



## Modelado del sistema cardiovascular para evaluación de técnicas de estimación de reactividad vascular basadas en hiperemia reactiva

Modeling of cardiovascular system for evaluation of vascular reactivity estimation techniques based on reactive hyperemia

Diana Carolina Arboleda-Gómez<sup>1</sup> [orcid.org/0000-0003-4829-3861](https://orcid.org/0000-0003-4829-3861)

Jenny Kateryne Aristizábal-Nieto<sup>1</sup> [orcid.org/0000-0003-2640-1489](https://orcid.org/0000-0003-2640-1489)

Alher Mauricio Hernández-Valdivieso<sup>1\*</sup> [orcid.org/0000-0003-1132-5794](https://orcid.org/0000-0003-1132-5794)

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Bioinstrumentación e Ingeniería Clínica - GIBIC, Programa de Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Fecha de recepción: Marzo 3 - 2017

Fecha de revisión: Febrero 20 - 2018

Fecha de aceptación: Abril 13 - 2018

*Arboleda-Gómez DC, Aristizábal-Nieto JK, Hernández-Valdivieso AM. Modelado del sistema cardiovascular para evaluación de técnicas de estimación de reactividad vascular basadas en hiperemia reactiva. Univ. Salud. 2018;20(2):139-148. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rus.182002.118>*

### Resumen

**Introducción:** La evaluación de la reactividad vascular (RV) se hace mediante la respuesta hiperémica después de una isquemia producida por oclusión arterial. Existen técnicas de medición de RV que permiten evaluar la función vascular con menor costo y sin dependencia del operador, pero se encuentran en desarrollo y requieren validación y aceptación clínica. **Objetivo:** Modelar computacionalmente la mecánica vascular con el fin de evaluar el desempeño de una técnica de RV. **Materiales y métodos:** Se modificó el modelo eléctrico de la vasculatura del brazo, obteniendo el volumen periférico con y sin oclusión de la arteria braquial. Se realizó una identificación computacional que relaciona el volumen periférico con los resultados de una técnica de evaluación de RV que presenta cambios de color en la mano ocluida durante hiperemia reactiva. El software utilizado fue Matlab®. **Resultados:** El modelo modificado permitió obtener el volumen periférico con y sin oclusión representando la perfusión en la microvasculatura. El modelo no lineal Hammerstein-Weiner fue el mejor descriptor de los cambios de color en función de la dinámica del sistema vascular y presentó porcentaje de ajuste promedio de 95,69%. **Conclusiones:** Es posible modelar computacionalmente la técnica de evaluación de la función vascular utilizando identificación no lineal.

**Palabras clave:** Enfermedades cardiovasculares; hiperemia; modelos biológicos; simulación por computador. (Fuente: DeCS, Bireme).

### Abstract

**Introduction:** The evaluation of vascular reactivity (VR) is done by the hyperemic response after ischemia produced by arterial occlusion. There are VR measurement techniques that allow the evaluation of vascular function at lower cost and without dependence on the operator, but they are in development and require validation and clinical acceptance. **Objective:** To model vascular mechanics computationally in order to evaluate the performance of a VR technique. **Materials and methods:** The electrical model of the vasculature of the arm was modified, obtaining the peripheral volume with and without brachial artery occlusion. A computational identification, which relates the peripheral volume to the results of a VR evaluation technique and presents color changes in the occluded hand during reactive hyperemia, was performed. The software used was Matlab®. **Results:** The modified model allowed to obtain the peripheral volume with and without occlusion, representing the perfusion in the microvasculature. The Hammerstein-Weiner non-linear model was the best descriptor of color changes depending on the dynamics of the

**\*Autor de correspondencia**

Alher Mauricio Hernández Valdivieso  
e-mail: [alher.hernandez@udea.edu.co](mailto:alher.hernandez@udea.edu.co)

Una de las limitaciones de la presente investigación es que se ha asumido que la dinámica vascular es lineal, por ello, se propone modificar la primera etapa del modelo, de esta manera contemplar el mecanismo de regulación hemodinámica a lo largo de la arteria, conocido como autoregulación, donde se tendrían presentes parámetros metabólicos que afectan la circulación sanguínea y se modelarían los cambios de vasodilatación y vasoconstricción. Otra de las limitaciones del modelo es que los resultados de predicción obtenidos aún no han sido contrastados respecto al Gold Standard de estimación de RV, por esto, se proponen pruebas en trabajos futuros. Además, debido a que sólo se usaron los datos de un sujeto sano para el desarrollo del modelo de identificación, se propone realizar el ajuste del modelo en una población de sujetos que esté compuesta por sujetos sanos, pacientes con riesgo cardiovascular y pacientes crónicos.

### Fuentes de financiación

Este trabajo ha sido financiado por el Sistema General de Regalías, República de Colombia a través del proyecto "Fortalecimiento de la plataforma tecnológica para la formación especializada en el área de la salud y el desarrollo de tecnología biomédica", código RutaN-139C.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

