



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

YURI DE OLIVEIRA COTA

**APRESENTAÇÃO DO ARTIGO TÉCNICO ELABORADO EM 2023 POR
MEIO DA IN PROEG Nº 01/2023: EXPLORANDO O POTENCIAL DO
LABORATÓRIO VIRTUAL DE CONTROLE DE SISTEMAS COM VPYTHON NO ENSINO DE
ENGENHARIA: ANÁLISE E PERSPECTIVAS PARA O FUTURO**

TUCURUÍ

2023

YURI DE OLIVEIRA COTA

**APRESENTAÇÃO DO ARTIGO TÉCNICO ELABORADO EM 2023 POR
MEIO DA IN PROEG Nº 01/2023: EXPLORANDO O POTENCIAL DO
LABORATÓRIO VIRTUAL DE CONTROLE DE SISTEMAS COM VPYTHON NO ENSINO DE
ENGENHARIA: ANÁLISE E PERSPECTIVAS PARA O FUTURO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito parcial para a obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Orientador:
Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma.

TUCURUÍ

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D278 de Oliveira Cota, Yuri.
Explorando o potencial do Laboratório Virtual de Controle de
Sistemas com VPython no ensino de Engenharia: Análise e
perspectivas para o futuro / Yuri de Oliveira Cota. — 2023.
33 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Elétrica, Tucuruí, 2023.

1. Sistemas de controle. 2. Simulação. 3. VPython. 4. PyPi.
5. Educação na Engenharia. I. Título.

CDD 629.83

YURI DE OLIVEIRA COTA

**APRESENTAÇÃO DO ARTIGO TÉCNICO ELABORADO EM 2023 POR
MEIO DA IN PROEG Nº 01/2023:** Explorando o potencial do Laboratório Virtual
de Controle de Sistemas com VPython no ensino de Engenharia: Análise e perspectivas
para o futuro

Trabalho de Conclusão de Curso, apresen-
tado como requisito parcial para a obtenção
de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica,
pela Universidade Federal do Pará.

Data de aprovação: 10 de Outubro de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma
Orientador - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. André Felipe Souza da Cruz
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira
Avaliador Interno - FEE/CAMTUC/UFPA

TUCURUÍ

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Título	Explorando o potencial do Laboratório Virtual de Controle de Sistemas com VPython no ensino de Engenharia: Análise e perspectivas para o futuro
Discente	Yuri de Oliveira Cota
Matrícula	201933940045

#	BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1	Rafael Suzuki Bayma (CAMTUC/UFGA)	Orientador
2	André Felipe Souza da Cruz (CAMTUC/UFGA)	Membro
3	Raphael Barros Teixeira (CAMTUC/UFGA)	Membro

Data da Defesa: 10/10/2023	Hora Inicio: 08:00	Hora Término: 08:20
----------------------------	--------------------	---------------------

Trabalho Escrito (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Formatação	9,8	10,0	9,5
Linguagem (gramática e semântica)	9,8	10,0	9,7
Conteúdo técnico	10,0	9,0	10,0
Média	9,9	9,7	9,7

Defesa Oral (0 a 10 pontos por critério)			
Critério	Examinador 1	Examinador 2	Examinador 3
Sequência lógica de apresentação	10,0	9,0	9,5
Administração do tempo	9,0	9,0	9,5
Expressão oral	9,8	9,5	9,0
Domínio do tema	9,5	9,0	10,0
Média	9,6	9,1	9,5

Média por examinador	9,7	9,4	9,6
Média Final	9,6		
Conceito Final	EXC		

Raphael Barros Teixeira
Membro

André Felipe Souza da Cruz
Membro

Rafael Suzuki Bayma
Orientador



Emitido em 10/10/2023

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) Nº 1/2023 - FEET (11.16.02)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 11/10/2023 09:16)

ANDRE FELIPE SOUZA DA CRUZ
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###531#4

(Assinado digitalmente em 11/10/2023 08:19)

RAFAEL SUZUKI BAYMA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
NDAE (11.16.16)
Matrícula: ###466#0

(Assinado digitalmente em 12/10/2023 10:48)

RAPHAEL BARROS TEIXEIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###056#9

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufpa.br/documentos/> informando seu número: **1**
, ano: **2023**, tipo: **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)**, data de emissão:
11/10/2023 e o código de verificação: **42ce4b6bcf**

Dedico aos meus familiares, em especial aos meus pais pelo esforço na minha educação e a todos os amigos pelo apoio, incentivo e confiança no decorrer da longa jornada de formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Com humildade, alegria e um coração transbordando de gratidão, venho expressar meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram de maneira significativa para a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), tendo sempre Deus à frente de tudo e a minha família como pilar essencial em minha jornada.

Primeiramente, quero elevar minha profunda gratidão a Deus, o guia supremo em minha vida, cuja orientação constante e amor incondicional foram a bússola que me conduziu através das dificuldades e das vitórias. Com sua graça, encontrei a força para superar os desafios e persistir na busca do conhecimento.

Aos meus pais, fontes inesgotáveis de apoio, amor e inspiração, dedico uma parte especial destas palavras de agradecimento. Seu comprometimento com minha educação e desenvolvimento moldaram não apenas minha trajetória acadêmica, mas também meu caráter. Cada sacrifício que fizeram e cada incentivo que me deram foram passos fundamentais nessa caminhada. Sou profundamente grato por ter vocês como exemplos de dedicação e amor.

Aos meus orientadores, Dr. Rafael Suzuki Bayma e Dr. Raphael Barros Teixeira, minha gratidão pela paciência, dedicação e conhecimento compartilhado. Suas orientações perspicazes moldaram não apenas o conteúdo deste TCC, mas também meu crescimento como acadêmico e indivíduo. Agradeço por terem acreditado em meu potencial e por me guiarem com sabedoria.

Às mãos que ensinam, aos professores que me inspiraram com seu comprometimento à educação, expresso minha sincera gratidão. Cada lição, cada conselho, contribuiu para minha formação integral e para a qualidade deste trabalho.

Aos amigos e colegas de jornada, a jornada não teria sido a mesma sem a amizade e o apoio de vocês, incluindo o valioso contributo do Oséias Dias de Farias na elaboração deste artigo. Compartilhar ideias, superar desafios e celebrar conquistas ao lado de vocês foi um privilégio, e sou grato por cada momento compartilhado.

Este trabalho é o resultado de um esforço coletivo, e cada um de vocês desempenhou um papel essencial em sua realização. Este TCC não é apenas um marco acadêmico, mas também um testemunho da importância do apoio mútuo e da colaboração em nossas jornadas individuais.

Mais uma vez, meu sincero obrigado a todos que contribuíram para este trabalho e para a minha jornada acadêmica como um todo. Que este seja apenas o começo de muitas realizações futuras.

RESUMO

Este trabalho se concentra na apresentação do artigo intitulado “Explorando o Potencial do Laboratório Virtual de Controle de Sistemas com VPython no Ensino de Engenharia: Análise e Perspectivas para o Futuro”. O desenvolvimento deste artigo transcorreu ao longo do período de 3 de janeiro a 16 de maio de 2023, coincidindo com a execução do projeto de pesquisa denominado “Laboratório Virtual de Controle”. Este projeto foi supervisionado pelos docentes Dr. Rafael Suzuki Bayma e Dr. Raphael Barros Teixeira, cuja orientação foi fundamental para o direcionamento e êxito da pesquisa. No cerne deste estudo está a criação do laboratório virtual de controle, que se fundamentou na linguagem de programação Python. Dentro deste ambiente, foram elaboradas simulações virtuais voltadas a problemas clássicos da disciplina de Controle da UFPA - Campus Tucuruí. Os desafios selecionados para essa empreitada foram o MAGLEV (Levitador Magnético) e o AeroPêndulo. Nessas instâncias, efetuou-se a modelagem dos sistemas, a implementação do controle e a criação de interfaces interativas para a comunicação com os usuários. O objetivo primordial desses esforços foi aprimorar a compreensão e a abstração dos alunos em relação aos tópicos abordados nesses cenários, propiciando um ambiente de aprendizagem mais dinâmico e contextualizado. Ao término deste trabalho, os módulos foram desenvolvidos com sucesso, alcançando uma funcionalidade plena que permite sua distribuição e execução em ambientes locais. Nesse processo, foram criadas representações tridimensionais dos sistemas e implementada uma interface de comando que possibilita o ajuste dos sinais de referência de forma interativa.

