

---

## Aplicações de modelos mock para o sistema cardiovascular

Applications of mock models for the cardiovascular system

Aplicaciones de modelos simulados para el sistema cardiovascular

---

Fausto Mori Viana <sup>1</sup>



Alessandro Pereira da Silva <sup>1</sup>



Robson Rodrigues da Silva <sup>1</sup>



---

**Tipo de Publicação:** Resumo Expandido Não-Estruturado

**Área do Conhecimento:** Área Exatas e Tecnologias

---

<sup>1</sup> Universidade de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, SP, Brasil.

---

## 1. INTRODUÇÃO

As doenças cardiovasculares (DCV) são as maiores responsáveis por óbitos em todo o mundo, segundo dados da *World Health Organization*, cerca de 18 milhões de pessoas morrem devido à DCV, ou seja, pouco mais de 32% de todas as mortes registradas. No Brasil ocorrem cerca de 400 mil mortes/ano segundo o Instituto de Estudos Avançados da USP, mais que o dobro se comparada às mortes no mesmo período da pandemia associada à COVID-19. Outros estudos indicam que 72% de todas as mortes que ocorrem por doenças crônicas não transmissíveis (DCNT), 30% são decorrentes de DCV, 16% por neoplasias e 6% por doenças respiratórias<sup>1</sup>.

O sistema cardiovascular é composto pelo sangue, canais sanguíneos, coração e pelo sistema linfático<sup>2</sup>. Suas principais funções são transporte (nutrientes, gases e outros elementos), regulação (temperatura e metabolismo) e proteção (infecções e coagulação). Desenvolver modelos do funcionamento, controle e análise do sistema cardiovascular (SCV) podem reforçar o aprendizado e a compreensão de diversos fatores práticos<sup>3,4</sup>. Vários trabalhos simulam o seu funcionamento através de conjuntos físicos com princípios fluido dinâmicos, outros com modelos computacionais específicos por meio de respostas como ecocardiograma, ressonância magnética, eletrocardiograma (ECG), dentre outros testes, que procuram ampliar o entendimento do SCV<sup>5,6,7</sup>.

Os modelos de simulação podem ser divididos em três categorias principais<sup>4</sup>:

- Modelos *lumped*: por exemplo, esses modelos representam o SCV como um conjunto de compartimentos interconectados;
- Modelos *mock*: esses modelos representam o SCV com mais detalhes, incluindo componentes específicos, como o coração, os vasos sanguíneos e os pulmões;
- Modelos *benchwork*: modelos são construídos com componentes reais, e são usados em pesquisas médicas.

No dinâmico campo da engenharia biomédica, os avanços na modelagem têm representado uma fronteira essencial para a compreensão e inovação no campo da saúde<sup>6,8</sup>. Considerando a crescente demanda por restrições nos testes *in vivo* e os avanços tecnológicos que permeiam diversas áreas, como a Saúde 4.0 ou Saúde Digital (e-saúde), que se aplicam conceitos como Internet das Coisas (IoT), Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), *Big Data*, Inteligência Artificial (IA), Realidade Virtual e Aumentada, entre outros<sup>6,9</sup>, torna-se evidente a importância do desenvolvimento de ferramentas computacionais, como os emuladores.

Estes desempenham um papel crucial na previsão de resultados, na orientação de decisões e no apoio ao treinamento de estudantes e profissionais da saúde em procedimentos médicos, tudo isso sem expor pacientes reais à riscos. Esta revisão propõe-se a explorar os progressos alcançados nas simulações sistêmicas, empregando técnicas emergentes de *mock*<sup>3,4,5,8</sup>.

## 2. OBJETIVO

Elaborar uma revisão simplificada sobre os modelos mock utilizados em componentes fluido mecânicos, simulando o Sistema Cardiovascular.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentro dos critérios de escopo foram considerados modelos que simulem por meio de dispositivos físicos, baseados em componentes fluido mecânicos, o SCV, procurando um conjunto de parâmetros de controle, como pressão sanguínea, gradientes de temperatura, complacência, velocidade de fluxo, gasometria e capacidade dinâmica de aquisição de dados<sup>3,4,5,6</sup>.

Fazendo-se uma prospecção entre o ano de 2000 até o presente<sup>5,6,7</sup>, procurando-se em revisões, artigos, teses, dissertações e material bibliográfico relacionado, foi estratificado, primeiramente, o processo quantitativo em três etapas de seleção e filtragem, por relevância, citações e fator de impacto. E num segundo momento, o processo qualitativo, pela separação e leitura dos materiais por metodologia de pesquisa e aderência com os modelos fluido mecânicos.

