

Real-time capacitance estimation: an application for Mechanical Ventilators

Rony Caballero, Doctorado¹, Félix Henríquez, Doctorado¹, y Alejandro Von Chong, Doctorado¹
¹Universidad Tecnológica de Panamá, Rep. de Panamá, rony.caballero@utp.ac.pa, felix.henriquez@utp.ac.pa,
alejandro.von@utp.ac.pa

Abstract— This work proposes a real-time capacitance estimation methodology, that could be implemented in operating conditions. This algorithm is mainly oriented to be used in mechanical ventilators for the estimation of the lung's capacity, which is analogue to the electrical capacitance. The algorithm is initially tested via ceramic capacitors, and then with an artificial lung. Results show promising results for the evaluation of the respiratory stress.

Keywords—Capacitance, Real-time estimation, Respiratory stress index, Modelling, Mechanical ventilator.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.208>
ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Estimación de la capacitancia en tiempo real: una aplicación para Respiradores Mecánicos

Rony Caballero, Doctorado¹, Félix Henríquez, Doctorado¹, y Alejandro Von Chong, Doctorado¹
¹Universidad Tecnológica de Panamá, Rep. de Panamá, rony.caballero@utp.ac.pa, felix.henriquez@utp.ac.pa,
alejandro.von@utp.ac.pa

Resumen— Este trabajo propone una metodología para estimar la capacitancia en tiempo real, de modo que el algoritmo pueda ser aplicado en condiciones de operación. Este algoritmo está orientado principalmente para ser utilizado en respiradores mecánicos de modo que pueda estimarse la capacidad pulmonar que es análoga a la capacitancia eléctrica. El algoritmo se prueba inicialmente con capacitores eléctricos cerámicos y luego es probado en un pulmón artificial. Se concluye que el algoritmo es muy prometedor para evaluar el nivel de estrés respiratorio.

Palabras clave—Capacitancia, Estimación en tiempo real, Índice de esfuerzo respiratorio, Modelado, Respirador mecánico.

Abstract— This work proposes a real-time capacitance estimation methodology, that could be implemented in operating conditions. This algorithm is mainly oriented to be used in mechanical ventilators for the estimation of the lung's capacity, which is analogue to the electrical capacitance. The algorithm is initially tested via ceramic capacitors, and then with an artificial lung. Results show promising results for the evaluation of the respiratory stress.

Keywords—Capacitance, Real-time estimation, Respiratory stress index, Modelling, Mechanical ventilator.

I. INTRODUCCIÓN

Conocer el valor de la capacitancia en tiempo real, resulta de interés en diversas aplicaciones. Su uso se ha extendido en el área de instrumentación y de electrónica de potencia. Sin embargo, su aplicación también puede extenderse a circuitos neumáticos, aprovechando su analogía con circuitos eléctricos. Este es el caso del sistema de control de respiradores mecánicos, donde la capacidad pulmonar es análoga a la capacitancia eléctrica. En consecuencia, es importante resaltar, que resulta de interés poder estimar la capacidad pulmonar en tiempo real, ya que puede evidenciar daños en los pulmones de los pacientes [1], [5-7].

Las evidencias demuestran que la capacidad pulmonar depende de la presión del pulmón. Esto es equivalente, a una capacitancia que depende de un voltaje en un sistema eléctrico. En este sentido, existen distintos métodos de estimación de la capacitancia en un punto de operación [2],[3]. Sin embargo, resulta de interés aplicar un método que resulte lo menos invasivo posible en un respirador mecánico [5-7]. En este trabajo se propone y se evalúa una metodología para estimar la capacitancia en tiempo real y aplicarlo a la estimación del índice de esfuerzo respiratorio en un respirador mecánico.

II. ESTIMACIÓN DE LA CAPACITANCIA

Existen distintos métodos, para estimar la capacitancia considerando el punto de operación.

A. Método en el dominio de la frecuencia

Este método consiste en aplicar una señal senoidal a la entrada de un circuito RC (con resistencia conocida) y en base a los cambios de amplitud y fase a distintas frecuencias estimar el valor de la capacitancia para distintos valores de polarización DC [2]. Este es el método más utilizado para modelar capacitores cerámicos multicapa. Ya que estos se caracterizan por cambiar su valor en función del valor de voltaje DC presente en sus terminales. Sin embargo, este método tiene el inconveniente que debe no puede aplicarse en tiempo real.