Palavras-chave: Laboratório Virtual; Python; simulações virtuais; Engenharia de Controle.

ABSTRACT

This work focuses on the presentation of the article entitled “Exploring the Potential of the Virtual Laboratory for Systems Control with VPython in Engineering Teaching: Analysis and Perspectives for the Future”. The development of this article took place over the period from January 3 to May 16, 2023, coinciding with the execution of the research project called “Virtual Control Laboratory”. This project was supervised by professors Dr. Rafael Suzuki Bayma and Dr. Raphael Barros Teixeira, whose guidance was fundamental for the direction and success of the research. At the heart of this study is the creation of the virtual control laboratory, which was based on the Python programming language. Within this environment, virtual simulations were elaborated aimed at classic problems of the discipline of Control at UFPA - Campus Tucuruí. The challenges selected for this endeavor were the MAGLEV (Magnetic Levitator) and the AeroPêndulo. In these instances, the systems were modeled, the control implemented and interactive interfaces created for communication with users. The primary objective of these efforts was to improve students’ understanding and abstraction in relation to the topics covered in these scenarios, providing a more dynamic and contextualized learning environment. At the end of this work, the modules were successfully developed, achieving full functionality that allows their distribution and execution in local environments. In this process, three-dimensional representations of the systems were created and a command interface was implemented that allows the adjustment of reference signals interactively.

Keywords: Virtual Laboratory; Python; virtual simulations; Control Engineering.

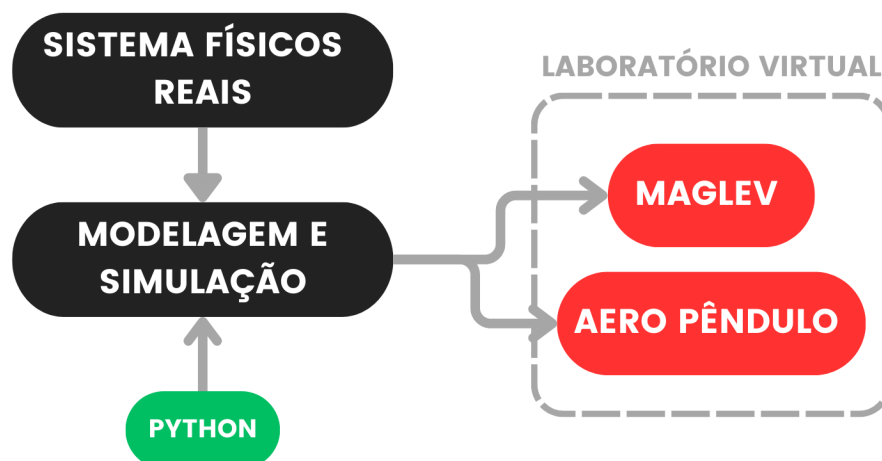
SUMÁRIO

1	TEXTO DE APRESENTAÇÃO	11
2	EXPLORANDO O POTENCIAL DO LABORATÓRIO VIRTUAL DE CONTROLE DE SISTEMAS COM VPYTHON NO ENSINO DE ENGENHARIA: ANÁLISE E PERSPECTIVAS PARA O FUTURO	16
	Referências	29
	ANEXO A – DECLARAÇÃO DE AUTORIZAÇÃO EMITIDA PELOS DEMAIS AUTORES DO TRABALHO INCORPORADO	30

1 TEXTO DE APRESENTAÇÃO

O artigo aborda o desenvolvimento de módulos computacionais para simulação de sistemas clássicos de controle, como o MAGLEV e o AeroPêndulo, com o objetivo de aprimorar o ensino das disciplinas de Engenharia de Sistemas de Controle na Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí. Nesse contexto, foi realizada a modelagem matemática, seguida pela implementação de controle em malha fechada e de animação 3D, utilizando a linguagem Python. O principal diferencial do trabalho, em relação a outros correlatos é a animação desenvolvida por meio da biblioteca *VPython* (WEATHERFORD, 2011), elaborada com o intuito de melhorar a compreensão dos discentes sobre os fenômenos apresentados. A Figura 1 ilustra um esquema da metodologia abordada no artigo.

Figura 1 – Metodologia abordada no artigo.



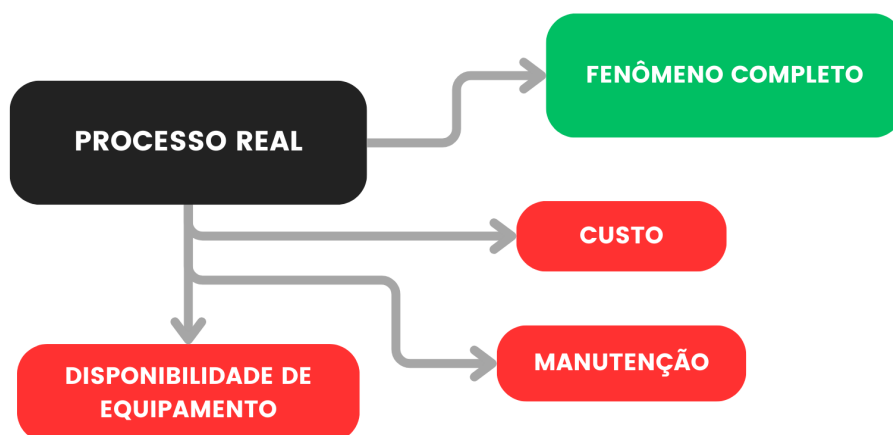
Fonte: Os Autores

O projeto teve início em 2023, com o objetivo principal de melhorar o ensino das disciplinas de Engenharia de Sistemas de Controle no curso de Engenharia Elétrica. A escolha da linguagem Python se fundamentou pela sua presença consolidada como ferramenta de Engenharia na atualidade, além de uma ampla variedade de bibliotecas, abrindo possibilidades tanto para simulações versáteis quanto para animações de qualidade.

A motivação para o projeto nasceu da percepção de que os conceitos vistos em sala tendem a se tornar excessivamente abstratos para os estudantes, pois normalmente a teoria é ilustrada apenas através de gráficos cartesianos dos sinais, e muitos estudantes reportam dificuldades em associar tais figuras aos fenômenos físicos correspondentes. Uma forma de resolver este problema é utilizar protótipos dos processos de controle automático em pequena escala para auxiliar os discentes a compreenderem os princípios físicos subjacentes aos sistemas.

Contudo, o uso de tais instrumentos enfrenta muitos desafios, sendo o principal deles o custo elevado de aquisição. Isto faz com que a instituição busque a construção do próprio equipamento. Mas mesmo com o protótipo construído dentro da própria Faculdade, há outros obstáculos consideráveis, por exemplo: a locomoção do equipamento; as conexões elétricas para o início do uso e situações adversas imprevisíveis (mau contato, por exemplo), dentre outros, conforme é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Prós e contras do processo real.

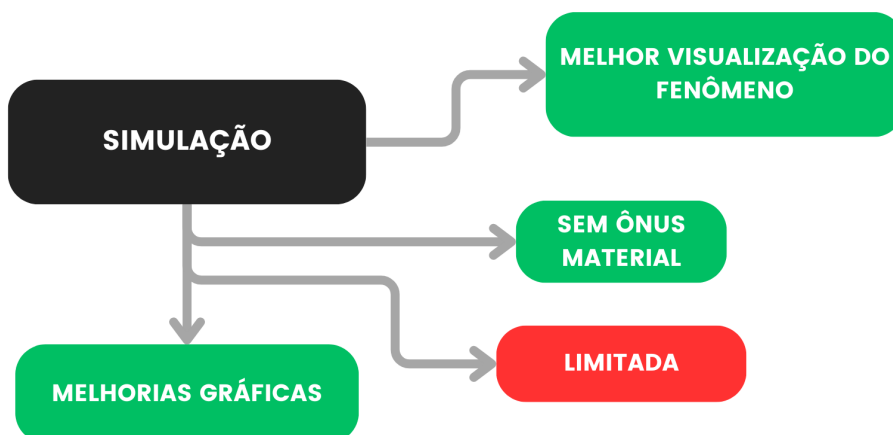


Fonte: Os Autores

Embora o uso dos protótipos não deva ser descartado devido ao potencial de aprendizado que eles proporcionam, estes fatores desestimulam o uso e o investimento neste tipo de recurso em curto prazo.

