

CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA VASCULAR PARA MODELAGEM DO SISTEMA ARTERIAL DE PACIENTES COM DOENÇAS CARDIOVASCULARES

Rafael Ferreira Viana de Mello¹; Thamiles Rodrigues de Melo²

¹ Graduando em Engenharia Elétrica; Iniciação Científica Voluntária – SENAI CIMATEC; rafael.mello@aln.senaicimatec.edu.br

² Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador - BA; thamiles.melo@doc.senaicimatec.edu.br

RESUMO

O processo de detecção de patologias no sistema cardiovascular humano ainda é uma tarefa difícil, mesmo com as tecnologias atuais, e é fundamental que novos métodos sejam criados para auxiliar no diagnóstico dessas doenças. O presente estudo trata de uma abordagem adotada na Engenharia Cardiovascular, onde é feita a modelagem da circulação arterial sistêmica através de circuitos elétricos equivalentes chamados “Modelos de Windkessel”, cujos valores dos parâmetros são obtidos através de técnicas de identificação de sistemas. Serão abordados dois métodos neste trabalho, sendo o Método 1 utilizando as ferramentas disponíveis no *toolbox* do software MATLAB; e o Método 2 relacionado à expansão da série de Fourier para o cálculo da impedância vascular. Com isso, foi possível desenvolver modelos de 2 elementos (2WK) e 3 elementos (3WK) com precisão de até 83%, que conseguem representar o comportamento arterial com fidelidade, podendo ser utilizados como uma possível ferramenta para contribuir com a identificação dessas doenças em um paciente.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo de Windkessel; Identificação de Sistemas; Engenharia Cardiovascular; MATLAB.

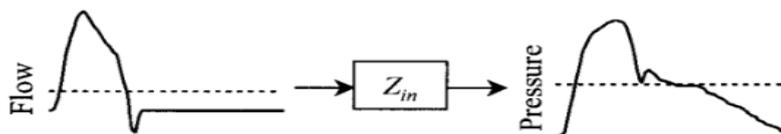
1. INTRODUÇÃO

Doenças cardiovasculares são responsáveis por 31% dos óbitos, conforme contabilizado em 2016. Mesmo com o avanço da tecnologia, estes óbitos ainda vêm a acontecer devido ora a um diagnóstico tardio, ora por ser súbito. Esse percentual tem grande destaque uma vez que o Sistema Cardiovascular Humano (SCH) é responsável por alimentar os demais órgãos do corpo humano com nutrientes que possibilitam seu funcionamento. O SCH é um sistema de bombeamento periódico, dividido basicamente em duas fases distintas (sístole e diástole) que caracterizam sua atuação. Essas fases são dadas pelo bombeamento proveniente do coração e podem ser vistas em toda a circulação sanguínea ¹.

Sendo assim, a compreensão do SCH de modo a realizar esse diagnóstico se mostra de suma relevância, e uma maneira para fazer isso é através da modelagem matemática do SCH. Por exemplo, pode-se usar um modelo a parâmetros concentrados representando o comportamento hemodinâmico de algum ponto do sistema circulatório, através de um circuito elétrico análogo chamado de circuito de Windkessel ².

Entretanto, para obter este modelo e conseguir simular o comportamento fisiológico arterial do paciente, é necessário calcular a impedância cardiovascular, que representa a relação entrada-saída entre o fluxo sanguíneo pulsátil e a pressão sanguínea pulsátil em uma artéria³, por meio de uma função de transferência Z_{in} , como exemplificado na Figura 1. Os parâmetros dessa função podem ser calculados através de métodos de identificação de sistemas.

Figura 1. Diagrama de blocos representante da impedância vascular (Quick et al, 2001).



