


MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DE SANGUE EM GEOMETRIAS *PATIENT-SPECIFIC*: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

MODELING AND SIMULATION OF BLOOD FLOW IN *PATIENT-SPECIFIC* GEOMETRIES: A SYSTEMATIC REVIEW

Endel Ferraz da Rocha¹ Moisés Xavier Guimarães Valentim² Flávia Schwarz Franceschini Zinani³ 

Resumo: Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre processos de construção de geometrias computacionais *patient-specific* e simulação do escoamento de sangue a partir de imagens médicas. Para tanto, a metodologia aplicada segue um protocolo que utiliza a formulação de uma pergunta de revisão, a seleção de palavras-chave e a pesquisa de artigos relacionados em uma base de dados, no caso o Scopus. Após a escolha dos artigos que atendiam aos critérios de inclusão, foram selecionados 13 cujos resultados foram sintetizados e realizada uma análise de conteúdo. Os artigos selecionados foram classificados de acordo com o *software* utilizado para construção do modelo, metodologia empregada e a aplicação médica. Os vários métodos e tipos de aplicações reforçam a importância do tema e mostram que o desenvolvimento de modelos para construção de geometrias *patient-specific* e simulação computacional do escoamento de sangue vêm crescendo e devem continuar trazer resultados promissores para aplicação em medicina.

Palavras-chave: Escoamento de sangue. Fluidodinâmica Computacional. *Patient-Specific*. Modelo 3D. Imagem médica.

Abstract: This article presents a systematic review of the literature on processes for building patient-specific computational geometries and simulating blood flow from medical images. To this end, the methodology applied follows a protocol that uses the formulation of a review question, the selection of keywords and the search of related articles in a database, in this case Scopus. After choosing the articles that met the inclusion criteria, 13 were selected whose results were synthesized and a content analysis was performed. The selected articles were classified according to the software used to build the model, the methodology used and the medical application. The various methods and types of applications reinforce the importance of the topic and show that the development of models for the construction of patient-specific geometries and computer simulation of blood flow has been growing and should continue to bring promising results for application in medicine.

Keywords: Blood flow. Computational Fluid Dynamics. Patient-Specific. 3D model. Medical Imaging.

¹ Engenheiro Mecânico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, endelfr@edu.unisinos.br.

² Engenheiro Mecânico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, moisesxavier@edu.unisinos.br.

³ Professora, Doutor em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, fzinani@unisinos.br.

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.7, n.1, p. 398-01, 398-01, 2022.

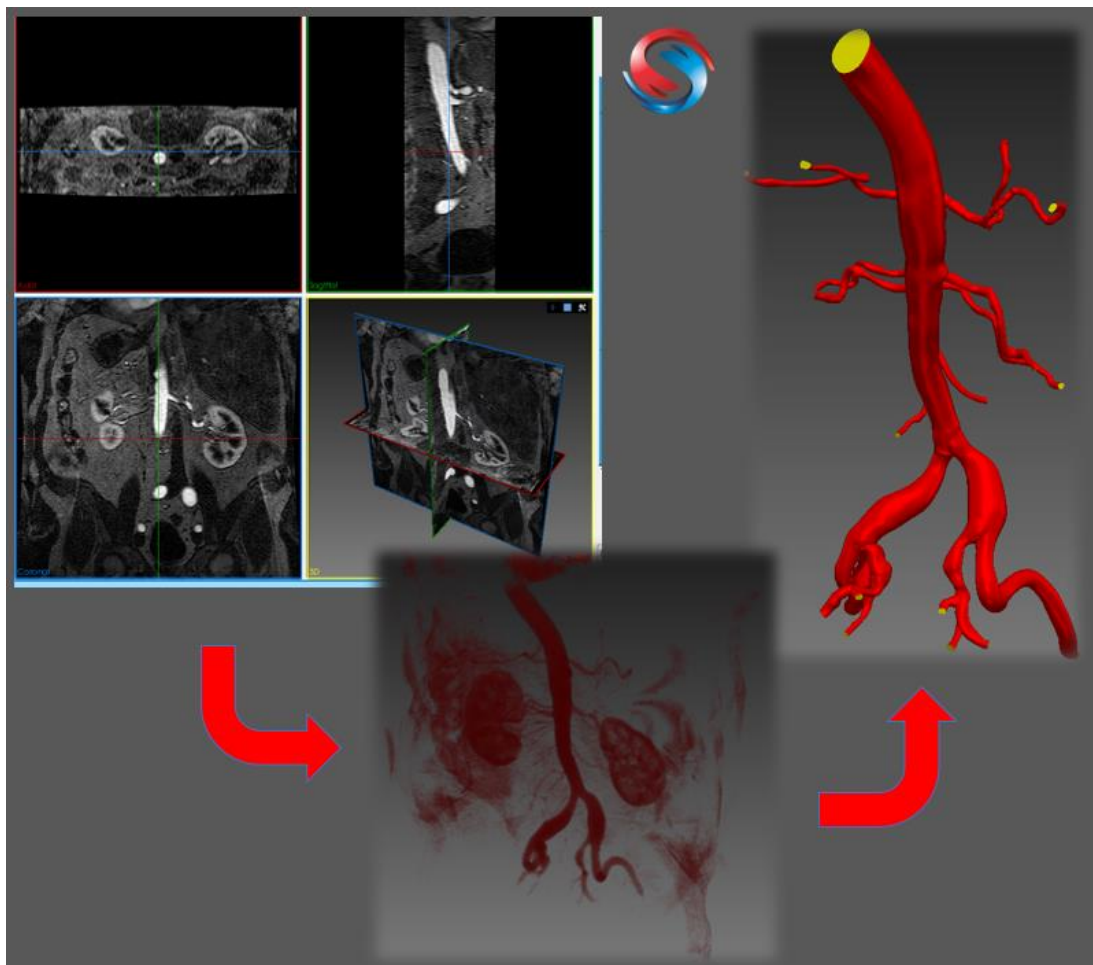
DOI: 10.21575/25254782rmetg2022vol7n11875

