é o ganho proporcional,  $T_i$  é o tempo integral e  $T_d$  é o tempo derivativo.

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4)$$

Para a aplicação do Segundo Método de Ziegler-Nichols, leva-se em consideração o sistema em malha fechada, realizando testes, elevando apenas o ganho proporcional ( $K_p$ ) até que se encontre oscilações sustentadas por um ganho crítico  $K_{cr}$  e um período crítico  $P_{cr}$  (Ogata, 2010). Obtido essas especificações, o método é aplicado levando em consideração as regras propostas por Ziegler e Nichols.

O AG, proposto pela primeira vez por Holland (1992) foi desenvolvida baseando-se na Teoria da Evolução de Charles Darwin. Este algoritmo matemático probabilístico promove um artifício de otimização, de busca paralela e adaptativa sobre o princípio da sobrevivência do mais forte, que passa seus genes adiante (Pacheco, 1999). Na Figura 2 é mostrado o fluxograma do algoritmo genético.

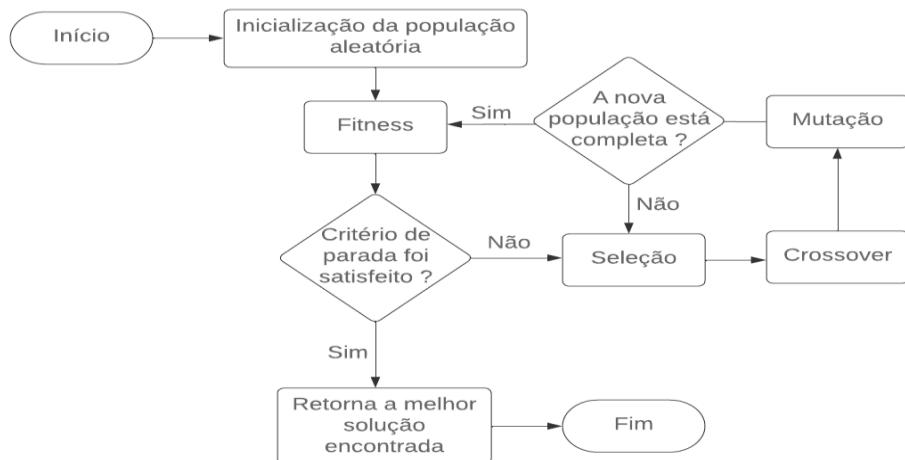


FIGURA 2. Fluxograma do Algoritmo Genético.

Conforme mostrado na Figura 2, o AG inicia com a geração da população de forma aleatória, onde os indivíduos são modelados genotípicamente em forma de ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  ( $K_i = K_p/T_i$ ) e  $K_d$  ( $K_d = K_p T_d$ ) (que são os parâmetros do controlador PID que o algoritmo retornará como solução) numa matriz, onde os valores dos ganhos são contínuos e estão no intervalo definido pelos limites mínimo e máximo estabelecidos para cada parâmetro. Com isso, os indivíduos são avaliados pela função *Fitness* que retorna as aptidões deles. Após a avaliação, se os critérios de parada não forem satisfeitos, ocorre um *looping* no algoritmo realizando as etapas de Seleção, *Crossover* e Mutação respectivamente (operadores genéticos), resultando em novos indivíduos e uma nova população. Satisfazendo-se os critérios de parada, retorna-se o melhor indivíduo, com seus genes e sua aptidão. Para a implementação do algoritmo, foi utilizado o software livre GNU Octave que é voltado à matemática computacional.

