

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA MASSA-MOLA-AMORTECEDOR UTILIZANDO OPEN MODELICA

PEDRO M. CLEMONINI¹, JOÃO V. PELEGRINO², ROGÉRIO D. DANTAS³, WILSON C. S. JUNIOR⁴

¹Graduando em Engenharia de Computação, Bolsista PIBIC/CNPq, IFSP, Câmpus Guarulhos, p.clemonini@aluno.ifsp.edu.br

²Mestrando em Engenharia Mecânica, IFSP, Câmpus São Paulo, v.pelegrino@aluno.ifsp.edu.br;

³Mestre em Engenharia de Informação e Docente, IFSP, Câmpus Guarulhos, rogerio.dantas@ifsp.edu.br;

⁴Doutor em Engenharia Biomédica e Docente, IFSP, Câmpus Guarulhos, wilsoncarlos@ifsp.edu.br;

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.05.04.07-4 Controle de Sistemas Mecânicos

RESUMO:

Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de um sistema massa-mola-amortecedor utilizando a linguagem Modelica, com foco na geração de dados sintéticos para gêmeos digitais. A abordagem emprega Equações Diferenciais Ordinárias para representar o comportamento dinâmico do sistema, considerando parâmetros como massa, constante elástica e amortecimento. A simulação foi realizada no OpenModelica e os resultados analisados via Transformada Rápida de Fourier (FFT) em Python. Observou-se que a frequência natural do sistema determina o comportamento oscilatório e que diferentes tipos de excitação afetam a resposta sem alterar os parâmetros físicos. Para uma força excitadora senoidal de 20 Hz, identificaram-se duas frequências dominantes: 19,92 Hz, próxima da excitação imposta, e 15,94 Hz, correspondente à frequência natural do sistema. Já com a aplicação de um sinal em degrau, verificaram-se múltiplas componentes no espectro, associadas à resposta transitória do sinal. Os resultados demonstram a aplicabilidade do Modelica para a modelagem de sistemas ciberfísicos e sua utilidade na criação de cenários operacionais para gêmeos digitais, destacando limitações e perspectivas para futuras implementações.

PALAVRAS-CHAVE: teoria de controle, modelica, simulação, gêmeos digitais

SIMULATION OF A MASS-SPRING-DAMPER SYSTEM USING OPENMODELICA

ABSTRACT:

This work presents the modeling and simulation of a mass-spring-damper system using the Modelica language, focusing on the generation of synthetic data for digital twins. The approach employs Ordinary Differential Equations to represent the system's dynamic behavior, considering parameters such as mass, spring constant, and damping coefficient. The simulation was carried out in OpenModelica, and the results were analyzed using the Fast Fourier Transform (FFT) in Python. It was observed

that the system's natural frequency determines the oscillatory behavior and that different types of excitation affect the response without altering the physical parameters. For a sinusoidal excitation force of 20 Hz, two dominant frequencies were identified: 19.92 Hz, close to the imposed excitation, and 15.94 Hz, corresponding to the system's natural frequency. When a step signal was applied, multiple components were observed in the spectrum, associated with the transient response of the signal. The results demonstrate the applicability of Modelica for modeling cyber-physical systems and its usefulness in creating operational scenarios for digital twins, highlighting limitations and perspectives for future implementations.

KEYWORDS: control theory, Modelica, simulation, digital twins

INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda da indústria por ambientes conectados, seguros e com redução de custos, diversas tecnologias têm sido empregadas no chão de fábrica atualmente. Segundo Wang et al. (2023), sensores baseados em Internet das Coisas (IoT) são conectados a equipamentos mecânicos e reportam dados de funcionamento que podem indicar falhas ou necessidade de manutenção preventiva. O armazenamento desses dados sustentou a proliferação de técnicas de inteligência artificial, como aprendizado de máquina e redes neurais. No campo das vibrações em equipamentos rotativos, essas técnicas são utilizadas para prever a vida útil remanescente (RUL) e detectar falhas em rolamentos. Entretanto, a escassez de dados reais impacta negativamente o desempenho dos modelos, pois são caros e difíceis de obter em testes físicos repetitivos.(ZHAO et al., 2023). Uma alternativa é a utilização de gêmeos digitais (*Digital Twins, DT*), modelos virtuais que simulam ativos reais. Protótipos virtuais e gêmeos digitais têm um papel importante a desempenhar. Eles podem ser usados para modelar sistemas complexos — desde carros até cidades e corpos humanos — e simular seu funcionamento com uma precisão que permite ao usuário passar diretamente de um modelo virtual para a criação, sem gastar os anos que normalmente levaria para prototipar e aprimorar incrementalmente os projetos existentes. (FRITZSON, 2021). Este trabalho apresenta uma abordagem baseada em Equações Diferenciais Ordinárias modeladas em linguagem Modelica para simulação do comportamento dinâmico de sistemas físicos, permitindo a geração de dados sintéticos que podem ser integrados em gêmeos digitais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, utilizou-se a linguagem Modelica, uma linguagem *open source* desenvolvida pelo *Open Source Modelica Consortium* (OSMC) de paradigma orientado a objetos, acausal e multi-domínio para modelagem de sistemas ciberfísicos.(ASSOCIATION, 2025). Comparado ao método de modelagem do Simulink, baseado em relações digitais, o método de modelagem do Modelica é fundamentado principalmente na topologia física real do objeto modelado, tornando o modelo mais fácil de compreender, enquanto o método de modelagem modular aumenta a conveniência de uso. Em comparação com métodos como o uso de elementos finitos para executar modelos, o método Modelica exerce menor pressão computacional e pode aumentar significativamente a velocidade de execução. (WU et al., 2025).