### Referencias

- World Health Organization. Global Status Report on Noncommunicable Diseases 2014. Ginebra: WHO; 2014. Disponible en: <http://www.who.int/en/>
- Arrebola-Moreno AL, Laclaustra M, Kaski JC. Noninvasive Assessment of Endothelial Function in Clinical Practice. *Rev Española Cardiol (English Ed)*. 2012;65(1):80-90. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rec.2011.10.004>.
- Verma S, Anderson TJ. Fundamentals of endothelial function for the clinical cardiologist. *Circulation*. 2002;105(5):546-549. doi:10.1161/hc0502.104540.
- Dhindsa M, Sommerlad SM, DeVan AE, et al. Interrelationships among noninvasive measures of postischemic macro- and microvascular reactivity. *J Appl Physiol*. 2008;105(2):427-432. doi:10.1152/jappphysiol.90431.2008.
- McQuilkin GL, Panthagani D, Metcalfe RW, et al. Digital thermal monitoring (DTM) of vascular reactivity closely correlates with Doppler flow velocity. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2009;2009:1100-3. doi:10.1109/IEMBS.2009.5333962.
- Takase B, Hamabe A, Satomura K, et al. Comparable Prognostic Value of Vasodilator Response to Acetylcholine in Brachial and Coronary Arteries for Predicting Long-Term Cardiovascular Events in Suspected Coronary Artery Disease. *Circ J*. 2006;70:49-76.
- Corretti MC, Anderson TJ, Benjamin EJ, et al. Guidelines for the ultrasound assessment of endothelial-dependent flow-mediated vasodilation of the brachial artery: A report of the international brachial artery reactivity task force. *J Am Coll Cardiol*. 2002;39(2):257-265. doi:10.1016/S0735-1097(01)01746-6.
- Budoff M, Ahmadi N, Kleis S, et al. Digital (Fingertip) Thermal Monitoring of Vascular Function: A Novel, Noninvasive, Nonimaging Test to Improve Traditional Cardiovascular Risk Assessment and Monitoring of Response to Treatments. In: *Media SS, ed. Asymptomatic Atherosclerosis: Pathophysiology, Detection and Treatment*. ; 2010:248-263.
- Schier R, Marcus HE, Mansur E, et al. Evaluation of Digital Thermal Monitoring as a Tool to Assess Perioperative Vascular Reactivity. *J Atheroscler Thromb*. 2013;20(3):277-286.
- Schier R, Schick V, Amsbaugh A, et al. Brachial artery reactivity and vascular reactive hyperemia for preoperative anaesthesia risk assessment -- an observational study. *BMC Anesthesiol*. 2014;14(1):1-10. doi:10.1186/1471-2253-14-47.
- Zhang H-D, He Y, Wang X, Shao H-W, Mu L-Z, Zhang J. Dynamic infrared imaging for analysis of fingertip temperature after cold water stimulation and neurothermal modeling study. *Comput Biol Med Elsevier*. 2010;40(7):650-656.
- Wang X, He Y. Experimental Study of Vascular Reactivity in the Fingertip: An Infrared Thermography Method. *Biomed Eng Informatics (BMEI)*, 2010 3rd Int Conf. 2010;3:1180-1184. doi:10.1109/BMEI.2010.5639589.
- Zahedi E, Jaafar R, Mohd Ali MA, Mohamed AL, Maskon O. Finger photoplethysmogram pulse amplitude changes induced by flow-mediated dilation. *Physiol Meas*. 2008;29(5):625-637. doi:10.1088/0967-3334/29/5/008.
- Selvaraj N, Jaryal AK, Santhosh J, Anand S, Deepak KK. Monitoring of reactive hyperemia using photoplethysmographic pulse amplitude and transit time. *J Clin Monit Comput*. 2009;23(5):315-322. doi:10.1007/s10877-009-9199-3.
- Goldoosian LS, Zahedi E. Electrical analog model of arterial compliance during reactive hyperemia. *Biomed Eng (MECBME)*, 2011 1st Middle East Conf. 2011:49-53. doi:10.1109/MECBME.2011.5752062.
- Lanzarone E, Liani P, Baselli G, Costantino ML. Model of arterial tree and peripheral control for the study of physiological and assisted circulation. *Med Eng Phys*. 2007;29(5):542-555. doi:10.1016/j.medengphy.2006.08.004.

17. Lanzarone E, Casagrande G, Fumero R, Costantino ML. Integrated model of endothelial no regulation and systemic circulation for the comparison between pulsatile and continuous perfusion. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2009;56(5):1331-1340. doi:10.1109/TBME.2009.2014738.
18. Westerhof N, Bosman F, De Vries CJ, Noordergraaf A. Analog studies of the human systemic arterial tree. *J Biomech.* 1969;2(2):121-134-136-138-143.
19. Mashayekhi G, Zahedi E. Modeling blood flow & pressure in systemic circulation with cuff occlusion. *Biomed Eng (ICBME), 2013 20th Iran Conf.* 2013:48-53. doi:10.1109/ICBME.2013.6782191.
20. Babbs CF. Oscillometric measurement of systolic and diastolic blood pressures validated in a physiologic mathematical model. *Biomed Eng Online.* 2012;11(1):56. doi:10.1186/1475-925X-11-56.
21. Barrebet KE, Barman SM, Boitano S, Brooks HL. Ganong, *Fisiología Médica.* 23a ed. México: McGraw-Hill; 2010.
22. Kendall M. Rank Correlation Methods. Charles Griffin and Company; 1962. citeulike-article-id:793850.
23. Ljung L. System identification - Theory for the User. Wiley Encycl Electr Electron Eng. 1999.
24. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Trans Automat Contr.* 1974;19(6):716-723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705.
25. Dolanc G, Strmčnik S. Identification of nonlinear systems using a piecewise-linear Hammerstein model. *Syst Control Lett.* 2005;54(2):145-158. doi:10.1016/j.sysconle.2004.08.002.
26. Lusson Cervantes A, Agamennoni OE, Figueroa JL. Use of Wiener Nonlinear MPC to control a CSTR with multiple steady state. *Lat Am Appl Res.* 2003;33(2):149-154.
27. Lenkey Z, Illyés M, Böcskei R, et al. Comparison of arterial stiffness parameters in patients with coronary artery disease and diabetes mellitus using Arteriograph. *Physiol Res.* 2014;63(4):429-437.