A função *Fitness* considerada é baseada no índice de desempenho IAE (integral do valor absoluto do erro), entretanto, na implementação realizada, ela calcula a somatória dos erros (ponto a ponto) no domínio do tempo ao longo da simulação do sistema. Os limites adotados para os parâmetros do PID foram: limite mínimo de 0,5 e limite máximo de 10 para o  $K_p$ , e para  $K_i$  e  $K_d$  foram usados limite mínimo sendo 0 e limite máximo igual a 3. Ademais, a população do AG possui 20 indivíduos, a taxa de mutação adotada é de 33%, sendo aplicada uma taxa de perturbação de 1% no parâmetro do indivíduo selecionado para a etapa de mutação, com igual probabilidade para aumentar ou diminuir o valor do parâmetro. O AG foi testado considerando-se 25 gerações da população em cada teste realizado. Por fim, para os testes preliminares, foram implementados dois tipos de métodos para a Seleção e *Crossover*, e um para a Mutação: Seleção por Torneio e Roleta, *Crossover* de Um e Dois Pontos e Mutação Uniforme (Kato; Paiva; Izidoro, 2021).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores adotados para os parâmetros do sistema *ball and beam* são evidenciados na Tabela 1, aplicando-os na Equação (3) foi obtida a função de transferência  $G(s)$  do sistema, mostrada na Equação (5).

Utilizando a função de transferência do sistema, foram realizadas simulações para analisar sua estabilidade e iniciar a aplicação dos métodos de controle. Na Figura 3 é mostrado a resposta do sistema *ball and beam* em malha fechada sem ação do controlador, a partir da aplicação de uma entrada do tipo degrau unitário.

TABELA 1. Valores adotados para os parâmetros do sistema *Ball and Beam*.

Parâmetros	Valores	Unidades (SI)
$m$	0,007	$K_g$
$R$	0,05	$m$
$L$	0,85	$m$
$g$	-9,81	$m/s^2$
$J$	$7 \cdot 10^{-6}$	$K_g \cdot m^2$
$d$	0,092	$m$

$$G(s) = \frac{0,7584}{s^2} \quad (5)$$

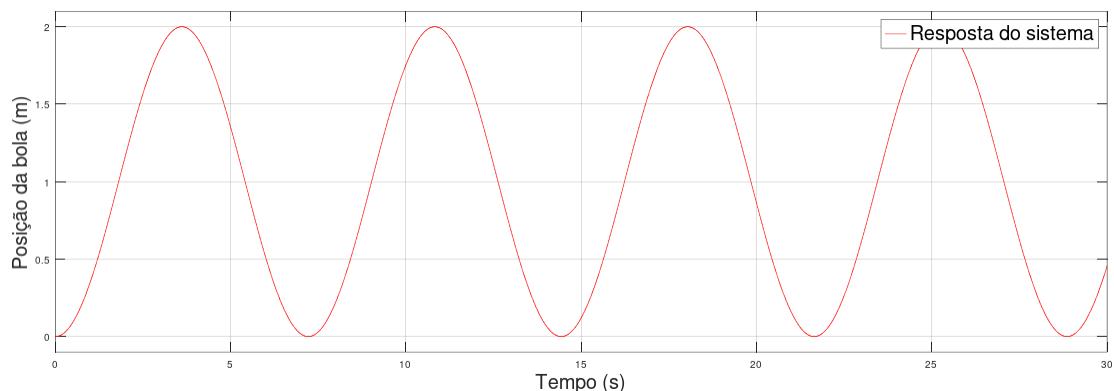


FIGURA 3. Resposta do sistema *Ball and Beam* em malha fechada e sem ação de controle.

Analizando a Figura 3, percebe-se que o sistema é marginalmente estável em malha fechada, dessa forma, pode-se utilizar o Segundo Método de Ziegler-Nichols para sintonizar os parâmetros do controlador PID. Aplicando o método, foi obtido um ganho crítico  $K_{cr} = 1$  e período crítico  $P_{cr} = 6,25$  segundos, com isto, empregando as regras de sintonia do PID propostas por Ziegler-Nichols, obteve-se:  $K_p = 0,6$ ,  $T_i = 3,125$  segundos e  $T_d = 0,78125$  segundos. Na Figura 4 é mostrada a resposta do sistema *ball and beam* com os parâmetros do PID ajustados pelo método de Ziegler-Nichols, considerando a aplicação de uma entrada do tipo degrau de 0,2 metros.