Diante desse cenário, surgiu a proposta de criar um laboratório virtual para Sistemas de Controle, visando propiciar uma experiência de visualização de fenômenos físicos mais acessível e menos onerosa em curto prazo, como é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Prós e contras do uso de simulações.



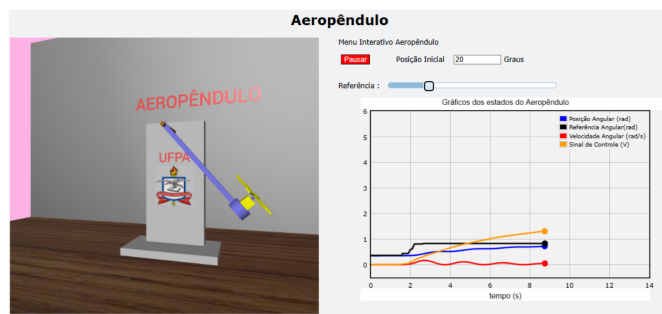
Fonte: Os Autores

Essa abordagem inovadora oferece aos estudantes uma experiência mais interativa e imersiva, permitindo que eles explorem conceitos de Sistemas de Controle de forma mais prática e aplicada. Em virtude da concepção do Laboratório Virtual e do desenvolvimento dos dois primeiros módulos, foi produzido um artigo técnico para publicação nos anais do Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE 2023.

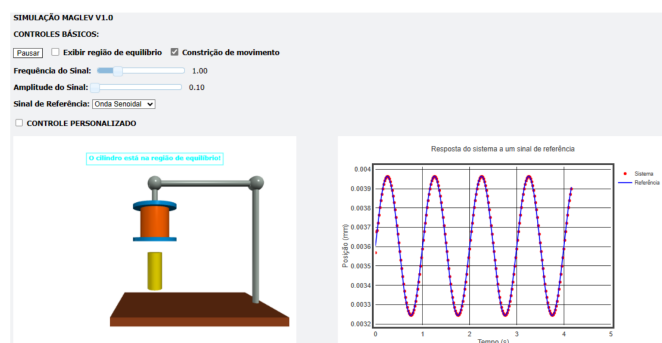
Na abordagem inicial, foram considerados dois problemas clássicos de controle: o MAGLEV (levitador magnético) e o Aero Pêndulo, que são comumente utilizados para introduzir os assuntos básicos da disciplina. Para a simulação e controle desses sistemas, são utilizadas bibliotecas como a *NumPy* (OLIPHANT et al., 2006), *Control* (FULLER et al., 2021) e *SciPy* (BLANCO-SILVA, 2013).

Para fazer a animação dos sistemas, foi realizado um estudo comparativo entre diversas bibliotecas disponíveis, tais como *Manim* (COLUCI, 2021), *Pygame* (MCGUGAN, 2007) e *VPython*, buscando uma boa escolha em termos de interface, facilidade sintática e interatividade. A biblioteca *VPython* destacou-se como uma escolha adequada, com sua interface tridimensional envolvente, sintaxe acessível e possibilidade de interação com o usuário. A dedicação ao projeto permitiu uma primeira versão aos sistemas MAGLEV e AeroPêndulo, que já podem ser utilizados como ferramenta auxiliar de ensino, conforme é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Módulos desenvolvidos para o laboratório virtual.



(a) Aero Pêndulo



(b) MAGLEV

Fonte: Os Autores

Do ponto de vista dos participantes, o desenvolvimento do projeto agregou conhecimentos das áreas de Engenharia de Sistemas de Controle e Engenharia/Desenvolvimento de Software. Trabalhar no Laboratório Virtual oferece a oportunidade de aprofundar conhecimentos em Engenharia de Sistemas de Controle, uma vez que a implementação dos módulos computacionais exige a compreensão sólida dos conceitos teóricos e a aplicação prática de temas como realimentação de estados e controle integral. Por outro lado, o uso da linguagem Python para realizar a simulação numérica e desenvolver animações 3D propiciaram interação com ferramentas tecnológicas atuais e relevantes à área, provendo aos alunos a oportunidade de enfrentar desafios do campo de Engenharia/Desenvolvimento de Software.

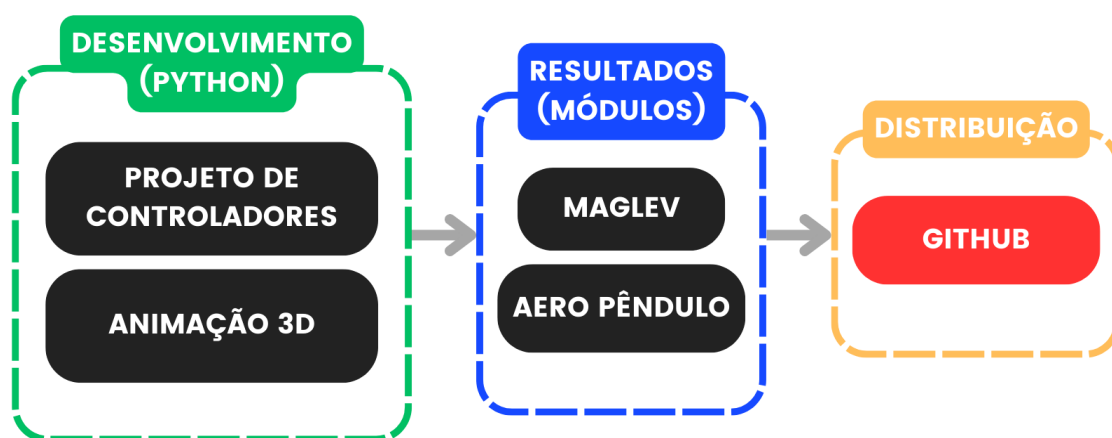
Além disso, o projeto incentivou o trabalho em equipe e a colaboração entre os estudantes, promovendo habilidades de comunicação, liderança e gestão de projetos. A natureza multidisciplinar do trabalho também proporcionou um ambiente de aprendizado rico em que os alunos puderam integrar conhecimentos de diferentes áreas para alcançar soluções inovadoras. No que tange aos benefícios obtidos, o desenvolvimento do Laboratório Virtual representa um importante recurso para aprimorar o ensino na Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí, e pode ser estendido para outras subunidades e instituições de ensino.

A disponibilidade dos módulos computacionais e das animações, proporciona uma abordagem didática mais prática e aplicada, aproximando os estudantes da realidade profissional. Além disso, o Laboratório Virtual oferece uma alternativa de baixo custo em curto prazo às limitações dos protótipos físicos, embora uma substituição completa não seja uma opção didaticamente vantajosa. De fato, espera-se que este trabalho estimule a inclusão de novos processos de controle ao Laboratório, permitindo não apenas uma abordagem de ensino mais efetiva aos usuários, mas também a oportunidade de aprimoramento significativa aos alunos que participarem do desenvolvimento.

Durante a execução das atividades, foram encontradas algumas dificuldades que merecem destaque. Uma das principais enfrentadas foi a integração entre os resultados numéricos da simulação e a correspondente animação em 3D. Outro entrave foi a forma de como o produto final pode ser distribuído ao usuário. Embora a biblioteca *VPython* ofereça um interpretador online para criação de animações, o que permite acesso ao Laboratório diretamente a partir de um navegador da Internet, constatou-se que esse sistema não se mostra adequado para este projeto em particular, uma vez que não permite a importação de pacotes adicionais essenciais, como o *SciPy* e *Control*. Diante dessa limitação, optou-se por disponibilizar os códigos e a documentação dos módulos no GitHub e na plataforma PyPi, permitindo que os usuários baixem os arquivos e executem localmente em seus sistemas. Essa decisão possibilita uma maior flexibilidade e acessibilidade para os interessados em utilizar o Laboratório Virtual. Na Figura 5 é apresentado as etapas desenvolvidas na

criação do laboratório virtual.