1 INTRODUÇÃO

A modelagem computacional *patient-specific* consiste na digitalização, a partir de imagens médicas, da anatomia de um paciente e construção de um modelo computacional tridimensional, Kim K.H. et al. (2013). Este tipo de técnica é aplicado, por exemplo, para a modelagem de ossos para desenvolvimento de próteses, Graf I.M. et al. (2011) e em modelos de veias e artérias, para o estudo da hemodinâmica, Kim K.H. et al. (2013). Os métodos de obtenção, construção e manipulação de modelos computacionais de geometrias dos órgãos internos do corpo humano encontram inúmeras barreiras técnicas que devem ser superadas para que possam ser utilizados em conjunto com softwares de simulação como ferramentas para avaliação clínica.

A *Figura 1* mostra, como exemplo, a modelagem de um sistema de artérias, cujo modelo computacional foi construído a partir de imagens de CTA (angiotomografia) obtidas de um paciente (sexo masculino, 67 anos), disponíveis publicamente no site SimVascular (<http://www.simvascular.org>). Esta construção foi realizada utilizando o *software* SimVascular, o qual é um código livre para modelagem tridimensional e simulação de escoamentos voltado ao estudo do escoamento de sangue. Observa-se a precisão com a qual se modela um sistema de geometria altamente complexa, o que possibilita a investigação precisa e específica do paciente em questão.

Figura 1 - Exemplo de uma Geometria *patient-specific* construída a partir de imagens de CTA.



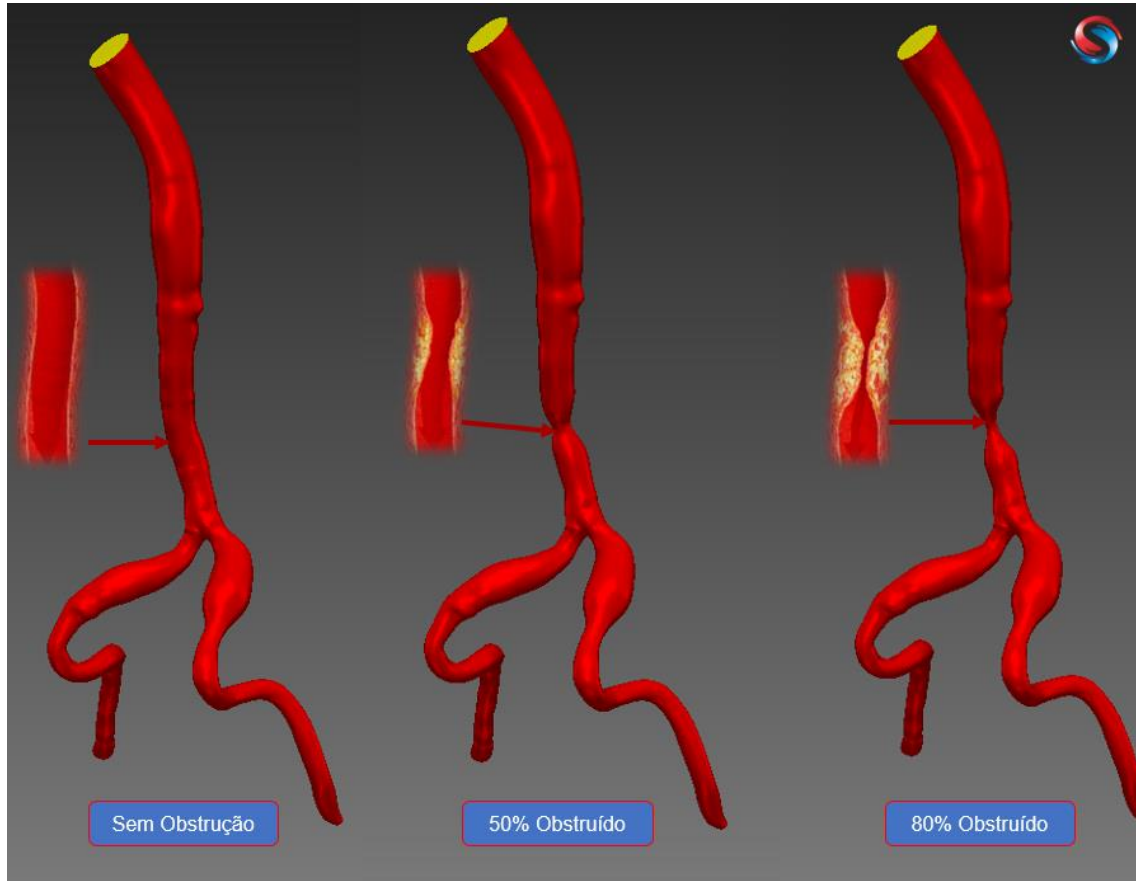
Fonte: Construído no *software* SimVascular.