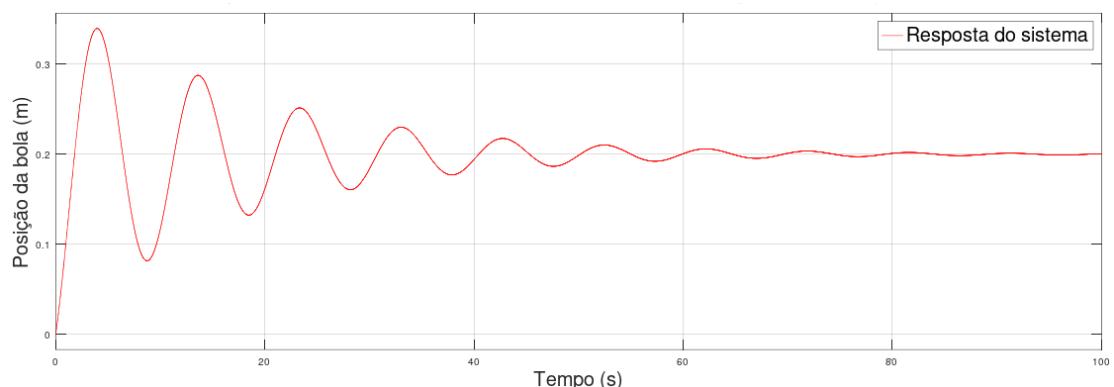


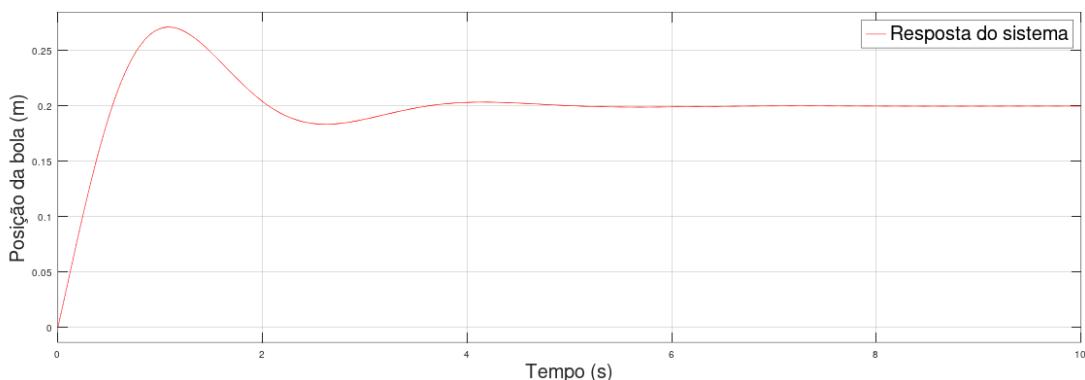
FIGURA 4. Resposta do sistema com os parâmetros do PID ajustados pelo método de Ziegler-Nichols.

Na Figura 4, a resposta do sistema apresenta um máximo sobressinal de 70% e tempo de estabilização da resposta em 0,2 metros por volta dos 60 segundos.

Em relação ao AG, após vários testes realizando combinações entre os tipos de métodos de seleção, *crossover* e mutação implementados, foi constatado que a combinação de seleção por torneio, *crossover* um ponto e mutação uniforme apresentaram os melhores resultados dentre todos, sendo estes os métodos definidos para gerarem de fato a resposta do algoritmo. Dessa forma, na Tabela 2 são apresentados os valores referentes a média, o máximo e o mínimo das aptidões dentre todas as 25 gerações das populações no AG. Na Figura 5 é mostrada a resposta do sistema considerando os seguintes parâmetros do PID ajustados pelo AG:  $K_p = 7,019$ ,  $K_i = 0,686$  e  $K_d = 2,682$ .