B. Método de respuesta al escalón

Este método consiste en aplicar un pequeño escalón a un circuito RC con el capacitor polarizado a distintos niveles DC [3]. Luego, en base a la respuesta temporal encontrar el valor a señal senoidal a la entrada de un circuito RC (con resistencia conocida) y en base al tiempo que demora el sistema a llegar a cierto umbral de tensión estimar el valor de la capacitancia. Si bien es cierto este método es más fácil de implementar que el anterior, resulta invasivo para su utilización en pacientes conectados a respiradores mecánicos.

C. Método basados en observadores de estado

Este método consiste en utilizar un observador de estado y luego tratar de estimar la capacitancia en base a cambios que se producen en el sistema [4]. Este enfoque, en opinión de los autores, tiene la desventaja de que puede resultar muy complicado de implementar si no se conoce la función que rige el cambio de capacitancia en función de voltaje, como resulta en la mayoría de los casos.

D. Método basado en la curva Carga vs Voltaje

Este método consiste en utilizar la curva de carga vs voltaje en el capacitor. Luego, aplicar la definición de capacitancia como:

$$C(V) = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (1)$$

La principal ventaja de este método es que puede obtenerse de forma natural la relación entre la capacitancia y el voltaje. Sin embargo, este método tiene el inconveniente que se necesita preprocesar los datos, de modo que la carga quede en función del voltaje. Esto puede lograrse, aplicando, por ejemplo, un algoritmo de ordenamiento de burbuja. En la figura 1 se muestra el algoritmo de estimación de capacitancia basado en la curva de carga y voltaje.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.208>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

III. ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD PULMONAR Y EL ÍNDICE DE ESFUERZO RESPIRATORIO

A. Estimación de la capacidad pulmonar

La analogía existente entre los sistemas neumáticos y los sistemas eléctricos permite aplicar el algoritmo de estimación de capacitancia para determinar la capacidad pulmonar. En este caso solo habrá que recordar que la presión corresponde al voltaje y volumen corresponde a la carga eléctrica.

En este sentido, resulta de interés utilizar el algoritmo de estimación de capacitancia en tiempo real en los respiradores mecánicos. Ya que, cualquier cambio en la curva de capacidad pulmonar puede evidenciar alguna afectación a nivel de los pulmones.

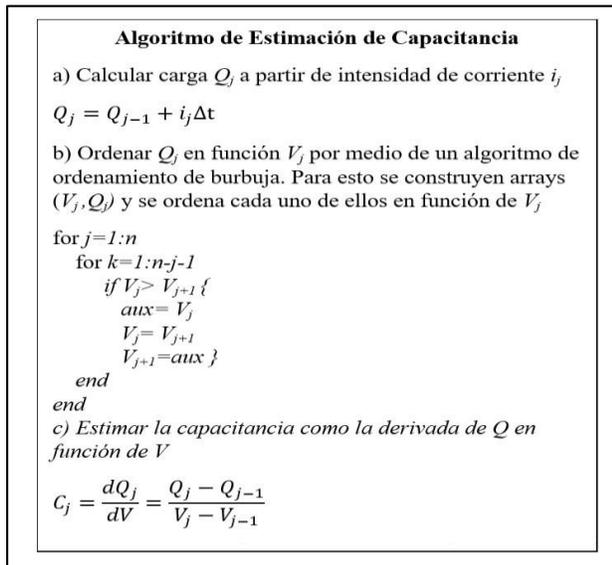


Fig. 1 Algoritmo de estimación de capacitancia.

B. Estimación del índice de esfuerzo respiratorio

El índice de esfuerzo respiratorio utiliza la curva de volumen vs tiempo para determinar la condición del pulmón durante la inspiración. Si durante la inspiración, el respirador mecánico inyecta un flujo de aire constante la curva presión vs tiempo presenta tres casos: $I=1$ o condición normal, $I>1$ es reclutamiento tidal y el caso donde $I<1$ corresponde a sobredistensión pulmonar [8],[9] (véase la figura 2).