Na área cardiovascular, as geometrias computacionais *patient-specific* permitem a exploração não invasiva de patologias em sistemas arteriais complexos. Técnicas usuais ou adaptadas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) podem e vêm sendo empregadas na simulação do escoamento de sangue em diferentes situações, Paul D. Morris et al. (2015). A CFD aplicada à hemodinâmica atualmente é considerada uma ferramenta promissora para o entendimento dos processos circulatórios e para o desenvolvimento de tratamentos inovadores de patologias relacionadas ao sistema circulatório, Updegrave A. et al. (2017).

Além de reconstruir a geometria, a modelagem computacional viabiliza simular patologias e seu efeito. No exemplo da *Figura 2*, o *software* SimVascular foi novamente utilizado, desta vez para simular a obstrução

parcial de um sistema arterial. Neste modelo, foram artificialmente simulados diferentes níveis de estenose por depósito de gordura, em graus de 50% e 80%. Os modelos foram posteriormente analisados por fluidodinâmica computacional no trabalho de Rocha (2021).

Figura 2 - Exemplo de uma aorta com 3 níveis de obstrução, modelados artificialmente.



Fonte: Construído no *software* SimVascular.

A modelagem hemodinâmica computacional também pode ser útil na intervenção preventiva de possíveis falhas em cirurgias e tratamentos clínicos, pois facilitam o planejamento do procedimento, Paul D. Morris et al. (2015). As simulações numéricas do escoamento sanguíneo são amplamente realizadas em todos os tipos de artérias do corpo humano. A geometria precisa do vaso patológico e a condição real do paciente são necessárias para a análise precisa do escoamento. Existem diferentes métodos para a digitalização das geometrias, bem como diferentes *softwares* de fluidodinâmica computacional

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.7, n.1, p. 398-01, 398-01, 2022.

DOI: 10.21575/25254782rmetg2022vol7n11875

empregados para simulação do escoamento sanguíneo. Com o maior poder de processamento dos computadores atuais, a utilização de geometrias *patient-specific* visa desenvolver modelos robustos, capazes de representar o escoamento sanguíneo de forma realista, fornecendo dados precisos que possam ser utilizados como ferramenta de diagnóstico e tratamento de patologias.

O presente trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura, segundo o protocolo apresentado por Dresch et al. (2015), sobre o tema “construção de modelos computacionais *patient-specific* na área cardiovascular”, destacando os benefícios e desafios das diferentes metodologias utilizadas, bem como a relevância da modelagem computacional para simulação hemodinâmica.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Para elaborar a revisão sistemática da literatura, seguiu-se o método proposto por Dresch et al. (2015, cap. 6). Os autores tomaram como base as melhores práticas de protocolos já existentes, e criaram uma metodologia completa, a qual foi seguida neste trabalho.

Inicialmente, foi definido o tema central e o *framework* conceitual, que serviram de estrutura para a condução da pesquisa. A questão de revisão, que serviu de ponto de partida para esta pesquisa, foi: “Quais métodos são utilizadas para construção de geometrias *patient-specific* em medicina vascular e quais as aplicações da fluidodinâmica computacional?”. A revisão foi realizada com uma estratégia configurativa, uma vez que investigou uma questão aberta e exploratória.

Foi utilizada a plataforma Scopus para a pesquisa de artigos baseada em palavras-chave. Somente foram considerados artigos escritos na língua inglesa. Os artigos selecionados para a revisão foram separados de acordo com os tipos de softwares, metodologia de construção do modelo computacional aplicação. Vários métodos foram identificados, desde os mais

complexos e detalhados até aqueles com foco na viabilidade da simulação por CFD. Com respeito a *softwares* para construção dos modelos, foram identificados códigos comerciais, próprios, livres e de código aberto. Alguns destes *softwares* acoplam a capacidade de simulação fluidodinâmica. As aplicações em medicina são diversas: investigação de sistemas cardiovasculares no coração, cérebro e patologias como aneurismas e obstruções nos vasos sanguíneos.

