



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação  
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica  
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



# Desenvolvimento de um protótipo de robô com dois graus de liberdade com um elo flexível para estudo e aplicação de sistemas de atenuação de vibrações

*Development of a prototype robot with two degrees of freedom with a flexible link for the study and application of vibration attenuation systems*

Thiago Schmidt\*

Frederic Conrad Janzen†

## RESUMO



O controle de vibrações em sistemas robóticos que são compostos por componentes flexíveis é de suma importância, pois caso tais distúrbios não sejam mensurados e controlados, podem gerar instabilidades e descontrole do sistema, causando riscos à vida e desperdícios energéticos. No trabalho realizado, foi desenvolvida uma bancada de testes com um manipulador robótico, possuindo dois graus de liberdade e um elo com características flexíveis. Para a construção do modelo, utilizou-se de uma impressora 3D, permitindo imprimir as peças previamente desenhadas em software de CAD 3D. Para o primeiro elo e demais partes do protótipo, utilizou-se de material plástico do tipo Ácido Polilático (PLA) e para o elo com característica flexível utilizou-se de Polímero Termoplástico (TPU). Após a finalização do sistema físico, por meio de linguagem Modelica, o sistema foi modelado e simulado no software OpenModelica. Por fim, um exemplo aplicando um controlador PI é apresentado com o intuito de demonstrar o controle a posição do mesmo.

**Palavras-chave:** Vibrações. Componentes Flexíveis. Controle.

## ABSTRACT

The control of vibrations in robotic systems that are composed of flexible components is of paramount importance, because if such disturbances are not measured and controlled, they can generate instabilities and lack of control in the system, causing risks to life and energy waste. In the work carried out, a test bench with a robotic manipulator was developed, having two degrees of freedom and a link with flexible characteristics. For the construction of the model, a 3D printer was used, allowing to print the previously drawn parts in 3D CAD software. For the first link and other parts of the prototype, a plastic material of the type Polylactic Acid (PLA) was used, and for the link with a flexible characteristic, Thermoplastic Polymer (TPU) was used. After the completion of the physical system, using Modelica language, the system was modeled and simulated using OpenModelica software. Finally, an example applying a PI controller is presented in order to demonstrate the control over its position.

**Keywords:** Vibrations. Flexible Components. Control.

\*  Curso de Engenharia Elétrica;  thiago\_s6@hotmail.com.

†  Departamento Acadêmico de Eletrônica;  fcjanzen@utfpr.edu.br;  <https://orcid.org/0000-0001-8215-4510>.



## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia, robôs manipuladores vem sendo amplamente utilizados em áreas que vão desde o ambiente fabril até atividades espaciais. Pesquisas vem sendo desenvolvidas para que tais equipamentos cumpram requisitos como maior segurança, menor custo, além de menor tempo de execução de tarefas. Materiais flexíveis vem sendo estudados dentro desta área de manipuladores robóticos, mas apresentam uma menor rigidez mecânica de seu conjunto, provocando distúrbios no sistema.

A figura 1 apresenta o CANADARM2, um dos primeiros manipuladores robóticos com elo e eixo flexível utilizados em ambiente espacial, equipado com câmeras de sistema a laser para inspecionar áreas de difícil alcance garantindo segurança aos astronautas (NOKLEBY, 2007).

**Figura 1 – Manipulador espacial CANADARM2.**



**Fonte: Nokleby (2007).**

Ao falarmos sobre os custos envolvidos para o desenvolvimento de robôs, quando se encontram formas de reduzir seu peso, seu custo é diretamente impactado. Com a redução de peso e otimização dos componentes, como ao se utilizar manipuladores com elos flexíveis, ganha-se com um volume de trabalho maior, um custo reduzido, aumento na velocidade de operação e uma maior segurança em relação a acidentes ocasionados por colisão com animais ou seres humanos.

Em contrapartida, um sistema com menor rigidez mecânica, possui uma tendência em sofrer maior interferência em seu funcionamento ocasionada por distúrbios e não linearidades de seus componentes. Portanto, qual o maior desafio para este tipo de projeto?

O controle de interferências causadas pela movimentação se torna o maior desafio para este tipo de projeto. O estudo de materiais flexíveis aplicados em braços robóticos, já discutidos em trabalhos como o de Lima (2015) e Janzen (2016), juntamente com o desenvolvimento e validação matemática do protótipo desenvolvido, nos permite aplicar diferentes técnicas de controle e analisar os distúrbios gerados pela movimentação dos elos.