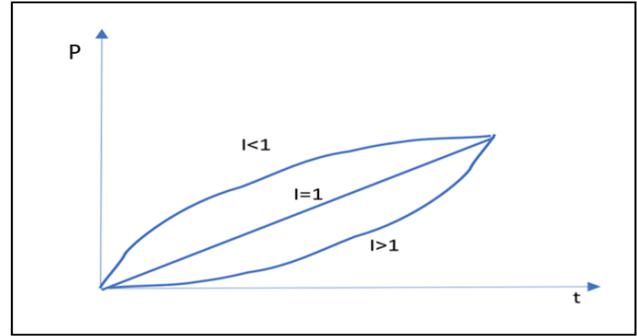


Fig. 2 Índice de estrés del pulmón. Presión vs tiempo.

Es importante destacar que, si se analiza la derivada de la presión, en lugar de la presión [10] (véase la figura 3), se evidencia que la respuesta para $I=1$ corresponde al equivalente eléctrico de un capacitor constante. La respuesta para $I<1$ es equivalente a un capacitor cuyo valor va cayendo en la medida que aumenta el voltaje en terminales. Mientras que la respuesta $I>1$ corresponde al caso contrario.

En consecuencia, se podría monitorizar la ventilación mecánica en tiempo real y verificar si se han presentado cambios en la capacitancia para las mismas condiciones de presión. Una vez que se presentan cambios se podría enviar alguna señal de alarma o en su defecto ajustar el respirador mecánico para que los pulmones puedan trabajar en una zona segura.

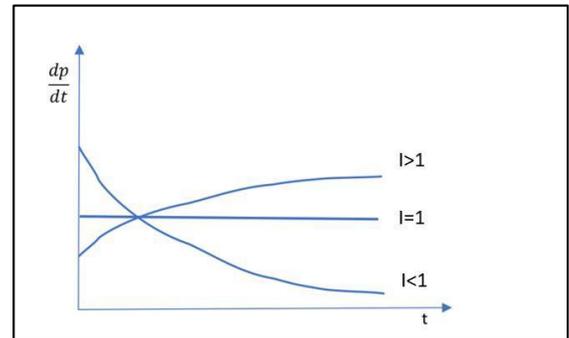


Fig. 3 Índice de estrés del pulmón. Derivada de presión vs tiempo.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Montaje experimental para la estimación de capacitancia

Para probar la metodología, se utilizarán, primeramente, capacitores de uso industrial, con especificaciones técnicas conocidas. En este caso un capacitor electrolítico y dos capacitores cerámicos. El capacitor electrolítico es constante frente a distintos niveles de polarización DC, mientras los cerámicos no.

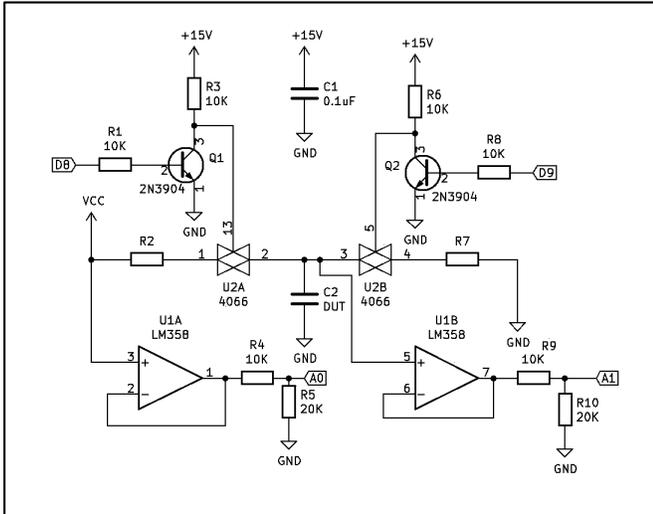


Fig. 4 Circuito de prueba para validar la metodología de estimación de capacitancia.