2.2 Análise Bibliométrica

Os três primeiros termos utilizados para a revisão sistemática visaram o objetivo da principal da pesquisa. “*BLOOD FLOW*” foi selecionado por limitar a pesquisa ao escoamento sanguíneo; “*FLOW SIMULATION*” para enfatizar a simulação CFD e “*PATIENT-SPECIFIC*”, para especificar o tipo de modelo 3D utilizado. Nesta primeira busca, foram encontrados 700 artigos.

Com o objetivo de encontrar um quarto termo chave da pesquisa, para obter artigos mais específicos, foi construída um mapa de palavras-chaves dos artigos até então encontrados. Foi utilizado o *software* VOSviewer, uma ferramenta para visualização e mapeamento de pesquisas científicas, Van Eck, (2020). O mapa de palavras mostrado na ***Error! Reference source not found.***³ contém as palavras-chaves dos artigos obtidos na pesquisa utilizando três termos de busca. Neste mapa de palavras, observa-se que a palavra “*hemodynamics*” está muito presente, dada a importância da construção dos modelos *patient-specific* no escoamento sanguíneo para análises hemodinâmicas. No mesmo mapa, as cores indicam o ano de publicação e percebe-se que a maioria dos trabalhos foi publicados posteriormente a 2010.

Figura 3 - Rede de Palavras-Chave dos artigos selecionados.

<i>Blood Flow + Flow Simulation</i>	962
<i>Blood Flow + Patient Specific</i>	1.884
<i>Blood Flow + Medical Imaging</i>	2.816
<i>Blood Flow + Flow Simulation + Patient Specific</i>	237
<i>Blood Flow + Flow Simulation + Medical Imaging</i>	98
<i>Patient Specific + Flow Simulation + Medical Imaging</i>	62
<i>Blood Flow + Flow Simulation + Patient Specific + Medical Imaging</i>	51

Fonte - Elaboradas pelo próprio autor.

Uma primeira avaliação foi feita com base nos resumos de cada artigo, com a intenção de descartar aqueles que, apesar de apresentarem os termos pesquisados, não estivessem diretamente relacionados à questão de pesquisa. Após avaliação dos resumos, os estudos que atenderam aos critérios de inclusão foram lidos na íntegra. Nessa etapa, os artigos foram avaliados quanto à qualidade da execução do estudo, adequação à questão da revisão e ao foco da revisão. Os resultados foram sintetizados por meio de uma planilha eletrônica, onde foram identificados os métodos e aplicações em cada artigo.

2.3 Revisão Sistemática dos Artigos

Após a primeira análise, foram selecionados 25 artigos, considerando os diferentes métodos para a construção do modelo, aplicações e os softwares usados para a construção. A segunda análise, que consistiu na leitura de cada artigo, elencou 13 artigos com as contribuições e métodos mais originais, os quais são sumarizados na *Tabela 2*. Os demais artigos utilizavam os mesmos métodos e aplicações destes elencados.

Tabela 2 – Resumo dos artigos selecionados.

Nº	Primeiro Autor	Título	Ano	Título da Fonte
1	Lee, K.W.	<i>Ultrasound image-based computer model of a common carotid artery with a plaque.</i>	2004	<i>Medical Engineering and Physics</i>
2	Rayz, V.L.	<i>Numerical Simulation of Pre- and Postsurgical Flow in a Giant Basilar Aneurysm.</i>	2008	<i>Journal of Biomechanical Engineering</i>

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.7, n.1, p. 398-01, 398-01, 2022.
DOI: 10.21575/25254782rmetg2022vol7n11875

3	He, X.	<i>Lattice Boltzmann simulation of cerebral artery hemodynamics.</i>	2009	<i>Computers and Fluids</i>
4	Graf, I.M.	<i>Clinical benefits of integrating cardiac and vascular models.</i>	2011	<i>Expert Opinion on Medical Diagnostics</i>
5	Kim, K.H.	<i>Patient-specific coronary artery blood flow simulation using myocardial volume partitioning.</i>	2013	<i>Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering</i>
6	Paul D Morris	<i>Computational fluid dynamics modelling in cardiovascular medicine.</i>	2015	<i>Education in Hearf</i>
7	Updegrove, A.	<i>SimVascular: An Open-Source Pipeline for Cardiovascular Simulation.</i>	2017	<i>Annals of Biomedical Engineering</i>
8	Wilson, N.M.	<i>Using a Science Gateway to Deliver SimVascular Software as a Service for Classroom Instruction.</i>	2018	<i>ACM International Conference Proceeding Series</i>
9	Mukherjee, D.	<i>The Role of Circle of Willis Anatomy Variations in Cardio-embolic Stroke: A Patient-Specific Simulation Based Study.</i>	2018	<i>Annals of Biomedical Engineering</i>
10	Fossan, F.E.	<i>Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis for Computational FFR Estimation in Stable Coronary Artery Disease.</i>	2018	<i>Cardiovascular Engineering and Technology</i>
11	Mikhal, J.	<i>Fully resolved simulation and ultrasound flow studies in stented carotid aneurysm model.</i>	2019	<i>Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE</i>
12	Dong M.	<i>Image-based scaling laws for somatic growth and pulmonary artery morphometry from infancy to adulthood.</i>	2020	<i>Integrative Cardiovascular Physiology and Pathophysiology</i>
13	Velho, I.	<i>CFD Analysis for the Evaluation of Patient-Specific Hemodynamic Parameters in Cerebral Aneurysms.</i>	2020	<i>IFMBE Process</i>

Fonte – Elaboradas pelo próprio autor.