A procura foi realizada nas principais base de dados como [PubMed](#), [IEEE Xplore](#), [SpringerLink](#), [ScienceDirect](#), [Wiley Online Library](#), [Scopus](#) e [Google Acadêmico](#). Todos os campos explorados foram nas áreas de engenharia, biomédica e biologia. O período dessa bibliometria foi entre os meses de junho até outubro de 2023. As futuras revisões serão focadas no aperfeiçoamento e comparação das funcionalidades da bancada que será desenvolvida e instrumentada, integrando bases nos campos da matemática e computacional.

O conjunto de palavras-chave utilizadas foram todas usadas no idioma inglês conforme os termos principais em títulos: modelos cardiovascular e circulatório (*cardiovascular and circulatory models*). E para qualquer campo: modelos cardiovascular e circulatório + *lumped/mock/benchmark* (*cardiovascular and circulatory models + lumped or mock or benchmark*); modelos cardiovascular e circulatório + *lumped/mock/benchmark + fluidos* (*cardiovascular and circulatory models + lumped or mock or benchmark + fluids*). Do estudo dos títulos, temas e conteúdo que mais se aproximassem da ideia proposta, obteve-se o resumo indicado na Tabela 1.

Da seleção de artigos relacionados apresentados na Tabela 1, observa-se que na plataforma do Google Acadêmico, os trabalhos\* não puderam serem filtrados de forma eficiente, portanto, não foram usados para a análise. Dos artigos relacionados que mais trouxeram uma visão evolutiva dos modelos *mock* para as simulações do SCV, compreendendo os conjuntos fluido mecânicos, destacaram-se os autores:

- SHI, Y., Lawford, P., Hose, R.<sup>4</sup>, pelo estudo de classificação e atribuição dos níveis de controle para simulação das funções sistêmicas, como a reprodução por meio de circuitos elétricos (resistência, impedância e corrente), para imitar as funções cardíacas, até conceitos mais completos como equipamentos de assistência cirúrgica;

- HIRSCHHORN, M., et al.<sup>5</sup>, pela revisão sistemática que analisa aplicações relacionadas à aneurismas, em suas circunstâncias, através de modelos com interação com fluidos, por meio de procedimentos computacionais e/ou não numéricos, cuja visão da engenharia proporciona uma flexibilidade de opções, como o uso de materiais sintéticos e biocompatíveis;
- MAHMOUD, A. et al.<sup>6</sup>, que fez uma comparação de diferentes modelos focados no uso de canolização e sistema circulatório, com aplicação extracorpórea e *mocks* para treinamentos, mostrando-se uma classificação da fidelidade dos modelos simulados, testes com diferentes técnicas, seus custos e *drawbacks*;
- MESSARRA, B. T., et al.<sup>8</sup>, desenvolve um modelo próprio para treinamentos dos sistemas cardiovascular e circulatório, para aperfeiçoar a simulação com materiais de silicone, impressos por prototipagem 3D, emulando condições de canulização, fluxo sanguíneo e sítios anatômicos;
- FORTIN, J. et al.<sup>10</sup>, apresenta uma “tendência” em relação aos dispositivos tipo *wearables* que seriam um passo à frente nos modelos capazes de aquisição de dados em tempo real, controle e até mesmo, preparar cenários de simulação, mas ainda devem ser analisados os hardwares e fidelidades dos dados, para integrarem outras funcionalidades.

**TABELA 1** – Resumo da pesquisa bibliométrica.

Base de Dados	1ª prospecção (cardiovascular and circulatory models)	2ª prospecção (+ lumped or mock or benchwork)	3ª prospecção (+ fluids)	Seleção dos Artigos Relacionados
PubMed	1.754	397	18	6
IEEE Xplore	257	33	12	2
Springer Link	194	138	42	3
ScienceDirect	24.524	55	35	6
Wiley Online	3.445	187	77	12
Scopus	161.396	4.007	1.501	23
Google Acadêmico*	< 17.800	< 14.500	< 4.420	-

Fonte: VIANA F. M., Silva, A. P. da, Silva, R. R. da, 2023

As maiorias das pesquisas utilizando o conceito de *mock* trazem uma boa representatividade para estudos e aplicações. Uma evolução dos biomateriais e configurações mais elaboradas, podem auxiliar na emulação de sistemas mais complexos, todavia, ainda esse contexto gera limitações, principalmente, custos e operacionalidade.