El circuito de prueba utiliza una tarjeta electrónica basada en el ATmega328 a 16MHz con una tarjeta microSD para guardar los datos. Además, se construyó una tarjeta para la prueba de capacitores (véase la figura 4) que se programa con ayuda del Arduino IDE.

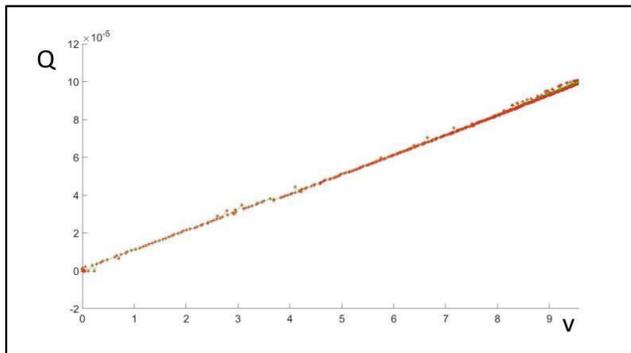


Fig. 5 Curva de carga vs voltaje para un capacitor electrolítico de 10uF.

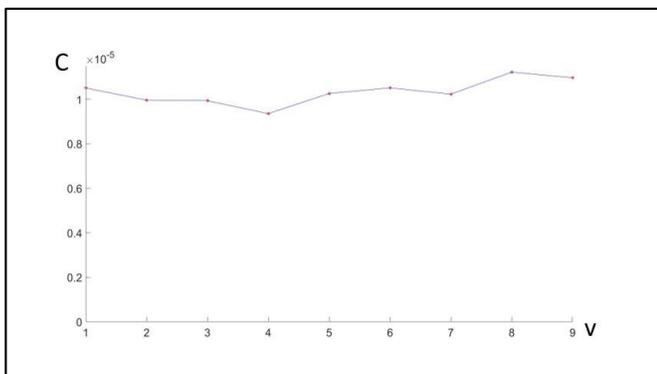


Fig. 6 Curva de capacitancia vs voltaje para un capacitor electrolítico de 10uF.

La primera prueba consiste en aplicar una señal escalón de voltaje en V_{cc} de 10 V a una red RC conformada por una resistencia $R_2=200K$ ohms y un capacitor electrolítico de 10uF. La carga en el capacitor puede obtenerse integrando la corriente que circula en la resistencia R_2 y el voltaje midiendo directamente sobre el mismo (véase figura 5). Al aplicar el algoritmo de estimación de capacitancia, se evidencia no solo el valor nominal del mismo, sino que no cambia su valor en función del voltaje como era lo esperado (véase figura 6).

La segunda prueba consiste en repetir el experimento cambiando el capacitor electrolítico un capacitor cerámico GRM21BR61C106KE15K que corresponde a 10uF/16V. Se evidencia que tanto la curva de carga, como la de capacitancia son diferentes (véase figuras 7 y 8). Esto es propio de la tecnología utilizada en la construcción de capacitores multicapa. La capacitancia alcanza su máximo cerca de 0 V y va cayendo en la medida que el voltaje de polarización DC va en aumento. Los resultados obtenidos son similares a los detallados en la hoja del fabricante.

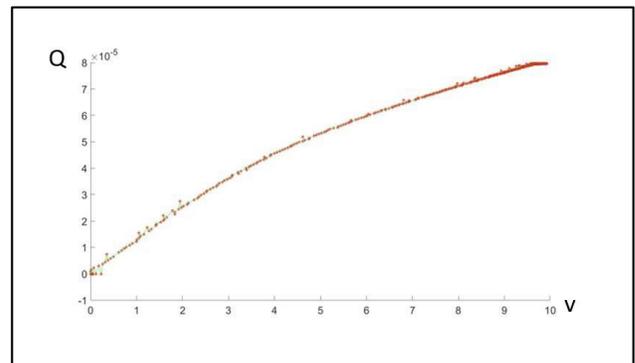


Fig. 7 Curva de carga vs voltaje para un capacitor cerámico GRM21BR61C106KE15K de 10uF.