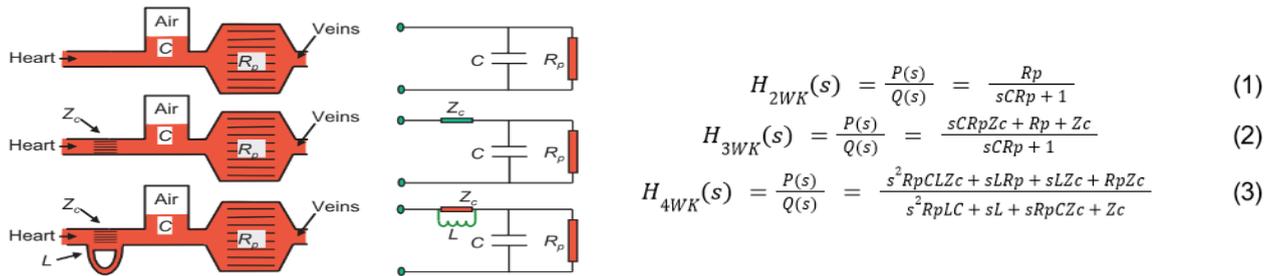
Dessa forma, o objetivo nesta pesquisa é calcular os parâmetros dos modelos de Windkessel do SCH de um paciente adulto, que podem auxiliar na obtenção de diagnósticos mais rápidos de determinadas condições cardíacas, possibilitando assim, o início de tratamentos preventivos o quanto antes possível.

2. METODOLOGIA

Utilizando um modelo a parâmetros concentrados, é possível descrever um sistema fluídico através de um circuito elétrico equivalente, que no caso deste estudo, é a circulação arterial sistêmica, dada uma distribuição uniforme das variáveis fundamentais (fluxo, pressão e volume). Esse modelo de circuito é

denominado “Modelo de Windkessel”, que pode ser de 2 elementos (2WK), 3 elementos (3WK) ou 4 elementos (4WK), na qual cada componente representa uma característica da artéria, conforme ilustrado na Figura 2. As funções de transferência resultantes para cada um desses circuitos são descritas nas Equações (1), (2) e (3), respectivamente.

Figura 2. Relação entre os circuitos de Windkessel e o comportamento arterial (Westerhof, 2011).



Para obtenção dessa função de transferência, dois métodos diferentes serão utilizados e comparados ao final. O método 1 baseia-se na utilização de ferramentas computacionais prontas de identificação de sistemas para encontrar uma função de transferência que descreve o sistema representado pela impedância vascular, tendo em vista os dados de entrada e saída do sistema (fluxo e pressão, respectivamente), a partir de um banco de dados obtido de um estudo promovido por Harana et al⁵. Esse banco de dados foi gerado de forma virtual, buscando emular o sistema cardiovascular de pessoas idosas. De modo a evitar o ruído, foi escolhido o banco de dados referente à aorta ascendente, por onde o sangue bombeado pelo coração sai inicialmente.

O método 2 consiste na construção do gráfico de módulo e fase da impedância vascular, dado na Equação (4), para obtenção dos parâmetros que caracterizam o circuito desejado. Para isso, a Análise de Fourier será empregada, descrevendo os sinais de fluxo e pressão como somas de senos e cossenos, conforme nas equações (5) e (6), respectivamente.

$$|Z_n| \angle z = \frac{|P_n| \angle \varphi_p}{|Q_n| \angle \varphi_q} \quad (4)$$

na qual:
$$p(n) = P_0 + \sum_0^{\infty} Q_n \cos(\omega_n t + \varphi_p) \quad \therefore p_n = P_n \cos(\omega_n t + \varphi_p) = |p_n| \angle \varphi_p \quad (5)$$

$$q(n) = Q_0 + \sum_0^{\infty} Q_n \cos(\omega_n t + \varphi_q) \quad \therefore q_n = Q_n \cos(\omega_n t + \varphi_q) = |q_n| \angle \varphi_q \quad (6)$$

E através dos valores da impedância calculados, é possível estipular os valores dos parâmetros de cada tipo de modelo de Windkessel. Dessa forma, a simulação computacional pode ser efetuada e diferentes análises podem ser feitas para se levantar um diagnóstico do paciente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo da impedância, um algoritmo foi criado por meio do software MATLAB para que, a partir dos dados provenientes de um banco de dados, fosse calculada a impedância vascular. Sendo assim, mediante as funções estimadas pelo algoritmo, pode-se obter os valores dos parâmetros comparando a função de transferência do circuito de Windkessel com a obtida pelo software.

Com a impedância vascular calculada, pode-se extrair os valores de resistência e capacitância desejados para os circuitos de 2 e 3 elementos. Os valores obtidos em ambas as simulações estão dispostos na Tabela 1.