A própria metodologia e resultados dos trabalhos encontrados não são reproduzíveis e difíceis de compará-los, a diversidade e os parâmetros de controle de cada modelo são discretos, mesmo a ideia sendo semelhante, a utilização dos dados passa a ser uma limitação

---

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, os pesquisadores têm investido no desenvolvimento de modelos *mock* de SCV, mais simples e baratos de fabricar do que os modelos *in vivo*, mas ainda são mais representativos do SCV do que os modelos *in vitro*.

Os modelos mais atuais são feitos de materiais biocompatíveis e são projetados para imitar o funcionamento do coração e dos vasos sanguíneos. Eles geralmente são equipados com sensores que permitem aos pesquisadores medir uma variedade de parâmetros, como o fluxo sanguíneo, a pressão arterial e a temperatura, capazes de simular o funcionamento do SCV em condições fisiológicas e patológicas, incluindo estudo para desenvolver novas terapias para DCV, testar novos dispositivos e medicamentos (antes de serem usados em seres humanos) e treinamento dos profissionais de saúde, sobre sua funcionalidade e como utilizar os dados para possíveis tratamentos.

Os dados gerados por modelos *mock* são confiáveis e podem ser usados para fazer inferências sobre o SCV. No entanto, é importante ressaltar que são apenas modelos e que os resultados obtidos com eles podem não ser totalmente representativos.

Numa perspectiva futura, com a confecção e instrumentação da bancada de simulação, complementando com revisões em base de pesquisa concentradas nas áreas de matemática e computacional, pretende-se apresentar um trabalho mais realístico, com o objetivo de incluir novas funcionalidades, como uso de IAs e recursos tecnológicos afins, ou alinhar com outros pensamentos, como de aparelhos tipo *wearables* para utilização dinâmica de dados e medidas para ampliação destas simulações.

---

#### AGRADECIMENTOS E FINANCIAMENTO

F.M.V. é professor e bolsista na Universidade de Mogi das Cruzes (UMC). A.P.S. e R.R.S. são bolsistas da Fundação de Amparo ao Ensino e Pesquisa (FAEP) da Universidade de Mogi das Cruzes (UMC).

#### CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflitos de interesse. Eles são os únicos responsáveis pelo conteúdo e pela redação do artigo.

---

## REFERÊNCIAS

1. Oliveira, G. M. M. de et al. Estatística Cardiovascular – Brasil 2021. Arquivos Brasileiros de Cardiologia. <https://abccardiol.org/article/estatistica-cardiovascular-brasil-2021/>, 2022, Vols. Arq. Bras. Cardiol. 2022; 118(1): 115-373, DOI: 10.36660/abc.20211012.
2. Aires, M. de M. Fisiologia. Rio de Janeiro/RJ: Guanabara Koogan, 2018.
3. Silva, Andrew G., et al. Desenvolvimento de um modelo hidráulico do sistema circulatório humano controlado por microcontrolador. Trabalho de Conclusão de Curso. Mogi das Cruzes: UMC - Universidade de Mogi das Cruzes, 2020.
4. Shi, Y., Lawford, P., Hose, R. Review of Zero-D and 1-D Models of Blood Flow in the Cardiovascular System. BioMedical Engineering OnLine 2011, 10:33.
5. Hirschhorn, M., et al. Fluid-structure interaction modeling in cardiovascular medicine - A systematic review 2017-2019. Med. Eng. Phys. Epub 2020 Feb 17. PMID: 32081559, 2020, Vols. Apr;78:1-13, DOI: 10.1016/j.medengphy.2020.01.008.
6. Mahmoud, A. et al. A Review of Human Circulatory System Simulation: Bridging the Gap between Engineering and Medicine. Membranes. 2021, 11, 744. <https://doi.org/10.3390/membranes11100744>.
7. Quarteroni, A. et al. Mathematical Modelling of the Human Cardiovascular System. s.l. : Cambridge University Press, 2019.
8. Messarra, B. T., et al. 3D-Printed silicone anatomic patient simulator to enhance training on cardiopulmonary bypass. J. Extra Corpor. Technol. Jun;55(2): 53-59, 2023, DOI: 10.1051/ject/2023005. Epub 2023 Jun 28. PMID: 37378437; PMCID: PMC10304827.
9. Al-jaroodi, J., MOHAMED, N., ABUKHOUSA, E. Health 4.0: On the Way to Realizing the Healthcare of the Future. IEEE Public Health Emergency Collection. 2020, Vols. vol. 8, p. 211189-211210.
10. Fortin, J. et al. A novel art of continuous noninvasive blood pressure measurement. NATURE COMMUNICATIONS. (2021) 12:1387 | <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21271-8>.