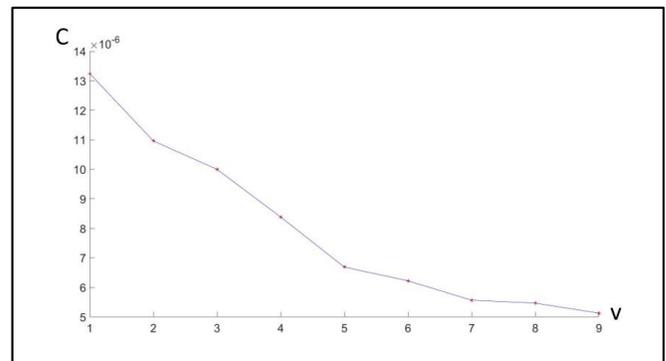


Fig. 8 Curva de capacitancia vs voltaje para un capacitor cerámico GRM21BR61C106KE15K de 10uF.

La tercera prueba consiste en repetir nuevamente el experimento cambiando el capacitor cerámico anterior por uno genérico. En este caso puede observarse claramente, que existe una clara diferencia entre las curvas de ambos capacitores cerámicos (véase figuras 9 y 10). Esto se debe a que las curvas

de capacitores cerámicos no están estandarizadas. La diferencia se evidencia mayormente en las curvas de capacitancia vs voltaje. En consecuencia, esto permite hacer comparaciones entre capacitores cerámicos.

B. Montaje experimental para la estimación de la capacidad pulmonar

Los resultados anteriores, invitan a probar el algoritmo en respirador mecánico en tiempo real. El prototipo de respirador mecánico utilizado esta descrito en [11]. El mismo, está basado en una tarjeta Teensy 4.1 que controla salida de aire a presión con una válvula proporcional. El sistema está conectado a un pulmón artificial que se muestra en la figura 11.

El experimento consiste en evaluar el algoritmo frente a dos trayectorias de presión diferentes, lo que se logra ajustando la válvula proporcional. Para el primer perfil de presión se alcanza un pico de 9.5 cm de agua como puede observarse en la figura 12, mientras para el segundo se alcanzan unos 11 cm de agua (véase figura 16). En ambos casos el volumen alcanzado es aproximadamente 300ml, lo que implica que trabajar con la curva de volumen vs tiempo puedes resultar problemático, ya que a primera vista podrían parecer similares. Sin embargo, en las curvas volumen vs presión, si se observan diferencias (véase figuras 14 y 18). Por otro lado, las curvas de capacidad (véase figuras 15 y 19) ayudan definir más claramente las similitudes y diferencias entre ambos casos. Entre las presiones correspondientes a 2 y 9 cm de agua la capacidad es la misma. Solo hay diferencias en 1 cm de agua.



Fig. 11 Pulmón artificial utilizado.

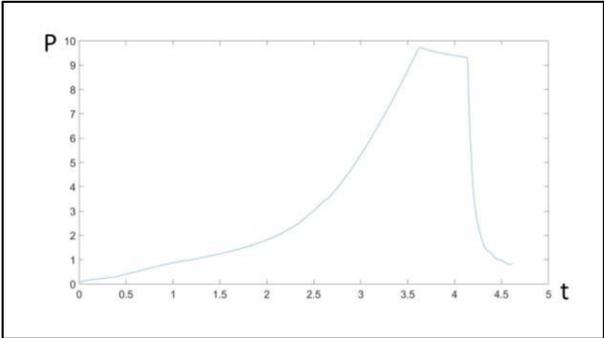


Fig. 12 Curva de presión (cm de agua) vs tiempo.

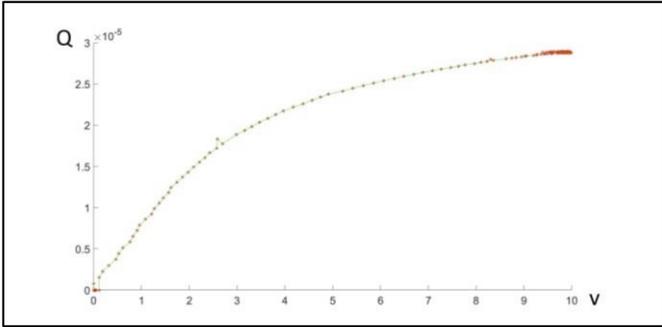


Fig. 9 Curva de carga vs voltaje para un capacitor cerámico genérico de 10uF.