Em segunda mão, o método 1, referente à *toolbox* de identificação de sistemas do MATLAB, permitiu evidenciar o comportamento da curva de resposta do modelo em comparação à curva real. A saída de dados de pressão sanguínea obtida dada uma entrada de dados de fluxo sanguíneo está presente na Figura 3. Como observado, quanto mais complexo o sistema representado é, mais precisa é a curva da saída com relação a curva real.

Figura 3. Curvas de resposta obtidas para os modelos de Windkessel. Legenda: Curva com traços e pontos preta é a curva de pressão real; curva verde contínua é a do Windkessel de dois elementos; e curva vermelha tracejada é a de 3 elementos (Precisão do 2WK: 51,34%; Precisão do 3WK: 83,32%).

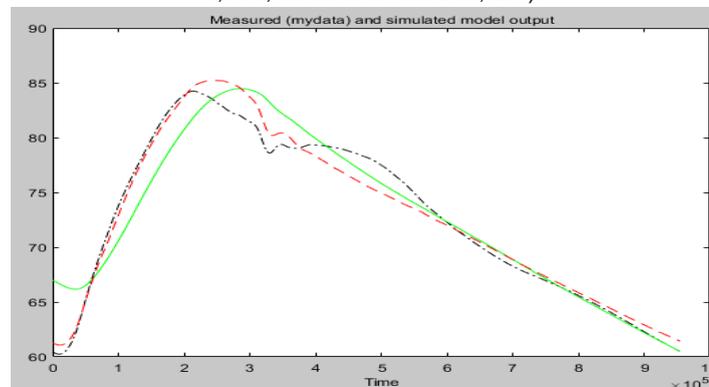


Tabela 1: Valores fluidicos obtidos pelos métodos. Legenda: R_p = Impedância; C = Capacitância; Z_c = Impedância Característica.

Parâmetro do Circuito	Modelo Matemático		
	Método 1: 2WK	Método 1: 3WK	Método 2
Impedância ($\text{mmHg} \cdot \text{ml}^{-1} \cdot \text{s}$)	0,87	1,032	1,16114
Capacitância ($\text{ml} \cdot \text{mmHg}^{-1}$)	2,092	1,973	1,755
Impedância Carac. ($\text{mmHg} \cdot \text{ml}^{-1} \cdot \text{s}$)	-	0,02394	0,02395

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este estudo de impedância cardiovascular, foi possível fazer a simulação do comportamento da circulação arterial sistêmica de um paciente, utilizando conceitos de circuitos elétricos equivalentes. Tal projeto pode ser implementado para ajudar no diagnóstico de doenças cardiovasculares de forma mais rápida e direta, uma vez que a variação dos valores dos parâmetros torna-se um indicativo disso.

Entretanto, a análise utilizada abrange apenas a circulação arterial do sistema cardiovascular, e mais detalhes podem ser obtidos ao ampliar essa modelagem para o SCH como um todo, o que tornaria o modelo mais complexo e detalhado, possibilitando um leque mais completo de análises para extração de um diagnóstico mais preciso.

Outro fator que na atualidade torna o projeto mais difícil de ser aplicado é que ainda há poucas tecnologias que podem medir o fluxo sanguíneo sem precisar de métodos que envolvam desviar a circulação. Com o desenvolvimento de tecnologias que possam efetuar essa aferição de maneira indireta e indolor ao paciente, mais métodos de modelagem como este podem ser empregados, facilitando a identificação de patologias cardiovasculares.

5. REFERÊNCIAS

- GUYTON, Arthur C.; HALL, John E.. Tratado de Fisiologia Médica. 11. ed. São Paulo: Elsevier Editora Ltda., 2006.
- WESTERHOF, Nicolaas et al. Snapshots of Hemodynamics: an aid for clinical research and graduate education. 3. ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2019.
- NICHOLS, Wilmer W.; O'ROURKE, Michael F.; VLACHOPOULOS, Charalambos. McDonald's Blood Flow in Arteries: theoretical, experimental and clinical principles. 6. ed. Londres: Hodder Arnold, 2011.
- SHARP, M. Keith et al. Aortic input impedance in infants and children. Journal of applied physiology, v. 88, n. 6, p. 2227-2239, 2000.
- MARISCAL-HARANA, Jorge et al. Estimating central blood pressure from aortic flow: development and assessment of algorithms. Jorge. American Journal Of Physiology. [S. L.], p. 494-510. 16 out. 2020.