Figura 5 – Etapas do desenvolvimento do laboratório virtual.



Fonte: Os Autores

Considera-se que o Laboratório esteja suficientemente funcional permitindo o uso por parte dos estudantes. Neste estágio, já são vislumbradas algumas perspectivas de melhorias para futuras versões. Uma das melhorias que podem ser implementadas é a ampliação dos tipos de controle disponíveis para os sistemas, possibilitando uma experiência mais abrangente e enriquecedora para os usuários. Adicionalmente, a integração com sistemas reais oferece uma oportunidade valiosa para a aplicação prática dos conceitos teóricos. Um exemplo notável é o módulo AeroPêndulo, que atingiu a fase de integração com o sistema físico. Nesse estágio, os estudantes têm a capacidade não apenas de controlar o sistema por meio da interface de comando, mas também de provocar perturbações no sistema físico, observando como essas perturbações se refletem no sistema simulado. Essa abordagem aprofunda ainda mais a compreensão dos estudantes, permitindo-lhes explorar as complexidades da interação entre teoria e prática de forma enriquecedora e significativa. Outra perspectiva de melhoria é a disponibilização online dos sistemas, o que permitiria aos usuários acessarem o Laboratório Virtual diretamente em seus navegadores, independente do sistema operacional utilizado. Essa abordagem poderia aumentar a acessibilidade e facilitar o uso do laboratório por parte dos estudantes, tornando-o ainda mais acessível e aberto a um maior número de interessados.

O trabalho foi apresentado como parte integrante do Trabalho de Conclusão de Curso, seguindo uma estratégia de flexibilização estabelecida pela INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 01/2023 – PROEG/UFGA. Esta abordagem permitiu a utilização do trabalho com o objetivo proposto, com a devida autorização dos demais autores e coordenadores do trabalho original, conforme declarado na autorização em anexo.

2 Explorando o potencial do Laboratório Virtual de Controle de Sistemas com VPython no ensino de Engenharia: Análise e perspectivas para o futuro

Na próxima página encontra-se o arquivo original do artigo técnico intitulado “Explorando o potencial do Laboratório Virtual de Controle de Sistemas com VPython no ensino de Engenharia: Análise e perspectivas para o futuro”, aceito no Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE 2023, que será realizado no Rio de Janeiro/RJ, no ano de 2023.

Explorando o potencial do Laboratório Virtual de Controle de Sistemas com VPython no ensino de Engenharia: Análise e perspectivas para o futuro

1 INTRODUÇÃO

O ensino de disciplinas teóricas nos cursos de Engenharia é tradicionalmente um desafio, pois muitos alunos têm dificuldade em relacionar o conteúdo com o comportamento físico real dos sistemas estudados. Embora a introdução de tecnologias de apoio tenha ajudado a amenizar o problema, ainda existem desafios, como a falta de estrutura operacional e atualização de metodologias de ensino. Uma forma de acelerar este processo é a utilização de simulação computacional auxiliada por animações.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma maneira de explorar conhecimentos de Engenharia sobre controle de sistemas físicos por meio de ferramentas computacionais para criar simulações e animações interativas. Foram desenvolvidas duas animações para sistemas clássicos utilizados em aulas de Engenharia de Sistemas de Controle que fazem parte do currículo de Engenharia Elétrica do Campus Tucuruí da Universidade Federal do Pará: o Aero Pêndulo e o Levitador Magnético. A proposta do trabalho é iniciar um conjunto de módulos programáveis em linguagem Python que possam ser aperfeiçoados e utilizados consistentemente em aulas de modo a melhorar a compreensão dos estudantes sobre o assunto, além de habilidades de programação e trabalho em equipe.

2 METODOLOGIA

As simulações desenvolvidas representam a dinâmica de sistemas físicos reais descritos em outros trabalhos. Neste sentido, são apresentados sucintamente os conceitos e técnicas empregados em cada módulo de simulação, assim como a abordagem computacional utilizada na implementação. O processo de modelagem e simulação foi desenvolvido em linguagem Python, utilizando tanto recursos numéricos, como o módulo NumPy (NUMPY, 2023) como simbólicos - módulo SymPy (SYMPY, 2023).

2.1 Módulo 1 - MAGLEV (*Magnetic Levitator – Levitação Magnética*)

O MAGLEV é um sistema que busca a suspensão de um corpo ferromagnético no ar através da utilização de uma força magnética gerada por um eletroímã. A dinâmica é equivalente à de diversos sistemas dinâmicos instáveis comumente vistos em nível de graduação. O MAGLEV também permite ilustrar aplicações sobre circuitos magnéticos, magnetização e estabilização de sistemas, além de possuir um bom apelo visual.

Modelagem do sistema físico

O modelo utilizado na simulação é do tipo espaço de estados (NISE, 2012). As equações são provenientes do estudo de Costa, Silva e Teixeira (2012), cuja derivação analítica a partir de circuitos magnéticos consegue representar satisfatoriamente o sistema real desenvolvido (MILHOMEM, 2010). Os parâmetros utilizados na simulação correspondem ao sistema MAGLEV citado a priori.

As equações de estado são descritas como Equação (1) e Equação (2).

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = g - \frac{kI^2}{m(x_1 - \mu)^2} \quad (2)$$

Em que, x_1 e x_2 representam a posição e velocidade do corpo flutuante, respectivamente, I é a corrente no eletroímã, g é a aceleração da gravidade e os demais símbolos são constantes.

Para proceder com os métodos clássicos de Engenharia de Controle, o sistema é linearizado em torno de um ponto de equilíbrio (NISE, 2012). As equações de estado linearizadas, Equação (3) e Equação (4), consideram como ponto de equilíbrio os valores de posição e corrente do sistema (x_0, I_0).

$$\Delta \dot{x}_1 = \Delta x_2 \quad (3)$$

$$\Delta \dot{x}_2 = k_0 \Delta I + \lambda^2 \Delta x_1 \quad (4)$$

Em que k_0 e λ^2 estão expressos na Equação (5) e Equação (6) (MILHOMEN, 2010).

$$\lambda^2 = -\frac{2kI_0^2}{m(x_0 + \mu)^3} \quad (5)$$

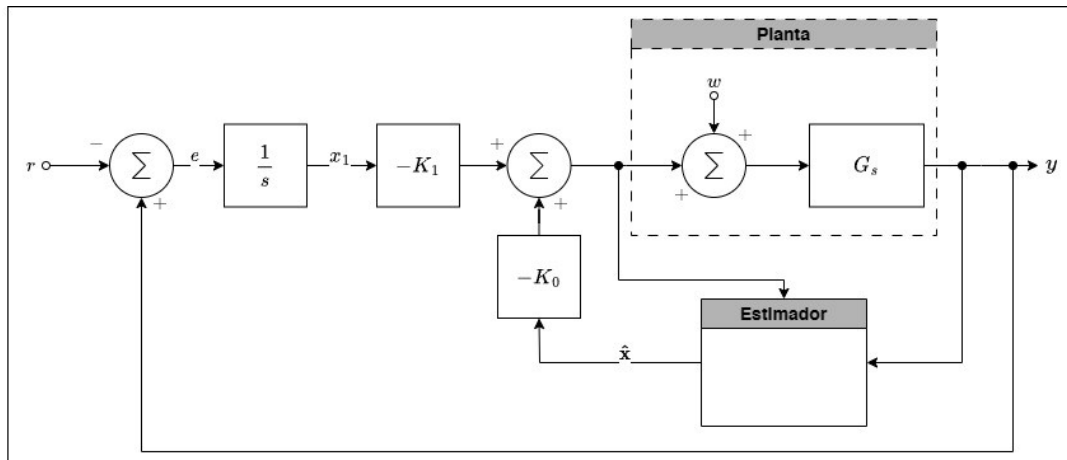
$$k_0 = -\frac{2kI_0}{m(x_0 + \mu)^2} \quad (6)$$

Ao seguir este roteiro teórico o estudante verifica a semelhança dinâmica deste sistema com outros clássicos da Engenharia de Controle, como o pêndulo invertido (OGATA, 2010, p. 63). É interessante pontuar que o todo o roteiro teórico foi desenvolvido utilizando matemática simbólica, que é um adicional importante ao arcabouço de ferramentas de Engenharia.