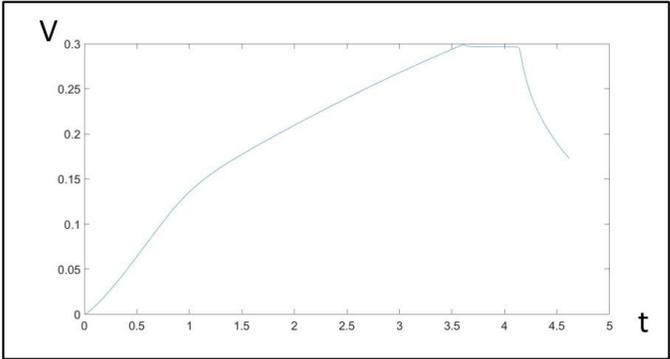


Fig. 13 Curva de volumen (litros) vs tiempo.

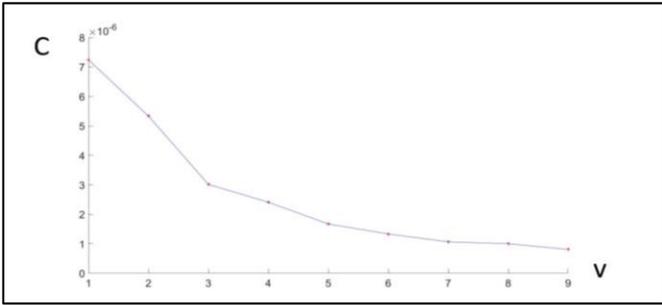


Fig. 10 Curva de capacitancia vs voltaje para un capacitor cerámico genérico de 10uF.

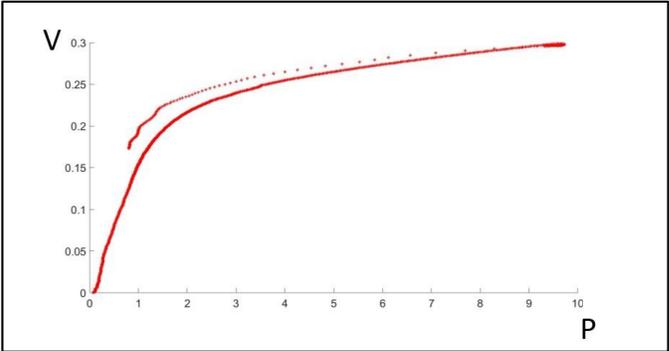


Fig. 14 Curva de volumen (litros) vs presión (cm agua).

Las diferencias en la capacidad a 1 cm de agua pueden deberse a errores en la sensibilidad de los sensores de presión y de flujo. Además, hay que tener en cuenta la presencia de no linealidades en las válvulas y otros dispositivos neumáticos. Por otro lado, puede observarse que la capacidad va cayendo poco a poco en la medida que la presión aumenta, pero es el mismo para las mismas condiciones de presión. Por lo tanto, puede utilizarse como indicador de cambios en el pulmón. Así, si existe un cambio en la capacidad para las mismas condiciones de presión, se debe enviar una alarma al personal médico para tomar las acciones pertinentes.

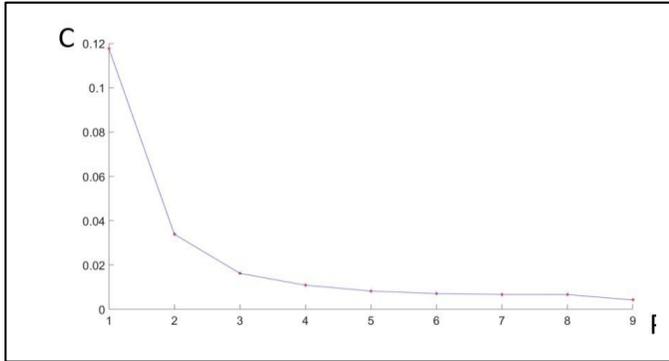


Fig. 15 Curva de capacidad pulmonar vs presión.