Diversas empresas de softwares de simulação utilizam a linguagem Modelica como motor para seus ambientes de simulação, onde possuem bibliotecas mais robustas e integração com outras ferramentas, como é o caso do *Dymola* da *Dassault Systèmes* ou *Twin Builder* da *Ansys*, o *OpenModelica* é uma

implementação *open source* e oferece um ambiente gráfico, compilador (OMC), *debugger* e bibliotecas para modelagem dos sistemas além de fornecer integração para interfaces de comunicação desenvolvidas pela própria OSMC, como é o caso do padrão *Functional Mockup-up Interface*(FMI) que permite a integração e troca de informações entre modelos desenvolvidos em linguagem Modelica em outros softwares e ferramentas, como visto em Modelica Association (2024)

O sistema estudado é o massa–mola–amortecedor, representando um oscilador sujeito à ação da mola, da inércia da massa e da força dissipativa do amortecedor. Esse modelo descreve situações práticas em que o movimento tende a reduzir devido à dissipação de energia.

A construção no Modelica utiliza blocos da biblioteca padrão e valores definidos de maneira arbitrária: mola com comprimento não esticado $s_0 = 1m$ e constante elástica $k = 10000N/m$, massa $m = 1kg$, amortecedor com constante de amortecimento $d = 1N\ s/m$ e força excitada por um sinal senoidal de amplitude $A = 1N$ e frequência $f = 20Hz$. A Figura1 a seguir, apresenta o diagrama do sistema.

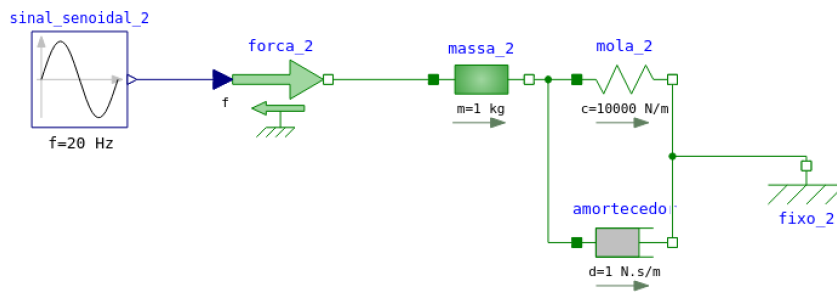


Figura 1: Sistema Massa–Mola–Amortecedor

O código de cada componente permite a análise individual de suas equações. A mola segue a Lei de Hooke (Equação 2), a massa obedece à segunda lei de Newton (Equação 3) e o amortecedor aplica uma força proporcional à velocidade (Equação 4).

É possível obter a frequência natural esperada no sistema com base na (Equação 1), utilizando o valor de $m = 1kg$ e $k = 10000N/m$ assim a frequência correspondente será $f = 15.94Hz$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (1)$$

$$F = kx \quad (2)$$

```

1 within Modelica.Mechanics.Translational.Components;
2 model Spring "Linear 1D translational spring"
3 extends Translational.Interfaces.PartialCompliant;
4 parameter SI.TranslationalSpringConstant c(final min=0, start=1)
5 "Spring constant";
6 parameter SI.Distance s_rel0=0 "Unstretched spring length";
7
8 equation
9   f = c*(s_rel - s_rel0);
10  annotation ( ... );
37 end Spring;
38

```

Figura 2: Trecho de código referente ao componente mola.