Analisando os artigos elencados na *Tabela 2*, percebe-se que os autores usaram vários métodos e softwares de construção de geometrias *patient-specific* computacionais, dentre os quais a segmentação 3D é um método unânime. Quanto à aplicação, foram identificadas inúmeras, todas ligadas a patologias cardiovasculares. Quanto às imagens médicas utilizadas como fonte para a modelagem computacional, todos os artigos foram imagens de tomografia computadorizada ou ultrassom. A *Tabela 3* apresenta o método

utilizado em cada um dos trabalhos, sua respectiva aplicação e pontos que, conforme indicados pelos autores, são questões em aberto a serem respondidas por trabalhos futuros.

Tabela 3 – Principais pontos analisados e possibilidades futuras nos artigos selecionados.

Nº	Método de construção	Software	Aplicação	Possibilidades Futuras
1	Método de segmentação 3D, utilizando exame de ultrassom	Power Mode 3D	Artéria carótida em ultrassom	Aprimoramento do método e obtendo uma melhor fidelidade no modelo criado.
2	Método de segmentação 3D	3D RAPIDFORM INUS Technology	Aneurisma Basilar Gigante	Ampliar o estudo para outros pacientes com os mesmos sintomas.
3	Método de segmentação 3D e suavizando a parede em cada seção	Amira	Artéria cerebral	Aplicação do método em outros modelos
4	Método de segmentação 3D como tomografia e ultrassom	Não especificado	Benefícios Clínicos da construção dos modelos	Viabilidade que os modelos podem trazer para a área Médica.
5	Método de segmentação 3D com exames de tomografia	Citação de Vários Softwares	Benefícios Clínicos da construção dos modelos e dificuldades na construção	É citado muitos métodos e suas principais dificuldades de construção que podem ser melhoradas.
6	Método de segmentação 3D com exame do coração	ITKSnap (correção da imagem), Mesh-Lab e Gmsh (para construção do modelo)	Artéria coronária com a partição de volume miocárdico	Base para pesquisa envolvendo mais pacientes.
7	Método de segmentação 3D	SimVascular	Passo a passo para criação do modelo	Aprimorar o método de criação e deixando-o mais rápido e eficiente.
8	Método de segmentação 3D e aplicação em salas de aula	SimVascular	Importância da construção dos modelos 3D	Deixa em aberto todas as pesquisas que podem ser realizadas
9	Método de segmentação 3D utilizando imagens médicas	SimVascular	Acidente Vascular Cerebral	Realizar mais testes aumentando o número de pacientes.
10	Método de segmentação 3D	ITKSnap (correção da imagem), Mesh-Lab e Gmsh (para construção do modelo)	Doença arterial coronariana	Verificar a viabilidade dos métodos com outras geometrias.
11	Método de	Meshmixer	Aneurisma de	Modelagem 3D e

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.7, n.1, p. 398-01, 398-01, 2022.

DOI: 10.21575/25254782rmetg2022vol7n11875

	segmentação 3D, utilizando exame de ultrassom		Carótida com Stent	técnicas de impressão.
12	Método de segmentação 3D, utilizando um exame para cada paciente	SimVascular	Artéria pulmonar	Ampliar as idades das pessoas na pesquisa dos modelos pulmonares.
13	Método de segmentação 3D, utilizando um exame específico	ITKSnap (correção da imagem), Mesh-Lab e Gmsh (para construção do modelo)	Aneurisma Cerebral	Analisar outros comportamentos do escoamento sanguíneo próximo a parede.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Todos os autores têm em comum o objetivo de utilizar o CFD para diagnóstico ou como ferramenta para tomada de decisão em tratamentos cardiovasculares, de maneira não-invasiva, de forma eficaz e confiável. A seguir, são sumarizados os estudos.