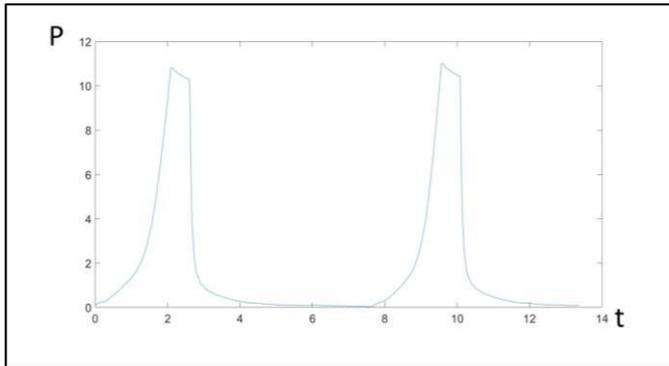


Fig. 16 Curva de presión (cm de agua) vs tiempo.

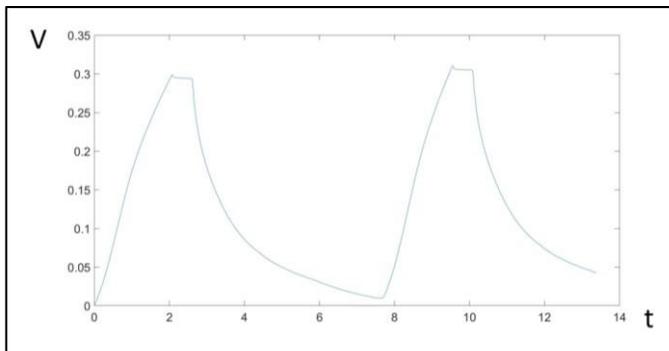


Fig. 17 Curva de volumen (litros) vs tiempo.

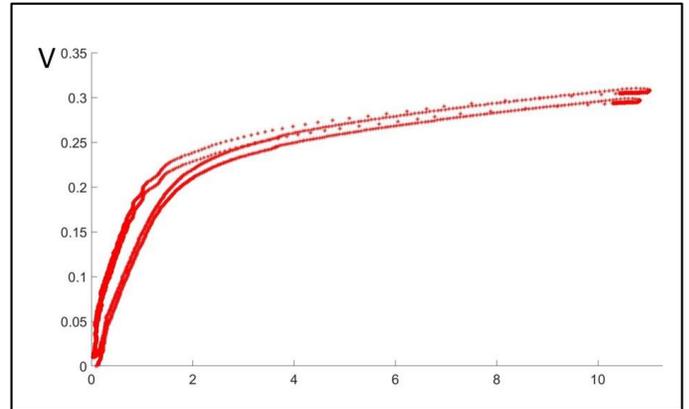


Fig. 18 Curva de volumen (litros) vs presión (cm agua).

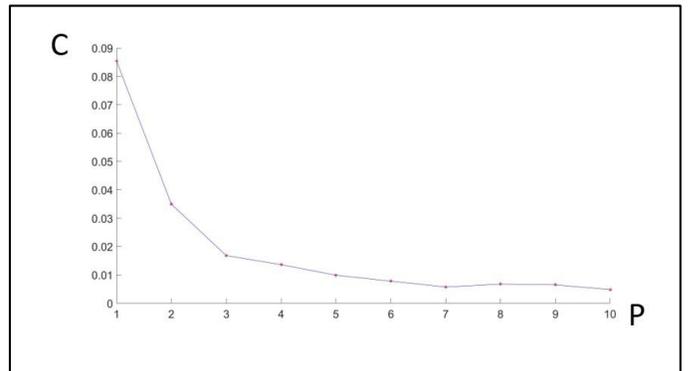


Fig. 19 Curva de capacidad pulmonar vs presión.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha evaluado un algoritmo para encontrar la capacitancia en tiempo real. Este algoritmo se caracteriza por no ser muy poco invasivo, ya que lo único que se necesita es información sobre el voltaje (presión) e intensidad eléctrica (flujo de aire). Este algoritmo tiene la capacidad de operar con el sistema funcionando y no exige trayectorias específicas. El único requisito que se requiere es ordenar la carga (volumen) en función del voltaje (presión) y estimar la capacitancia (capacidad pulmonar) como la derivada de la carga (volumen) respecto al voltaje (presión).