$$F = m\ddot{x} \quad (3)$$

```

1 within Modelica.Mechanics.Translational.Components;
2 model Mass "Sliding mass with inertia"
3   parameter SI.Mass m(min=0, start=1) "Mass of the sliding mass";
4   parameter StateSelect stateSelect=StateSelect.default
5     "Priority to use s and v as states" annotation(Dialog(tab="Advanced"));
6   extends Translational.Interfaces.PartialRigid(L=0,s(start=0, stateSelect=
7     stateSelect));
8   SI.Velocity v(start=0, stateSelect=stateSelect)
9     "Absolute velocity of component";
10  SI.Acceleration a(start=0) "Absolute acceleration of component";
11
12  equation
13    v = der(s);
14    a = der(v);
15    m*a = flange_a.f + flange_b.f;
16  annotation ( ... );
17 end Mass;

```

Figura 3: Trecho de código referente ao componente massa.

$$F = c\dot{x} \quad (4)$$

```

1 within Modelica.Mechanics.Translational.Components;
2 model Damper "Linear 1D translational damper"
3   extends Translational.Interfaces.PartialCompliantWithRelativeStates;
4   parameter SI.TranslationalDampingConstant d(final min=0, start=0)
5     "Damping constant";
6   extends
7     Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.PartialElementaryConditionalHeatPortWithoutT;
8   equation
9     f = d*v_rel;
10    lossPower = f*v_rel;
11  annotation ( ... );
12 end Damper;

```

Figura 4: Trecho de código referente ao componente amortecedor

Baseado nas informações de Halliday, Resnick e Walker (2016), é possível obter a EDO geral do sistema, vista na (Equação 5) no Open Modelica.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (5)$$

Os dados da simulação foram exportados para um arquivo no formato .CSV e tratados em Python para análise aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a resposta do sistema excitado por uma frequência de 20 Hz. À esquerda, observa-se a aceleração do bloco de massa no intervalo de 1 s, onde é possível verificar o comportamento oscilatório do bloco quando submetido a uma força oscilatória senoidal. No período de 0 a 0,2 s, o bloco acelera e retorna à aceleração inicial; em seguida, é excitado pelo sinal senoidal e repete o comportamento. À direita da figura, mostra-se o sinal no domínio da frequência obtido pela aplicação da FFT, no qual se identificam duas frequências dominantes: 15,94 Hz, correspondente à frequência natural indicada na (Equação 1), e 19,92 Hz, um sinal aproximado proveniente da excitação inicial de 20 Hz.

Quando o sinal de entrada é substituído por uma função degrau variando de 1 a 2 em 0,5s, observa-se na (Figura 6) o comportamento divergente de uma oscilação natural. À esquerda da figura, apresenta-se a aceleração do bloco de massa sob excitação inicial de 1 N. Logo depois, quando a aceleração tende a diminuir devido à força contrária do amortecedor, ocorre um pico de sinal em 0,5s, que exerce uma perturbação no sistema e o faz voltar a oscilar. À direita da figura, mostra-se a FFT do sinal, na qual é possível identificar as diferentes frequências dominantes que surgiram no sistema em decorrência dessa

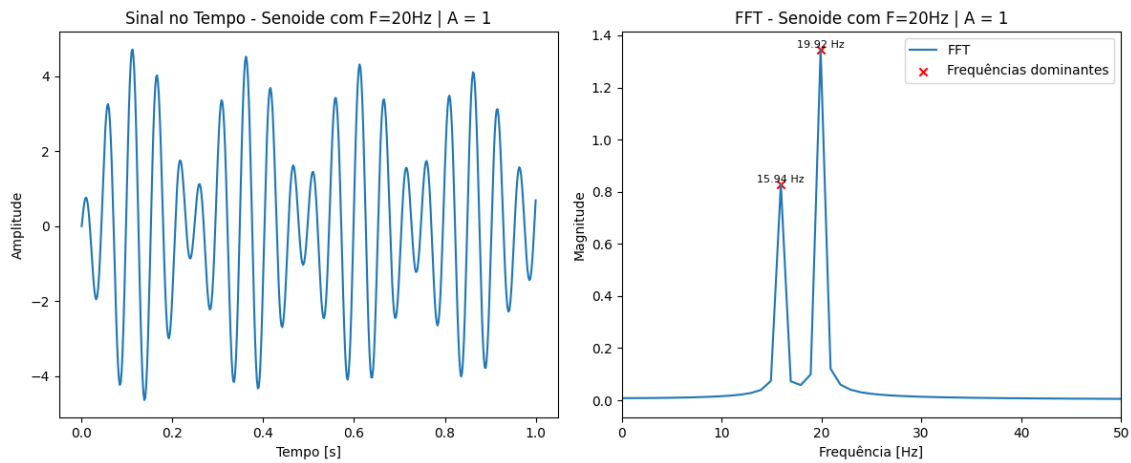


Figura 5: Sinal no tempo e FFT para função senoidal de 20Hz

perturbação adicional.