Inicialmente, alguns autores investigaram os métodos de modelagem e os resultados das diferentes modelagens computacionais. Lee (2004) realizou simulações da interação fluido-estrutura em uma simulação de uma artéria carótida comum, levemente estenosada, e o escoamento fisiológico consequente, com condições estruturais. Mostrou estudos experimentais e numéricos, sugerindo que ambientes hemodinâmicos e mecânicos específicos podem influenciar a termogênese, a subsequente progressão da doença e possível ruptura da placa. O modelo foi desenhado com o auxílio de imagens em pixels, seguindo os quadros e depois suavizando as curvas para obter uma parede próxima do real. O trabalho mostrou que o modelamento da parede interfere diretamente nas tensões e velocidade do fluido internamente. He (2009) construiu um modelo geométrico preciso e uma malha de volume de alta qualidade para simulação hemodinâmica, usando malhas não estruturadas ajustadas ao corpo. Utilizou a grade cartesiana, com a técnica de suavização de superfície (modelo de treliça de Boltzmann) definida por nível. O *solver* do escoamento foi capaz de reproduzir variáveis do escoamento, como velocidade e pressão, de forma bastante precisa. Kim (2013) apresentou um novo método de simulação do escoamento sanguíneo coronário, específico para um paciente por partição do volume do miocárdio. Ele considerou a estrutural da

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.7, n.1, p. 398-01, 398-01, 2022.

DOI: 10.21575/25254782rmetg2022vol7n11875

artéria, aplicando esse conceito para configurar as condições de simulação, de maneira a considerar o maior número possível de características específicas do paciente, a partir de imagens médicas. Segmentou-se as artérias coronárias e o miocárdio separadamente, dividido em várias regiões, com base na vasculatura coronária. Este apresentou um resultado de 77% de precisão, tendo assim, base para mais pesquisas com mais pacientes, obtendo um padrão de análise e construção, pois as condições de contorno mudam.

Alguns autores investigaram alternativas de uso da CFD como ferramenta de diagnóstico e apoio ao tratamento médico Rayz (2008) mostrou o potencial das simulações CFD para a avaliação pré-operatória de diferentes opções terapêuticas para doença aneurismática. O autor utilizou um modelo computacional de escoamento em um aneurisma basilar antes e após a oclusão de uma artéria vertebral de uma mulher de 57 anos. Foram apresentados estudos seriados de RM que revelaram mudanças na morfologia do aneurisma e nas condições de escoamento de contorno, imediatamente após a terapia. Graf (2011) realizou o diagnóstico e monitoramento das doenças cardiovasculares (DCV) e o papel atual dos modelos matemáticos cardíacos e vasculares. Suas contribuições incluíram a descrição de modelos cardíacos, incluindo anatomia cardíaca, eletrofisiológica, propagação de excitação elétrica, mecânica e escoamento de fluido em relação à função vascular. O autor enfatizou a modelagem vascular como promissora para a aplicação clínica e passível de integração das funções cardíacas e elencou os benefícios futuros para as simulações cardiovasculares no diagnóstico e tratamento terapêutico. Paul D. Morris (2015) apresentou métodos, benefícios e desafios associados à construção dos modelos cardiovasculares para a utilização clínica, desde construção de próteses e em cirurgias mais complexas. O autor mostrou os modelos matemáticos aplicados em diferentes situações, diferentes modelos tabelados e aplicados com o que estas pesquisas mostraram, além de uma lista de hipóteses de melhoria para cada aplicação. Também foram sumarizados os *softwares* disponíveis no mercado para a criação de modelos.

Um dos *softwares* mais populares para modelagem e simulação cardiovascular é o SimVascular. Alguns autores escreveram sobre o potencial deste software. Updegrave (2017) descreveu as principais características do software SimVascular e demonstrou brevemente sua aplicação com exemplos de estudos de casos disponíveis publicamente. Descreveu os procedimentos e alternativas que o *software* fornece, com a criação dos modelos 2D ou 3D. Mostrou que por ser um *software* de código aberto, muitos recursos podem ser acoplados para se obter uma integração com outros programas e, assim, um modelo completamente configurável, com muitas variações, além da facilidade na edição. Wilson (2018), com o intuito de mostrar a importância do SimVascular no meio acadêmico, para pesquisas relacionadas ao escoamento sanguíneo com base em elementos finitos, pesquisa de doenças, design de dispositivos médicos e planejamento cirúrgico, reportou sobre o manuseio do programa e boas práticas para facilitar a construção de um modelo mais adequado para seu uso na simulação fluidodinâmica no meio acadêmico. Mukherjee (2018) realizou uma análise numérica, onde utilizou o *software* SimVascular acompanhado do método do círculo de Willis, também chamado de círculo arterial cerebral, onde foi utilizado um total de 24 pacientes como base para os modelos - estes com anatomias dos êmbolos cardiogênicos de tamanhos e composições variadas, lançados virtualmente e monitorados para calcular a distribuição ao cérebro. Os resultados obtidos estabelecem que as variações anatômicas do círculo, influenciam, significativamente, o êmbolo na distribuição das principais artérias cerebrais.