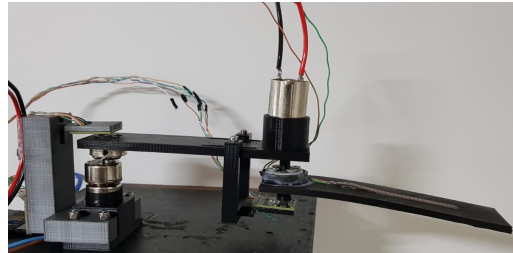
## 2 MÉTODO

### 2.1 Desenvolvimento do Protótipo

Com o intuito de estudar os efeitos das vibração das estruturas flexíveis em sistemas robóticos e validar técnicas de controle, desenvolveu-se um protótipo, observado por meio da figura 2, sendo o primeiro elo impresso em PLA e o segundo elo em TPU, que ao serem acionados, nos fornecem dados como a posição de cada elo e medida de vibração da componente flexível do conjunto.

O protótipo construído, é movimentado por meio de um par de motores escovados, juntamente com uma

Figura 2 – Protótipo final do robô com 2 graus de liberdade composto por dois elos sendo o segundo um elo flexível.



Fonte: Schmidt (2021)

caixa redutora de velocidade, com a finalidade de amplificar seu torque.

O acionamento do conjunto se deu por meio de uma ponte H, com dois canais, para que fosse possível o acionamento síncrono dos motores, mas de forma independente.

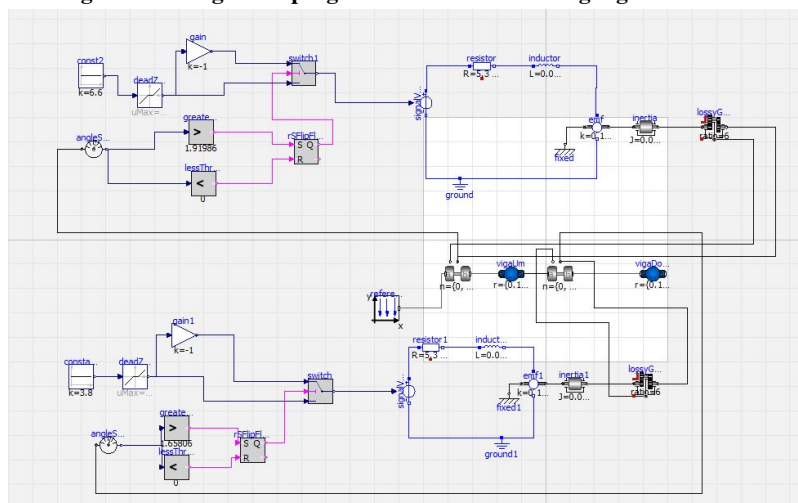
Para o controle do sistema, utilizou-se de um microcontrolador Arduino, modelo ATmega 2560, implementando uma rotina de movimentação para avaliar a vibração provocada pelo conjunto. O sensor utilizado para detectar a vibração no sistema foi do tipo flexível, que ao sofrer deformações, sua resistência é alterada. Para realizar a leitura do valor da resistência do sensor, utilizou-se de uma porta analógica do microcontrolador.

Para a detecção da posição das vigas, utilizou-se de um encoder magnético, o qual ao não possuir contato direto com o eixo dos motores, não causa nenhum tipo de interferência no acoplamento. Um ímã é posicionado na ponta do eixo, ao girar de forma síncrona ao movimento, provoca uma alteração no campo magnético do sensor do encoder, sendo possível desta forma definir sua posição entre 0 e 360°.

## 2.2 Desenvolvimento do Modelo Simulado do Protótipo

Com o intuito de possibilitar o estudo dinâmico do protótipo, bem como para o desenvolvimento e simulação de técnicas e projetos de controle, um modelo matemático do sistema foi desenvolvido. Para isso, utilizou-se a ligação de programação Modelica, sendo o programa desenvolvido no *software* OpenModelica. A figura 3

Figura 3 – Imagem do programa desenvolvido na linguagem Modelica.