Controle aplicado

O controlador escolhido para estabilizar o sistema MAGLEV simulado foi um compensador integral (FRANKLIN, 2013) por realimentação de estados, que apresenta vantagens como a erro em regime permanente zero e rejeição de distúrbios do tipo degrau, aumentando a robustez do processo (FRANKLIN, 2013, p. 436). Por uma questão de simplicidade, os pólos do regulador foram escolhidos como sendo reais e iguais em $s = -p$, onde recomenda-se p três vezes maior em módulo que os pólos de malha aberta. Os pólos do estimador de estados foram escolhidos de forma semelhante em $s = -q$, onde q é escolhido em função de p . A estrutura do controlador é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de controle integral.



Fonte: Adaptado de FRANKLIN (2013)

Vale frisar que o compensador implementado utiliza um observador de ordem completa (NISE, 2012). Devido ao sistema ser de ordem baixa, o projeto do controlador pôde ser feito de forma analítica, utilizando computação simbólica. A realização do compensador é feita através da equação de estados parametrizada em termos do sistema e das especificações de projeto, de acordo com a Equação (7) e a saída do controlador é dada pela Equação (8).

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} -2q & 1 & 0 \\ -\lambda^2 - 3p^2 - q^2 & -3p & p^3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{z} + \begin{bmatrix} 2q & 0 \\ -\lambda^2 + q^2 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ r \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$u = - \begin{bmatrix} \frac{-\lambda - 3p^2}{k_0} & \frac{-3p}{k_0} & \frac{p^3}{k_0} \end{bmatrix} \mathbf{z} \quad (8)$$

Em que, $\mathbf{z}$ são os estados do compensador, $x_1 = x_1 - x_0$ é a saída do sistema linearizado para correção de estimativas e r é o sinal de rastreamento. Juntamente com a Equação (1) e Equação (2), a Equação (7) permite simular o sistema em malha fechada.

Simulação numérica

A simulação numérica de Sistemas de Controle é uma etapa importante no processo de projeto e análise na maioria dos trabalhos de Engenharia (OGATA, 2010, p. 668). Neste trabalho, a simulação consiste em resolver numericamente a Equação (1), Equação (2) e Equação (7), e utilizar os resultados para alimentar os módulos de animação gráfica. As funções Python utilizadas pertencem à biblioteca SciPy, que utiliza um solver de integração numérica baseado no algoritmo Runge-Kutta de passo variável (SCIPY, 2023).

Além das equações não-lineares e do controlador, foram adicionados recursos de programação para tornar a simulação um pouco mais realista: ruído branco Gaussiano foi adicionado ao sinal de saída para simular o ruído proveniente dos sensores reais da planta e limitadores de amplitude foram adicionados à entrada do controlador para garantir que a corrente simulada do eletroímã permaneça dentro de valores realistas.

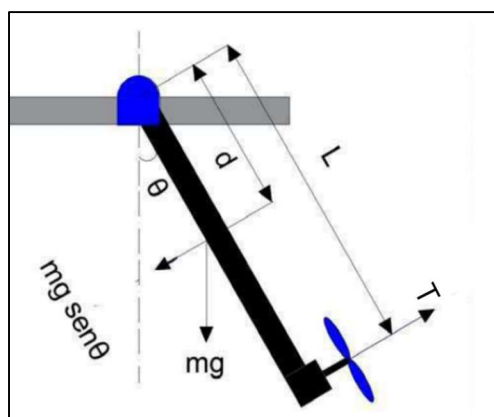
2.2 Módulo 2 – Aero Pêndulo

O Aero Pêndulo combina os princípios de aerodinâmica ao problema do pêndulo simples. Fisicamente, o sistema consiste de uma haste presa a um ponto fixo, com uma hélice em uma das extremidades. A hélice produz empuxo aerodinâmico que propulsiona o pêndulo a oscilar em modo forçado.

Modelagem do sistema físico

A Figura 2 apresenta um esquemático com os parâmetros do Aero Pêndulo.

Figura 2 – Esquemático com os parâmetros do Aero Pêndulo.



Fonte: Adaptado de SILVA (2018)

Usando as leis de Newton pode-se encontrar um modelo matemático que descreve o movimento do Aero Pêndulo, conforme a Equação (9) (MOHAMMADBAGHERI et al., 2011, p. 2).

$$T = J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mgd \sin(\theta) \quad (9)$$

Em que, T é o empuxo gerado pela hélice, J é o momento de inércia, θ é a posição do Aero Pêndulo, c é o coeficiente de amortecimento viscoso, m é o peso do Aero Pêndulo e d é a distância entre o centro de massa e o ponto de pivô.

A hélice que constitui o atuador do sistema é normalmente conectada a um motor elétrico controlado por uma tensão V , cuja relação com o torque T é não linear, porém é possível aproximá-la razoavelmente por uma equação linear (AHMAD et al., 2021, p.1), como é apresentado na Equação (10).

$$T \approx K_m V \quad (10)$$

Desta forma, combinando a Equação (9) e Equação (10), obtém-se a Equação (11) que descreve o movimento do sistema, entre os sinais de entrada e saída de interesse.

$$K_m V = J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mgd \sin(\theta) \quad (11)$$

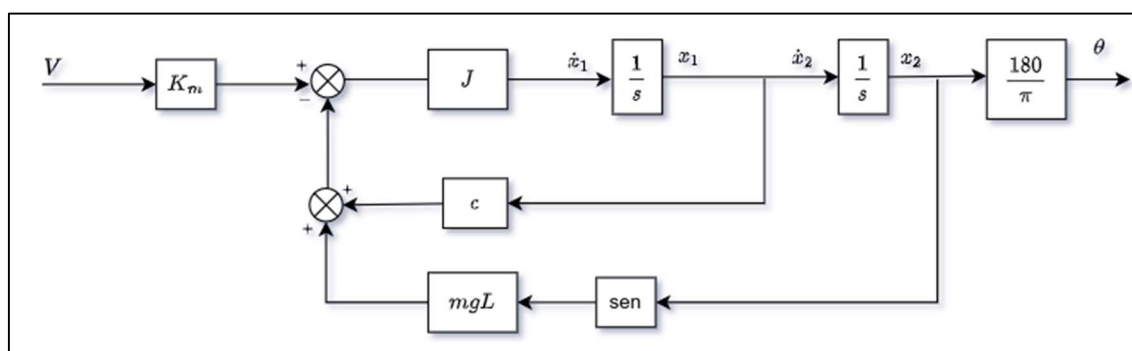
O diagrama de blocos ilustrado na Figura 3 permite a identificação das equações de estados do sistema, apresentadas na Equação (12) e Equação (13), que se mostram importantes para a simulação do sistema utilizando o solver numérico já descrito.

$$\dot{x}_2 = x_1 \quad (12)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{-x_1 c - mgd \sin(x_2) + V K_m}{J} \quad (13)$$

Em que, V é tensão de entrada do motor CC série, K_m é a relação entre o torque e a tensão, x_1 e x_2 são os estados do sistema.

Figura 3 – Diagrama de blocos do modelo do Aero Pêndulo.



Fonte: Os Autores

Função de Transferência do Controlador

O modelo linearizado do Aero Pêndulo pode ser encontrado facilmente admitindo-se a aproximação de pequenos ângulos $\sin(\theta) \approx \theta$, o que resulta na Equação (14). A função de transferência do sistema na Equação (15) decorre diretamente da Equação (14).

$$K_m V = J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mgd\theta \quad (14)$$

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_m/J}{s^2 + sc/J + mgd/J} \quad (15)$$

O controlador para o sistema Aero Pêndulo foi projetado utilizando o método do Lugar da Raízes (FRANKLIN, 2013, p. 190). Observou-se que um controle Proporcional-Integral (PI) simples serviria ao propósito da simulação. A função de transferência obtida é descrita como a Equação (16).

$$C(s) = \frac{0,2126s + 0,7893}{s} \quad (16)$$

Da mesma forma que o MAGLEV, o controlador é revertido para uma equação de estados que, juntamente com a Equação (12) e Equação (13), representam o sistema em malha fechada.