Mais recentemente, os trabalhos passaram a utilizar a modelagem 3D e a simulação por CFD para aplicações cada vez mais realistas. Fossan (2018) construiu um modelo 3D usando imagens de tomografia, tendo desde uma análise do modelo, criação, parametrização, caminhos e relações de aproximação dos raios da geometria desenhada. Encontrando o raio mais indicado, deixando-o mais próximo do real. Modelos e condições de contorno, envolvendo as veias coronárias (do coração), tanto do lado esquerdo quanto do direito, utilizou imagens de 13 pacientes de diferentes idades, dos quais obteve uma análise minuciosa dos resultados. Mikhal (2019) apresentou um método

para simulações de escoamento sanguíneo em um modelo de aneurisma de artéria carótida, onde o trabalho compreendeu a geometria construída no software, com imagens de ultrassom, e uma parte experimental, com fabricação de um modelo impresso, em conjunto de uma parte numérica de simulações de escoamento sanguíneo, utilizando-se com e sem colocação de stent. O método permitiu a comparação do antes e depois da colocação do stent em qualquer geometria 3D, e dando a possibilidade de validar simulações numéricas e experimentais. Dong (2020) apresentou um estudo morfométrico de PAs saudáveis, utilizando como base crianças e adultos (de 3 a 62 anos de idade). Obteve diâmetros e comprimentos de PAs escalonados, com a ordem dos vasos e alometricamente com as métricas do paciente, como BSA, altura e idade. Utilizou o expoente do raio de Murray, obtendo tendências no modelo, realizou regressões para obter um certo padrão de modelo, onde apenas o índice de tortuosidade teve mudanças com as diferentes idades. A conectividade dos PAs não mudou de crianças para adultos e os resultados estabeleceram informações morfométricas de PAs saudáveis e relações de escala de crianças para adultos, assim podendo ser utilizadas para comparações futuras. Velho (2020) construiu a geometria tridimensional (3D) a partir de imagens médicas de aneurismas cerebrais específicos dos pacientes. Foram aplicadas técnicas para derivar as condições de contorno. A análise de aneurismas estáveis (sem crescimento) e instáveis (com alterações morfológicas) forneceu uma comparação entre as possíveis razões para seu crescimento morfológico. Estas situações foram modeladas e feitas às devidas simulações e, por fim, comparando com os resultados de exames já realizados. Contudo, esta análise do escoamento próximo à parede consiste em um novo método para descrever o comportamento do escoamento, de uma forma mais detalhada que pode fornecer informações interessantes para futuras pesquisas.

Com a análise destes artigos, percebe-se a versatilidade dos modelos e, principalmente, a perspectiva de utilização de ferramentas de simulação computacional sobre geometrias *patient-specific* na medicina cardiovascular. Condições de contorno, qualidade da imagem, tempo de análise e custo do procedimento ainda são obstáculos a serem vencidos. Especialmente, a

dificuldade de validação dos modelos de simulação se mostra como a principal dificuldade. Vencido isso, acredita-se que haverá um aumento na credibilidade da CFD como ferramenta para a medicina.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma revisão da literatura no período de 2010 a 2021, com a finalidade de identificar os principais métodos e *softwares* para construção de modelos computacionais de vasos sanguíneos e as principais aplicações de simulações computacionais envolvendo estes sistemas.

A revisão constatou que a simulação computacional dos sistemas cardiovasculares está em um estágio de amplo desenvolvimento. As simulações computacionais utilizando modelos cardiovasculares *patient-specific* têm o poder de produzir percepções mecanicistas sobre a fisiopatologia investigada e possibilitar simulações de procedimentos terapêuticos e cirúrgicos, contribuindo para seu planejamento de acordo com o indivíduo analisado.

Foram encontrados 700 artigos utilizando o primeiro grupo de palavras-chave: “*BLOOD FLOW*”, “*FLOW SIMULATION*” e “*PATIENT-SPECIFIC*”. Dentre estes, foram selecionados 13 artigos para leitura na íntegra e análise. Detectou-se que o *software* SimVascular é, atualmente, o programa mais empregado na criação de modelos 3D de vasos sanguíneos, os quais são digitalizados para diferentes aplicações, principalmente envolvendo a simulação computacional do escoamento e da estrutura dos vasos. Com base em suas aplicações, analisando a relevância dos resultados obtidos e a complexidade dos modelos, verificou-se que têm sido obtidos resultados promissores. O SimVascular é um *software* livre e aberto, representando assim a possibilidade de ampliação nas pesquisas neste tema de forma geral.

A evolução da modelagem *patient-specific* e suas aplicações vem crescendo, principalmente desde 2010, como foi constatado na análise bibliométrica. A modelagem computacional está cada vez mais realista. O

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.7, n.1, p. 398-01, 398-01, 2022.

DOI: 10.21575/25254782rmetg2022vol7n11875

futuro aponta para o aumento da precisão das geometrias e simulações, e a incorporação de modelos computacionais de forma a ampliar as pesquisas e incorporar a simulação por CFD como ferramenta para exames clínicos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com financiamento das agências CAPES, CNPq e FAPERGS. Os autores E.F. Rocha e M.X. Valentim são bolsistas CAPES (Código 001). A autora F. Zinani é bolsista CNPq (Proc. No. 311444/2021-0). O projeto contou com financiamento da FAPERGS via edital PqG (Proc. No. 21/2551-0002169-1).