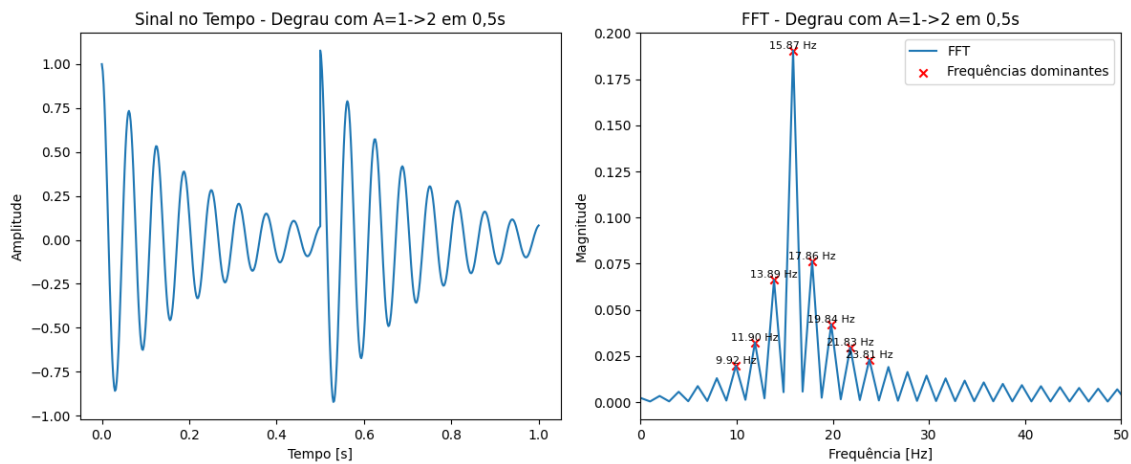


Figura 6: Sinal no tempo e FFT para função degrau

A análise qualitativa mostra que a oscilação observada com o degrau reflete a resposta transitória do sistema à mudança brusca na força aplicada. A frequência natural do sistema permanece a mesma, mas a forma do sinal gera múltiplas componentes espectrais devido à transição abrupta, evidenciando como diferentes tipos de excitação podem influenciar o comportamento dinâmico sem alterar os parâmetros físicos do sistema.

Essa observação é importante para a geração de dados sintéticos em gêmeos digitais, permitindo simular diferentes cenários de operação com um mesmo sistema físico.

CONCLUSÕES

O sistema massa–mola–amortecedor foi modelado e simulado com sucesso no OpenModelica. A análise demonstra que a frequência natural e parâmetros do sistema determinam a resposta dinâmica. Alterações em massa, constante elástica e amortecimento permitem estudar diferentes cenários. O modelo serve como base para geração de dados sintéticos aplicáveis em gêmeos digitais. Como limitações, o modelo não considera não linearidades complexas ou acoplamentos múltiplos presentes em sistemas reais. Futuras implementações podem integrar sensores virtuais, falhas específicas e validação com dados experimentais, expandindo a abordagem para simulação de rolamentos, sistemas mecânicos

mais complexos e integração em ambientes industriais conectados. Acredita-se que com a utilização do OpenModelica será possível utilizar a integração de modelos mecânicos em diversos softwares CAE (Computer Aided Engineering), ampliando para diversas possibilidades de análise e aplicação prática.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Wilson Carlos da Silva Júnior e Rogério Daniel Dantas contribuíram com a concepção e escopo do estudo. Pedro Marques Clemonini e João Victor Pelegrino procederam com a metodologia, experimentos e a escrita do trabalho.

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

REFERÊNCIAS

ASSOCIATION, M. *Modelica language*. [S.l.], 2025. Disponível em: <<https://modelica.org/language/>>. Acesso em: 6 Junho. 2025.

FRITZSON, P. **The Openmodelica Environment for Building Digital Twins of Sustainable Cyber-Physical Systems**. In: *2021 Winter Simulation Conference (WSC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–12.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi.

Modelica Association. *Functional Mock-up Interface (FMI) Standard – Version 3.0.2*. [S.l.], 2024. Acesso em: 6 jun. 2025. Disponível em: <<https://fmi-standard.org/docs/3.0.2/>>.

WANG, Z. et al. **Adaptive staged RUL prediction of rolling bearing**. *Measurement*, v. 222, p. 113478, 2023. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113478>>. Acesso em: 9 Maio. 2025.

WU, J. et al. **Research on deep learning rolling bearing fault diagnosis driven by high-fidelity digital twins**. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, v. 19, n. 2, p. 1439–1450, 2025. ISSN 1955-2505. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12008-024-01859-2>>.

ZHAO, W. et al. **Research on digital twin driven rolling bearing model-data fusion life prediction method**. *IEEE Access*, v. 11, p. 48611–48627, 2023.