Simulação Numérica e Gráfica

A simulação do módulo Aero Pêndulo é dividida em duas partes: gráfica e numérica. A parte gráfica inclui animação 3D e gráficos dos sinais, permitindo análise do resultado em diferentes perspectivas. A parte numérica é implementada em uma classe Python que lida apenas com a solução numérica das equações de estados.

3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Até este ponto, os sistemas foram tratados de forma diferente devido à derivação dos aspectos matemáticos serem bastante distintos. No entanto, a implementação computacional dos dois foi basicamente a mesma. A seguir são discutidos os aspectos utilizados para a realização dos módulos.

3.1 Linguagem Python e suas bibliotecas

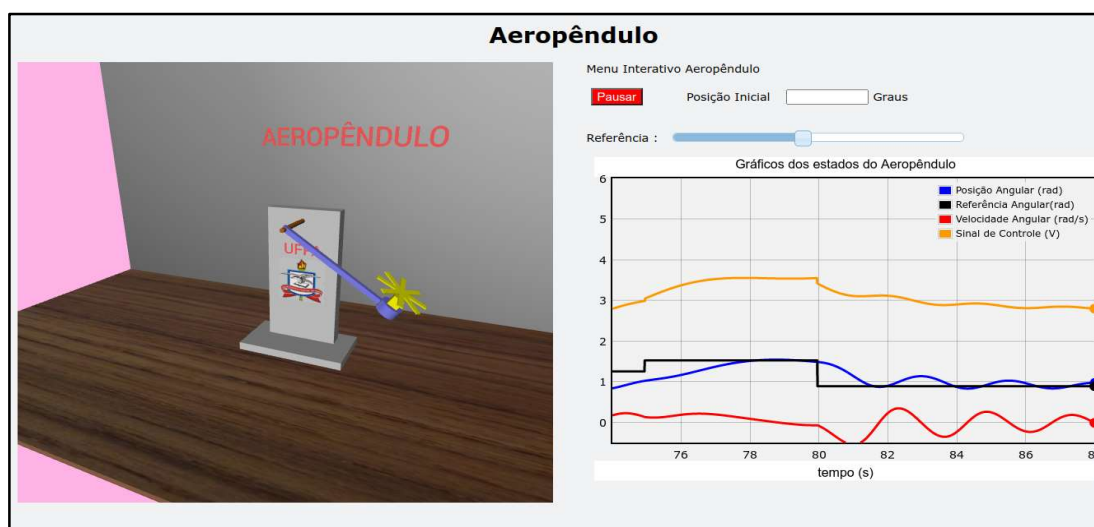
Conforme já comentado, a proposta do laboratório é majoritariamente desenvolvida na linguagem Python, do projeto teórico às animações. A linguagem de programação Python foi criada no início dos anos 90 por Guido van Rossum enquanto trabalhava no Centrum Wiskunde & Informatica (CWI), nos Países Baixos. Trata-se de uma linguagem de alto nível, sua simplicidade e flexibilidade tornam-na uma escolha popular para diversas aplicações em ciência de dados, inteligência artificial, análise de dados, entre outras áreas. Essas características fazem do Python uma das linguagens de programação mais populares e amplamente utilizadas em todo o mundo (MENEZES, 2010).

Os principais pacotes utilizados no desenvolvimento deste estudo foram: NumPy, SciPy, SymPy e Control. Além disso, foram criadas funções e classes específicas às necessidades deste projeto, visando maior modularidade e melhor distribuição do código.

3.2 A biblioteca VPython

De particular destaque para o trabalho é a biblioteca VPython, onde foram desenvolvidas as animações 3D para visualização dos resultados de simulação, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Simulador Aero Pêndulo.



Fonte: Os Autores

O VPython é uma biblioteca que permite a criação de animações interativas em tempo real (GLOWSCRIPT, 2023). Com uma ampla variedade de recursos, o VPython é uma ferramenta interessante para simulação de fenômenos físicos para fins pedagógicos.

As interfaces gráficas dos módulos desenvolvidos foram projetadas de forma a permitir ao usuário interagir diretamente com o sistema simulado. Além dos botões para alterar os parâmetros de simulação, foram incluídos gráficos para análises mais detalhadas do comportamento do sistema. Dessa forma, o usuário pode observar o sistema em ação e, ao mesmo tempo, visualizar os dados gerados pela simulação

3.3 Proposta pedagógica

Durante as aulas de Engenharia de Sistemas de Controle, muitos alunos reportam dificuldades de relacionar o conteúdo da disciplina aos sistemas físicos aos quais ela se propõe a discutir. Um exemplo recorrente é a dificuldade de interpretar fisicamente os gráficos cartesianos de sinais de saída e de controle do sistema. Neste sentido, a visualização do fenômeno torna-se ainda mais importante, principalmente quando se trata de sistemas onde os sinais representam movimento.

No entanto, a visualização do processo real normalmente requer disponibilidade de equipamento, o que normalmente esbarra em dificuldades de custo ou escala. Neste caso, a abordagem virtual é uma alternativa atraente, uma vez que permite a todos os alunos da turma visualizar relativamente bem o fenômeno, sem ônus material. A simulação é, obviamente, limitada em complexidade se comparada ao fenômeno real, mas melhorias gráficas progressivas podem torná-la cada vez mais convincente.

Inicialmente, a proposta pedagógica do laboratório virtual é estimular os estudantes a desenvolver módulos de código Python que permitam visualizar os resultados do projeto de controladores através de animações 3D desenvolvidas em VPython. A simplicidade da biblioteca permite que os estudantes realizem a tarefa sem se dedicar excessivamente à programação gráfica, sem perder o foco no assunto relativo à Engenharia. Além disso, os programas serão desenvolvidos em código aberto e ficarão disponíveis através de canais de distribuição acessíveis, por exemplo, o GitHub, o que permite que outros alunos construam versões melhoradas tomando trabalhos anteriores de seus pares como ponto de partida.

Os dois primeiros módulos apresentados até aqui constituem o estágio piloto da proposta. Eles foram desenvolvidos por estudantes que já passaram pelas disciplinas de Sistemas de Controle, mas relataram ainda possuir dúvidas semelhantes ao que já foi exposto. Através da experiência de desenvolvimento, além de reforçarem os conceitos sobre Sistemas de Controle, os alunos tiveram oportunidade de conhecer ferramentas de animação e exercitar habilidades como trabalho em equipe, programação científica e controle de versão. Espera-se que, através da replicação e aperfeiçoamento desta metodologia ao longo dos próximos semestres (possivelmente ofertando aos alunos das turmas em curso), a oferta das disciplinas se torne mais dinâmica no aprendizado do conteúdo.

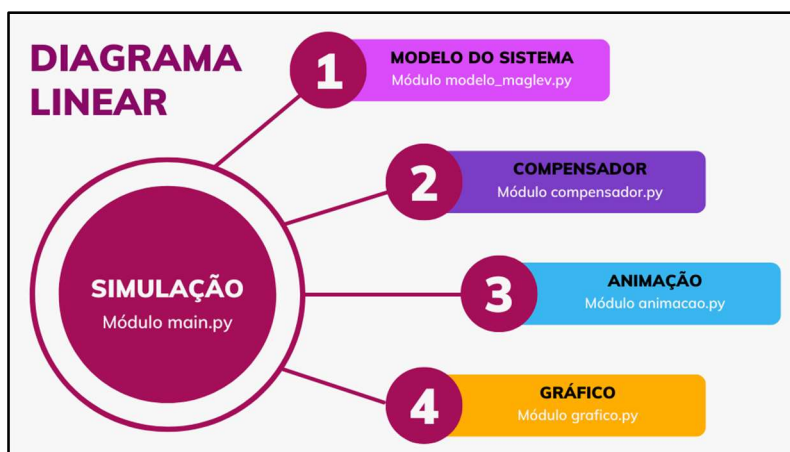
4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados alguns dos resultados obtidos nesta primeira iteração do projeto do laboratório virtual de sistemas controle.

4.1 Módulo 1 - MAGLEV

A simulação do sistema MAGLEV foi desenvolvida em módulos de programas, ilustrados na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama linear dos módulos utilizados.