Esta metodología ha podido probarse utilizando capacitores con curvas conocidas. Además, ha podido demostrar ser capaz de encontrar diferencias entre capacitores de distintos fabricantes.

Finalmente, este método demostró su viabilidad para ser probado con un pulmón artificial, fue capaz de demostrar que un mismo pulmón mantiene los valores de la capacidad pulmonar medidos a las mismas condiciones de presión. En otras palabras, podría detectar si hay cambios en un pulmón en un paciente intubado, lo que resultaría muy útil para el personal médico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Tecnológica de Panamá por brindar un espacio para la ejecución de este proyecto y a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT, proyecto 93-2020) por el financiamiento para el mismo.

REFERENCIAS

- [1] D. Hess, "Respiratory Mechanics in Mechanically Ventilated Patients", Research Article *29th Annual New Horizons Symposium: Back to Basics—Respiratory Physiology in Critically Ill Patients*. DOI: <https://doi.org/10.4187/respcare.03410>
- [2] Y. Chung, C. Lee, L. Xu, Y. Hu, Z. Wang and S. Saddow "Testing method to identify counterfeit Multilayer Ceramic Capacitors" University of South Florida / Global ETS, LLC
- [3] F. Janssen, "How to Measure Capacity Bias Voltage on MLCCS" *Tutorials 6014*, 13 Jun 2016, Maxim Integrated Products
- [4] Z. Cen, "Capacitance Online Estimation Based on Adaptive Model Observer" *MATEC Web of Conferences* 7 0 (2016). DOI: 10.1051/mateconf/2016770 ICMMR 2016 7, 2006
- [5] Z. Fang, A. I. Li, H. Wang, R. Zhang, X. Mai, and T. Pan, "AmbuBox: A Fast-Deployable Low-Cost Ventilator for COVID-19 Emergent Care," *SLAS Technol.*, vol. 25, no. 6, pp. 573–584, 2020, doi: 10.1177/2472630320953801.
- [6] A. Mohsen Al Hussein, H. Ju Lee, J. Negrete, S. Powelson, A. Tepper Servi, and A. H. Slocum, "Design and prototyping of a low-cost portable mechanical ventilator," 2010. doi: 10.1115/1.3442790.
- [7] F. Albani et al. "Flow Index: a novel, non-invasive, continuous, quantitative method to evaluate patient inspiratory effort during pressure support ventilation". *Critical Care. (2021) 25:196* <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03624-3>
- [8] V. Marco Ranieri, Haibo Zhang, Luciana Mascia, Michael Aubin, Chang-Yi Lin, J. Brendan Mullen, Salvatore Grasso, Matthew Binnie, George A. Volgyesi, P. Eng, Arthur S. Slutsky; Pressure–Time Curve Predicts Minimally Injurious Ventilatory Strategy in an Isolated Rat Lung Model. *Anesthesiology* 2000; 93:1320–1328 doi: <https://doi.org/10.1097/0000542-200011000-00027>
- [9] P. Terragni, G. Bussone, and L. Mascia, "Dynamic airway pressure-time curve profile (Stress Index): A systematic review," *Minerva Anestesiol.*, vol. 82, no. 1, pp. 58–68, Mar. 2016, Accessed: Feb. 06, 2022. [Online]. Available: <https://europepmc.org/article/med/25786405>.
- [10] R. Caballero, R. Gutiérrez, A. Jaramillo, A. Martínez, C. González and A. Von Chong, "Real-Time Estimation of Alternative Stress Index for Low-Cost, Mechanical Ventilators for Emergency Use," 2022 Global Medical Engineering Physics Exchanges/ Pan American Health Care Exchanges (GMEPE/PAHCE), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/GMEPE/PAHCE55115.2022.9757795.
- [11] A. Jaramillo, A. Martínez, C. González y A. Von Chong. "Prototipo de ventilador mecánico de emergencia de código abierto y bajo costo tipo presión positiva intermitente en respuesta a la pandemia provocada por COVID-19", Revista RIC UTP.