**TABELA 2.** Média, máximo e mínimo das aptidões das gerações de indivíduos obtidas pelo Algoritmo Genético.

Aptidão mínima	Aptidão máxima	Média das aptidões
13,79	52,71	31,02



**FIGURA 5.** Resposta do sistema com os parâmetros do PID sintonizados pelo Algoritmo Genético.

Na Figura 5, a resposta do sistema *ball and beam* apresenta um máximo sobressinal de 35,6% com tempo de estabilização da resposta em 0,2 metros por volta dos 4 segundos.

## CONCLUSÕES

Comparando os resultados obtidos pelo Algoritmo Genético com o resultado gerado pela aplicação do Segundo Método de Ziegler-Nichols, chega-se à conclusão de que o AG proporcionou uma ação de controle de melhor qualidade, com tempo de estabilização e máximo sobressinal bem menores em relação ao outro método. Diante do exposto, observa-se que o Algoritmo Genético pode ser uma ferramenta interessante no ajuste dos parâmetros de controladores PID. Para trabalhos futuros, é possível citar a aplicação do AG no ajuste dos parâmetros de outros controladores e/ou considerando outros sistemas.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Guilherme Cardoso da Silva procedeu com a pesquisa, escrita e execução dos cálculos e simulações do trabalho. Bruno Rafael Gamino atuou como orientador, oferecendo todo o suporte para a execução do trabalho, com ênfase na escrita do projeto e no desenvolvimento do Algoritmo Genético. Graciliano Antonio Damazo atuou como colaborador, contribuindo com o apoio na modelagem matemática do sistema e na aplicação do método de Ziegler-Nichols.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFSP e ao programa PIBIFSP pelo apoio financeiro, tornando possível a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BRAGA, E. R. Sintonia do controlador pelo método de Ziegler e Nichols, para especificação do produto de topo de uma coluna de destilação. **Revista de Engenharia Química e Química – REQ<sup>2</sup>**, Bahia, v. 2, n. 3, p. 1-14, 2016.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle moderno**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001. 659 p.
- GOMES, G. C. D.; FIGUEIREDO, L. R. Análise de controle robusto no sistema *ball and beam*. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S.I], v. 2, 5. ed, p. 153-166, 2020.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. 1. ed. Cambridge: The MIT Press, 1992. 211 p.
- KATO, R.; PAIVA, V.; IZIDORO, S. Algoritmos genéticos. **BIOINFO – Revista Brasileira de Bioinformática**. [S.I], 1. ed, p. 1-22, 2021.
- MENDOZA, J. C. C.; VELÁSQUEZ, C. J. C; MONTIEL, E. R.; SILVA, D. P.; SEGURA, R. V. Sistema bola-viga: construcción y aplicación de técnicas de control. **Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI**, [S.I], v. 10, n. 6, p. 107-116, 2022.
- NASCIMENTO, L. F. G. **Modelagem e controle numérico de um sistema ball and beam**. 2021. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda, 2010. 824 p.
- PACHECO, M. A. C. **Algoritmos genéticos: princípios e aplicações**. v. 1. Rio de Janeiro: ICA - Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. 1999. 9 p. Disponível em: [https://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/CE-intro\\_apost.pdf](https://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/CE-intro_apost.pdf). Acesso em: 07 mai. 2024.
- RANA, M. A., USMAN, Z.; SHAREEF, Z. Automatic control of ball and beam system using particle swarm optimization. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND INFORMATICS, 12., 2011, Budapest. **Proceedings...** Hungary: IEEE, 2011. p. 1-6.
- TAHIR, N. M.; YAKINNI, L. A.; BATURÉ, U. I.; YAHUZA, I.; SHUAIBU, A. N; SAMBO, A. U. Control and stability studies of ball and beam system. **Journal of Modern Technology and Engineering**, [S.I], v. 4, n. 2, p.122-131, 2019.
- TAKATSU, H.; ITOH, T.; ARAKI, M. Future needs for the control theory in industries - report and topics of the control technology survey in japanese industry. **Journal of Process Control**, [S.I], v. 8, n. 5-6, p. 369–374, 1998.
- YASSUDA, J. Y. **Desenvolvimento, modelagem, identificação e controle de um módulo didático ball and beam**. 2019. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2019.