Fonte: Os Autores

O módulo "*modelo_maglev.py*" desempenha um papel fundamental no estudo do sistema MAGLEV, fornecendo o modelo embutido necessário para análises e simulações. Esse módulo encapsula todas as informações relevantes do sistema, como parâmetros, equações e comportamento dinâmico. Ele também é responsável pelo cálculo das equações de estado em malha fechada.

O módulo "*compensador.py*" realiza o projeto numérico de um compensador para um sistema de controle, utilizando técnicas como ganho integral e observador para estabilizar o sistema em malha fechada. Essa classe encapsula o processo de projeto do compensador, fornecendo as matrizes e vetores necessários para a implementação do compensador no sistema de controle.

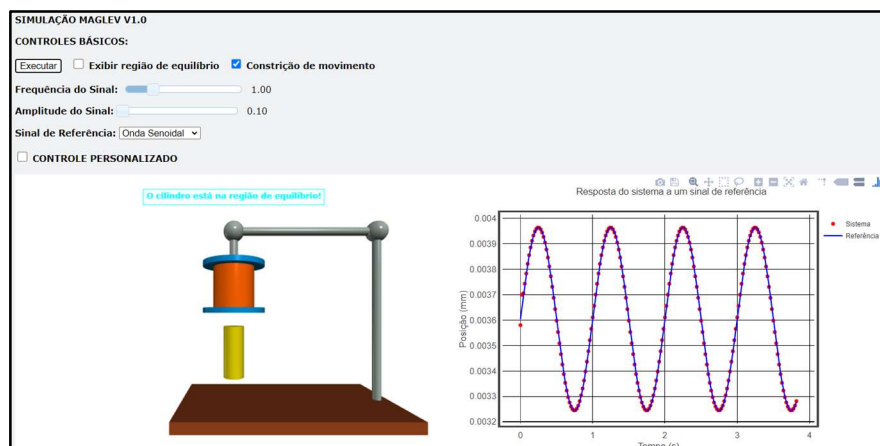
O módulo "*grafico.py*" foi desenvolvido com o objetivo de exibir um gráfico cartesiano do sinal da posição do cilindro em função do tempo, permitindo que o usuário visualize e analise o comportamento do sistema da forma usual como é apresentado em livros textos sobre o assunto.

O módulo "*animacao.py*" foi criado com o objetivo de construir o ambiente 3D que é apresentado ao usuário. O módulo cria objetos como a mesa, a estrutura e o cilindro flutuante, todos componentes da biblioteca VPython. Adicionalmente, diversos controles interativos foram adicionados à interface, permitindo que o usuário possa modificar a frequência e a amplitude do sinal, bem como selecionar diferentes tipos de rastreamento. Outra funcionalidade importante que foi adicionada é a possibilidade de inserir um controlador personalizado, por meio do fornecimento das matrizes de estados.

O módulo "*main.py*" desempenha um papel central no programa, pois é responsável por importar os outros módulos e executar a simulação do sistema. Além disso, ele também define os sinais de referência utilizados para o rastreamento, incluindo um sinal senoidal e uma onda quadrada. Uma funcionalidade importante implementada nesse módulo é a adição de ruído à saída do sistema, a fim de tornar a simulação mais realista. Essa função permite introduzir variações aleatórias na saída do sistema, simulando as perturbações e incertezas presentes em situações reais.

Na simulação do sistema MAGLEV, foi possível observar o comportamento do cilindro flutuante em função do tempo, de acordo com diferentes sinais de referência e controladores implementados pelo usuário. Na Figura 6 pode ser visto o funcionamento da simulação.

Figura 6 – Simulação da bancada MAGLEV.

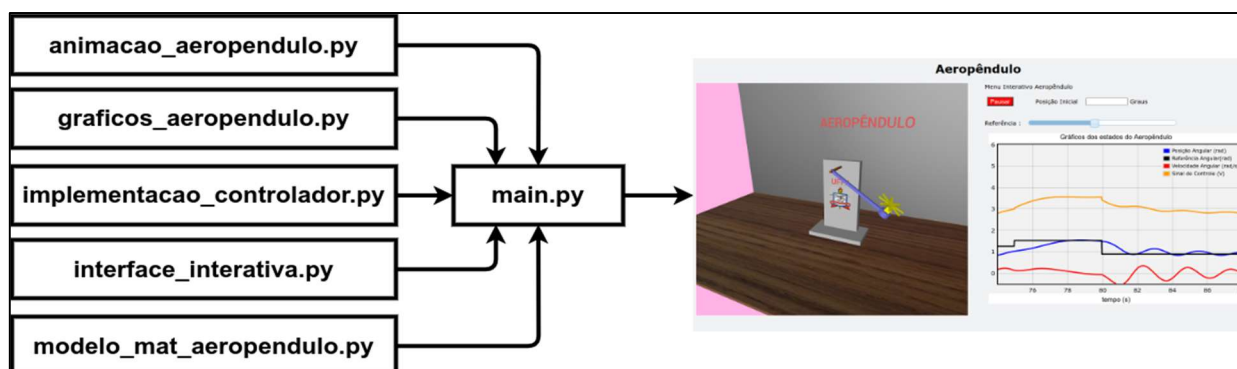


Fonte: Os Autores

4.2 Módulo 2 - Aero Pêndulo

Da mesma forma que o MAGLEV, o programa para simular o Aero Pêndulo foi modularizado para tornar o código mais organizado e legível. A Figura 7 apresenta a estrutura geral do projeto. Diferentes classes foram criadas em arquivos .py distintos e importadas para um programa principal que instancia os objetos de forma adequada.

Figura 7 – Estrutura dos arquivos Python.



Fonte: Os Autores

O módulo “animacao_aeropendulo” usa a biblioteca VPython para construir a estrutura 3D do simulador. A geração dos gráficos para ilustrar os sinais dos estados do sistema é realizada pelo módulo “graficos_aeropendulo”. Os controladores e o sinal de controle são criados a partir do módulo “implementacao_controlador”. O desenho da interface gráfica que permite a interação do usuário com o simulador advém do módulo “interface_interativa”. O módulo “modelo_mat_aeropendulo” implementa as equações de estados e retorna à solução, que é usada para guiar as animações e plotar os gráficos dos

sinais. Finalmente, o módulo “*main*” importa todos os outros módulos e realiza a interface entre as partes numérica e gráfica do simulador.

A tela do simulador foi mostrada na Figura 4, onde é possível visualizar a animação 3D e os gráficos da simulação. Todos os sinais mostrados estão em malha fechada com o controlador PI projetado conforme a Seção 2.2. Observa-se que o sistema se comporta de maneira coerente com a teoria, com erro de regime nulo. Os controles interativos do simulador permitem modificar a posição inicial do pêndulo além da amplitude de uma referência degrau.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento das simulações se mostrou um projeto bastante recompensador aos discentes envolvidos. Ao engajar os alunos em desenvolver duas simulações animadas de controle em malha fechada, o MAGLEV e o Aero Pêndulo, foi possível iniciar uma metodologia que tende a tornar o ensino do assunto menos tedioso e mais visualmente atrativo. O trabalho motivou os discentes a aperfeiçoar o conhecimento sobre sistemas de controle, além de adquirir novas habilidades de programação, trabalho em equipe e desenvolvimento de software com controle de versão. Isso demonstra que o laboratório virtual é uma forma promissora de reduzir os obstáculos no ensino de sistemas de controle em cursos de Engenharia.

Apesar desta primeira iteração ter sido bem sucedida, há muitos desafios a serem vencidos. Um deles é a distribuição do pacote de programas. Para distribuir os códigos, é possível utilizar o sistema de distribuição PyPI, uma plataforma que permite compartilhar e instalar pacotes de software escritos em Python (PYPI, 2023). Os pacotes podem ser instalados usando o gerenciador de pacotes padrão da linguagem, tornando a instalação e execução das simulações mais fácil e rápida. Apesar disso, o formato requer a instalação local de um interpretador Python e de todos os pacotes necessários, incluindo o VPython. Isto pode ser inconveniente em alguns cenários, uma vez que há uma forte tendência atualmente em utilizar plataformas de *scripting* que rodam no próprio navegador da Internet, por exemplo, os largamente utilizados *Jupyter notebooks*. Infelizmente, estes se mostram inviáveis, de utilizar com o VPython, ao menos em um primeiro momento sem maior intervenção pelo programador, devido às dificuldades de chamar as rotinas gráficas remotamente.