REFERÊNCIAS

- DRESCH, A., LACERDA D.P., ANTUNES JÚNIOR, JAV. **“Design Science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia.”** *Bookman, Porto Alegre*, 2015.
- DONG, M., YANG, W., TAMARESI, S.J.S., CHAN, F.P., ZUCKER, E.J., KUMAR, S., RABINOVITCH, M., MARSDEN, A.L., FEINSTEIN, J.A. **Image-based scaling laws for somatic growth and pulmonary arterymorphometry from infancy to adulthood.** (2020) *Am J Physiol Heart CircPhysiol* 319: H432–H442, 2020.
- FOSSAN, F.E., STURDY, J., MÜLLER, L.O., STRAND, A., BRÅTEN, A.T., JØRGENSEN, A., WISETH, R., HELLEVIK, L.R. **Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis for Computational FFR Estimation in Stable Coronary Artery Disease.** (2018) *Cardiovascular Engineering and Technology*, 9 (4), pp. 597-622.
- GRAF, I.M., MIRI, R., SMALLING, R.W., EMELIANOV, S. **Clinical benefits of integrating cardiac and vascular models.** (2011) *Expert Opinion on Medical Diagnostics*, 5 (6), pp. 501-515.

HE, X., DUCKWILER, G., VALENTINO, D.J. **Lattice Boltzmann simulation of cerebral artery hemodynamics.** (2009) *Computers and Fluids*, 38 (4), pp. 789-796.

KIM, K.H., KANG, D., KANG, N., KIM, J.-Y., LEE, H.-E., KIM, J.D.K. **Patient-specific coronary artery blood flow simulation using myocardial volume partitioning.** (2013) *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8670, art. N°. 867019.

LEE, K.W., WOOD, N.B., XU, X.Y. **Ultrasound image-based computer model of a common carotid artery with a plaque.** (2004) *Medical Engineering and Physics*, 26 (10), pp. 823-840.

MIKHAL, J., HOVING, A.M., ONG, G.M., SLUMP, C.H. **Fully resolved simulation and ultrasound flow studies in stented carotid aneurysm model.** (2019) *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE*, 10951, art. N°. 1095115.

MUKHERJEE, D., JANI, N.D., NARVID, J., SHADDEN, S.C. **The Role of Circle of Willis Anatomy Variations in Cardio-embolic Stroke: A Patient-Specific Simulation Based Study.** (2018) *Annals of Biomedical Engineering*, 46 (8), pp. 1128-1145.

PAUL D MORRIS, ANDREW NARRACOTT, HENDRIK VON TENGG-KOBLIGK, DANIEL ALEJANDRO SILVA SOTO, SARAH HSIAO, ANGELA LUNGU, PAUL EVANS, NEIL W BRESSLOFF, PATRICIA V LAWFOR, D RODNEY HOSE, JULIAN P GUNN., **Computational fluid dynamics modelling in cardiovascular medicine** (2015). Published online. To view the journal (<http://dx.doi.org/10.1136/heartjnl-2015-308044>).

RAYZ, V.L., LAWTON, M.T., MARTIN, A.J., YOUNG, W.L., SALONER, D. **Numerical simulation of pre- and postsurgical flow in a giant basilar aneurysm.** (2008) *Journal of Biomechanical Engineering*, 130 (2), art. N°. 021004.

SIMVASCULAR, Team Development. **Casos Clínicos/ Aortafemoral.** 2017. <https://simvascular.github.io/clinicalCase1.html> (acesso em 2021).

Stanford University, Charles Taylor, Nathan Wilson, Ken Wang.
SimVascular.github. 10 de 08 de 2020.

<https://simvascular.github.io/index.html>.

UPDEGROVE, A., WILSON, N.M., MERKOW, J., LAN, H., MARSDEN, A.L., SHADDEN, S.C. **SimVascular: An Open-Source Pipeline for Cardiovascular Simulation**. (2017) Annals of Biomedical Engineering, 45 (3), pp. 525-541.

VAN ECK, NJ, WALTMAN, L., 2010 “**VOSViewer: Visualizing Scientific Landscapes [Software]**”. Versão 1.6.15, 1º de abril de 2020. Disponível em. <https://www.vosviewer.com>.

VELHO, I., TIAGO, J., GAMBARUTO, A., SEQUEIRA, A., PEREIRA, R. **CFD Analysis for the Evaluation of Patient-Specific Hemodynamic Parameters in Cerebral Aneurysms**. (2020) IFMBE Proceedings, 76, pp. 1353-1360.

WILSON, N.M., CHRISTIE, M.A., MARRU, S., MAHER, G.D., ABEYSINGHE, E., UPDEGROVE, A.R., PIERCE, M., MARSDEN, A.L. **Using a science gateway to deliver SimVascular software as a service for classroom instruction**. (2018) ACM International Conference Proceeding Series, art. no. a102.

Enviado em: 21 jan. 2022.

Aceito em: 27 jun. 2022.

Editor responsável: Ágatha Borges Teixeira.