Fonte: Autoria própria (2021)

Os parâmetros para alimentação do modelo matemático for obtidos através de ensaios do protótipo

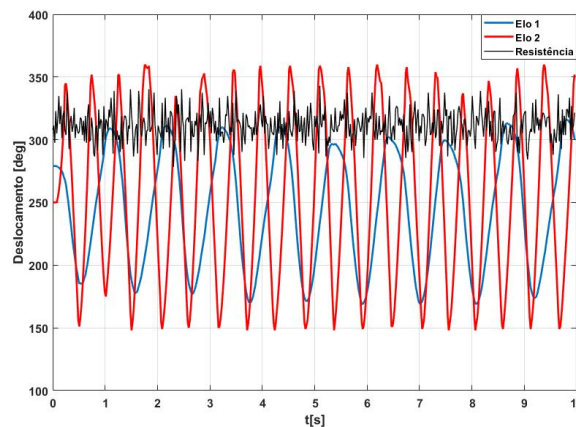
experimental e através dos projetos feitos em *CAD*.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Validação do Modelo Simulado

Em primeiro momento, para validar o funcionamento dos sensores e do programa do microcontrolador, não aplicou-se nenhum tipo de controle no protótipo, apenas uma rotina que movimenta os elos de um lado para o outro. A dinâmica do sistema pode ser observada na figura 4, sendo o gráfico de deslocamento dos elos em função do tempo e a vibração do elo 2 representada pela variação da resistência elétrica do Sensor Flex.

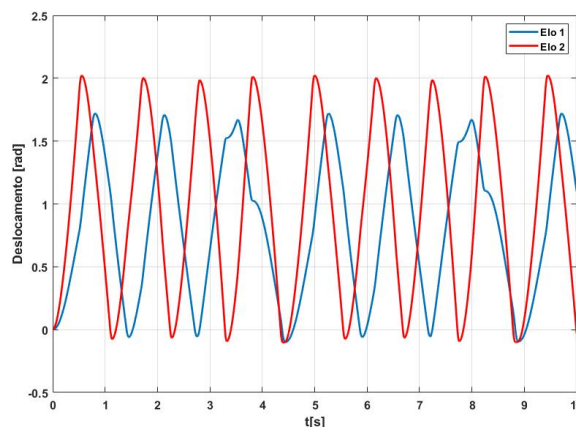
**Figura 4 – Gráfico apresentando o movimento dos dois graus de liberdade do protótipo bem como a vibração do elo flexível.**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

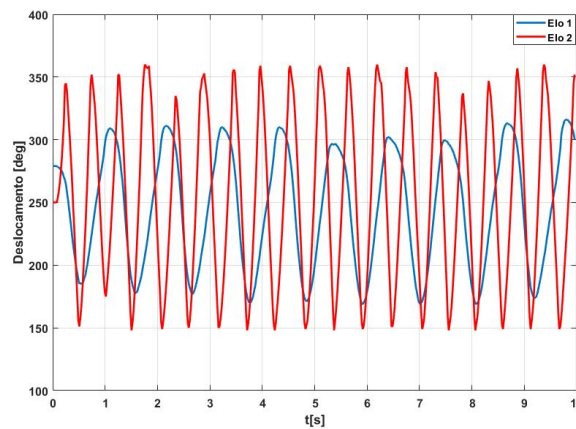
Na sequência, foi realizada uma comparação do comportamento do modelo construído na linguagem Modelica com o sistema real, aplicando-se o mesmo sinal de controle em ambos. As figuras 5 e 6, apresentam esses resultados, sendo a primeira os valores dados pela simulação via software, seguida pelos valores reais obtidos do protótipo.