Neste contexto, é curioso observar que o próprio distribuidor do VPython oferece um interpretador online, que permite criar animações 3D em qualquer navegador, independente do sistema operacional. Porém, o sistema não se mostrou oportuno a este projeto pois ele não permite a importação de pacotes adicionais importantes, tais como o módulo Python-Control. Vale frisar que os discentes do projeto procuraram encontrar soluções para ambos os problemas, mas os esforços se mostraram fora do escopo da proposta, haja vista que as ações adentram em aspectos mais profundos de linguagens de programação. Neste contexto, este trabalho pode ser uma oportunidade futura interessante de projeto multidisciplinar, integrando as áreas de Engenharia de Sistemas de Controle e Engenharia/Desenvolvimento de Software.

Finalmente, vale frisar que esta experiência serve de estímulo para atrair outros discentes e fazer o laboratório crescer, principalmente em variedade. Deste ponto em diante, esforços serão enviados para engajar outros discentes a apresentar suas próprias versões (desejavelmente melhoradas) dos sistemas trabalhados, ou de outros sistemas de controle clássicos, tais como o pêndulo invertido, braços robóticos, etc., tornando o

laboratório virtual uma ferramenta cada vez mais atrativa e motivadora aos estudantes de Sistemas de Controle. Os módulos desenvolvidos estão disponíveis em um repositório denominado LabVirtual na plataforma GitHub (TEIXEIRA, 2023).

REFERÊNCIAS

AHMAD, Aftab; RAFIUDDIN, Nidal; KHAN, Yusuf Uzzaman. Comparative Analysis of ANN and PID Controller of Aero-pendulum on Simscape. In: **2021 IEEE 6th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)**. IEEE, 2021. p. 334-338.

COSTA, Jefferson S.; SILVA, Cleison D.; TEIXEIRA, Raphael B. Modelagem de sistema de levitação magnética por abordagem analítica baseada no conceito de circuitos magnéticos. In: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2012, Belém. **Anais**. Belém.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de controle para engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.

GLOWSCRIPT. **Documentação do VPython**, 2023. Página de documentação. Disponível em: <https://www.glowscript.org/docs/VPythonDocs/index.html>. Acesso em: 05 mai. 2023.

MENEZES, Nilo Ney Coutinho. **Introdução a programação com Python**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2010.

MILHOMEM, Rômulo L. **Construção de uma Bancada Didática de Processo de Levitação Magnética-MAGLEV**. 2010. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Tucuruí.

MOHAMMADBAGHERI, Amin; YAGHOOBI, Mahdi. A new approach to control a driven pendulum with PID method. In: **2011 UKSim 13th International Conference on Computer Modelling and Simulation**. IEEE, 2011. p. 207-211.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6 ed. São Paulo: Editora LTC, 2012.

NUMPY. **NumPy Documentation**, 2023. Página de documentação. Disponível em: <https://numpy.org/doc/stable/>. Acesso em: 05 mai. 2023.

OGATA, Katsuhiko et al. **Modern control engineering**. 5. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2010.

PYPI. **LabVirtual**, 2023. Página de documentação do projeto Disponível em: <https://pypi.org/project/labvirtual/>. Acesso em: 12 mai. 2023.

SCIPY. **SciPy Documentation**, 2023. Página de documentação. Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/>. Acesso em: 05 mai. 2023.

SYMPY. **SymPy Documentation**, 2023. Página de documentação. Disponível em:
<https://www.sympy.org/en/index.html>. Acesso em: 06 mai. 2023.

SILVA, Y. L. M. **Projeto, construção e controle de um aeropêndulo**. 2018. 43 f.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de
Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina
Grande. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/18954>.
Acesso em: 01 jun. 2023.

TEIXEIRA, Raphael. **LabVirtual**. Disponível em:
<https://github.com/raphateixeira/LabVirtual>. Acesso em: 01 mai. 2023.

EXPLORING THE POTENTIAL OF VIRTUAL LABORATORY FOR SYSTEM CONTROL USING VPYTHON IN ENGINEERING EDUCATION: ANALYSIS AND FUTURE PERSPECTIVES

Abstract: *This article describes the development of system control simulations using the VPython library and the PyPi platform. The simulation results demonstrate the effectiveness of using these tools in the engineering education process, providing a practical and interactive experience for students. The MAGLEV and Aero Pendulum simulations were developed and their results were presented and discussed in detail. Based on the results obtained, it was concluded that simulations are effective for teaching system control, as they allow students to visualize and understand theoretical concepts learned in the classroom in a practical way. In the future, it is expected to expand the use of these tools to other areas of knowledge, as well as to implement new simulations to further enrich the teaching and learning process.*

Keywords: *system control, simulation, VPython, PyPi, engineering education.*

Referências

- BLANCO-SILVA, F. J. *Learning SciPy for numerical and scientific computing*. [S.l.]: Packt Pub., 2013. Citado na página 13.
- COLUCI, V. R. Animações de conceitos da teoria de erros usando manim/python. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 44, p. e20210239, 2021. Citado na página 13.
- FULLER, S. et al. The python control systems library (python-control). In: IEEE. *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. [S.l.], 2021. p. 4875–4881. Citado na página 13.
- MCGUGAN, W. *Beginning game development with Python and Pygame: from novice to professional*. [S.l.]: Apress, 2007. Citado na página 13.
- OLIPHANT, T. E. et al. *Guide to numpy*. [S.l.]: Trelgol Publishing USA, 2006. v. 1. Citado na página 13.
- WEATHERFORD, S. A. *Student use of physics to make sense of incomplete but functional VPython programs in a lab setting*. [S.l.]: North Carolina State University, 2011. Citado na página 11.

ANEXO A – DECLARAÇÃO DE AUTORIZAÇÃO EMITIDA PELOS DEMAIS AUTORES DO TRABALHO INCORPORADO

Na próxima página encontra-se a declaração de autorização que possibilita a utilização do trabalho apresentado como parte integrante do trabalho escrito, para compor o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANEXO II: Declaração de autorização emitida pelos demais autores do trabalho incorporado.

Declaração de Autorização

Tucuruí-PA, 18 de JULHO de 2023.

Ao colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica do CAMTUC/UFPA, e a quem possa interessar;

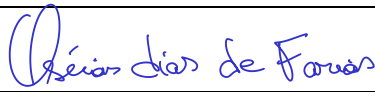
Eu, **YURI DE OLIVEIRA COTA (201933940045)**, DECLARO ter sido autorizado por todos os discentes (autores), abaixo relacionados, incluindo o docente responsável (orientador), para a utilização do trabalho técnico-científico intitulado **“Explorando o potencial do Laboratório Virtual de Controle de Sistemas com VPython no ensino de Engenharia: Análise e perspectivas para o futuro”**, apresentado no **“Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE 2023”**, realizado no **“Rio de Janeiro”**, no período de **“18 de setembro à 20 de setembro de 2023”**, como parte integrante do Trabalho Escrito, para cumprimento da componente curricular EL18060 – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, segundo a RESOLUÇÃO Nº01/2023 – FEE/CAMTUC, que trata da flexibilização da atividade curricular de TCC por meio da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº01/2023 – PROEG/UFPA.

O(s) discente(s), também, declara(ram) a ciência da **impossibilidade de reutilização** do trabalho técnico-científico mencionado por qualquer outro autor para a mesma finalidade. Esta declaração terá validade, se, e somente se, acompanhada das assinaturas de todos os autores listados abaixo.

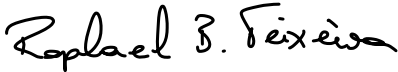
Nada mais a declarar, agradeço a atenção e consideração.

YURI DE OLIVEIRA COTA

Relação dos discentes co-autores:

MATRÍCULA	NOME COMPLETO	ASSINATURA
201733940002	OSEIAS DIAS DE FARIAS	

Docente responsável e orientador do trabalho técnico-científico:

MATRÍCULA	NOME COMPLETO	ASSINATURA
1546620	RAFAEL SUZUKI BAYMA	
1805609	RAPHAEL BARROS TEIXEIRA	

OBS: Recomenda-se que as assinaturas de todos sejam realizadas via SIPAC.