**Figura 5 – Sistema Modelado.**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

**Figura 6 – Sistema real.**



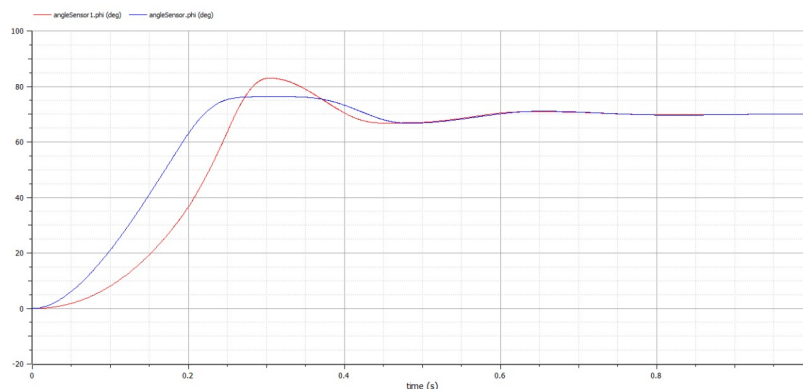
**Fonte: Autoria própria (2021)**

Ao comparar as figuras 5 e 6, é possível verificar a semelhança entre os dois gráficos, sendo ainda necessários ajustes nos parâmetros e a introdução de não linearidades como a Histerese, para melhorar a similaridade entre a simulação e o protótipo.

Após os testes de validação do sistema, foi desenvolvido um algoritmo de controle PI, atuando de forma que ao definir uma posição no início da execução do código, o controle atua para estabilizar o sistema na posição desejada, condição válida para ambos os elos.

Na figura 7, podemos ver a atuação do controle PI no sistema modelado no OpenModelica, já na figura 8, podemos analisar o comportamento do controle no protótipo.

**Figura 7 – Controle PI - OpenModelica.**



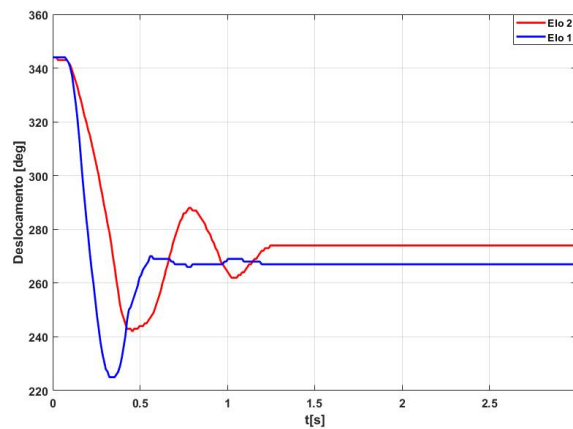
**Fonte: Autoria própria (2021)**

As diferenças em relação aos valores dos ângulos se dão devido ao fato do OpenModelica utilizar radianos como unidade de medida angular e no protótipo utilizou-se graus.

## 4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um protótipo de um robô com dois graus de liberdade contendo um elo flexível, para estudo da dinâmica do sistema e desenvolvimento de técnicas de controle de vibração com o intuito de atenuar os efeitos da mesma sobre a dinâmica do sistema. O protótipo foi desenvolvido

Figura 8 – Controle PI - Protótipo



Fonte: Autoria própria (2021)

utilizando impressão 3D, sendo atuado por motores cc e um microcontrolador para o controle.

Um modelo matemático do sistema foi desenvolvido utilizando a linguagem Modelica para que seja possível simular condições e técnicas de controle e posteriormente validá-las no protótipo.

Os resultados apresentados na figura 4, demonstram que o protótipo funcionou conforme projetado.

Nas figuras 5 e 6, é possível ver que o modelo simulado apresenta um comportamento muito similar ao sistema real, sendo necessário ainda algum refino nos parâmetros e inclusão de alguns termos no modelo como algumas não linearidades dos motores e arrasto aerodinâmico por exemplo.

Por fim os testes do controlador PI, figura 7 e 8 apresentam uma similaridade muito próxima no tempo de acomodação, podendo assim utilizar-se o modelo simulado para o projeto de um controlador aplicando várias técnicas de design, e na sequência validando as mesmas no protótipo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo auxílio financeiro dado para o desenvolvimento do projeto através da bolsa Pibic.

## REFERÊNCIAS

JANZEN, Frederic Conrad. Positioning and vibration control of a flexible structure in slewing motion by applying Shape Memory Alloys. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016.

LIMA, Jeferson José de. **Controle não linear de posição e vibração de manipuladores robóticos com juntas e elos flexíveis utilizando materiais inteligentes**. 2015. Diss. (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NOKLEBY, Scott B. Singularity analysis of the Canadarm2. **Mechanism and Machine Theory**, Elsevier, v. 42, n. 4, p. 442–454, 2007.

SCHMIDT, Thiago. Desenvolvimento de uma bancada de testes para o estudo e controle de vibrações em robôs com elos flexíveis., 2021.