



## Comportamiento del Síndrome de Apnea Obstructiva del Sueño (SAOS) por medio de un Modelo RC.

E. H. Silva<sup>1</sup>, J.R. Ortega<sup>1</sup>, S.Larraza<sup>2</sup>.

Estudiantes de Séptimo Semestre del Programa de Ingeniería Biomédica, Universidad de Monterrey (UDEM)<sup>1</sup>.

Profesor del programa de ingeniería biomédica de la Universidad de Monterrey (UDEM)<sup>2</sup>.

**Resumen**— El Síndrome de Apnea Obstructiva del Sueño (SAOS), es una patología caracterizada por el incremento del esfuerzo respiratorio en una persona, ya que la vía aérea se comienza a colapsar, aumentando la resistencia de la tráquea por lo que las personas que la padecen presentan síntomas tales como, respiración forzada, ronquidos constantes, en ocasiones asfisia.

Este padecimiento puede ser modelado mediante un circuito RC, el cual representa la resistencia en la vía aérea y la distensibilidad de los pulmones. El modelado de este padecimiento podrá ayudar a analizar el comportamiento de las diferentes resistencias y presiones respiratorias mediante ecuaciones formuladas en base al modelo analógico.

**Palabras clave**— CPAP, SAOS, SAHOS, Impedancia respiratoria, VAS, Capacitancia pulmonar.

### I. INTRODUCCIÓN

El Síndrome de Apnea Obstructiva del Sueño (SAOS) se caracteriza por un colapso periódico repetitivo y se reconoce como apnea de la vía aérea superior (VAS), el cual origina periodos intermitentes de apneas durante el sueño. Por lo anterior, los pacientes de SAOS desarrollan un síndrome de hipoventilación. Otra forma de cuantificar el nivel de severidad del SAOS es mediante el Índice de Disturbio Respiratorio (IDR). [1].

La SAOS se puede clasificar de diferentes maneras, con respecto a la saturación parcial de oxígeno (SPO<sub>2</sub>) se clasifica en diferentes niveles: el nivel leve tiene un rango de SPO<sub>2</sub> entre 80 y 90%; el nivel moderado tiene un rango de SPO<sub>2</sub> entre 70-79% y el nivel severo tiene un rango de SPO<sub>2</sub> entre.

El colapso de la VAS depende de tres factores: el diámetro de la vía aérea, la actividad muscular y la coordinación neuromuscular. Cabe mencionar que la faringe es importante para la respiración, debido a que en ella se encuentran músculos constrictores y dilatadores, los cuales junto a otros músculos. Son los encargados de evitar un colapso de la VAS durante la inspiración. Por esta razón, la presencia de trastornos neuromusculares que afectan a los músculos de la faringe (reducción del tono muscular, etc.) durante el sueño, pueden producir un colapso de la VAS. Estos trastornos pueden presentarse de diferentes maneras, como anomalías estructurales, funcionales, trastornos

neuromusculares, obstrucción de la VAS por medio de secreciones y algunas enfermedades endocrinas relacionadas con el metabolismo (tabla 1) [2].

Durante un episodio de apnea existe un incremento de la tonicidad muscular para abrir la VAS y reanudar la ventilación. Produce una disminución del volumen corriente y, por consiguiente, una reducción de la ventilación por minuto. La reducción del volumen minuto trae como consecuencia la caída de la SPO<sub>2</sub>, un incremento de la presión arterial de CO<sub>2</sub> (PaCO<sub>2</sub>), un incremento de la presión negativa intrapleural y una estimulación faríngea. [3].

El REM, es la fase del sueño en la que el cerebro bloquea las neuronas motrices y se tiene una actividad cerebral, semejante a la de la vigilia. En esta fase, para mantener la ventilación minuto normal, se incrementa la frecuencia respiratoria y un aumento en la frecuencia respiratoria para de esta manera mantener una ventilación minuto [6].

El SAOS es un síndrome puede ser descrito con un modelo fisiológico, con este modelo, se pueden simular condiciones del aumento de la resistencia disminuye el flujo de corriente, en este trabajo utilizamos el modelo para describir el flujo de aire en condiciones que asemejen un incremento de la resistencia al flujo de aire. Este trabajo puede ayudar a describir como el comportamiento del flujo con el propósito de mejorar el diseño de equipos CPAP utilizados en pacientes con SAOS.

TABLA 1  
ALTERACIONES ANATÓMICAS O FUNCIONALES DE LA VAS  
IMPLICADAS EN EL SAOS

1. ANOMALÍAS ESTRUCTURALES O FUNCIONALES DE LAS FOSAS NASALES O DE LA ORONASOFARINGE. - Desviación del tabique nasal - Formación de cuerpos extraños - Hipertrofia de los cornetes nasales
2. TRASTORNOS NEUROMUSCULARES QUE AFECTAN A LA ORONASOFARINGE - Distrofia miotónica. - Siringomielia.
3. DEPÓSITO DE GRASA U OTRAS SUSTANCIAS EN LAS PAREDES DE LA VÍA AÉREA SUPERIOR - Obesidad. - Linfomas y otros tumores.
4. ENFERMEDADES ENDOCRINO-METABÓLICAS - Obesidad. - Acromegalia.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Modelo fisiológico

La ventilación ( $V_E$ ) es el resultado del producto del volumen corriente ( $V_{CR}$ ) y la frecuencia respiratoria (FR). Además el ciclo respiratorio ( $T_t$ ) es la suma de los tiempos inspiratorios ( $T_i$ ) como espiratorios ( $T_e$ ), lo cual es el recíproco de la FR, por lo que se expresa de la siguiente manera:

#### Ecuación (1)

$$V_E = V_{CR} * FR = V_{CR} * \frac{1}{T_t} = V_{CR} * \frac{1}{T_i + T_e}$$

El flujo respiratorio pasa de manera pasiva, lo que quiere decir que durante la espiración tenemos este flujo ( $V_C/T_e$ ) [7].

El modelo utilizado para describir la reducción de presión depende de dos parámetros, la resistencia ejercida por la VAS ( $R_{as}$ ) y la compliancia del pulmón ( $C_p$ ). La contracción y expansión de los pulmones y el diafragma, generan el cambio de presión, el cual permite el flujo de aire por la VAS y manteniendo un ritmo en la respiración. La presión del sistema respiratorio lo podemos calcular con la siguiente ecuación:

#### Ecuación (2)

$$P_{vas} = \frac{V_E}{C_p} * R_{as} * V_{cr}$$

Se considera a la resistencia de la VAS como la relación que existe en la diferencia de la presión alveolar ( $P_a$ ), la presión de la vía aérea ( $P_{va}$ ) y el flujo del aire en la VAS. Mientras que la compliancia representa la resistencia elástica del aparato respiratorio. El cual se encarga de oponerse a la deformación de las estructuras anatómicas de sistema respiratorio. El volumen corriente es inspiratorio o espiratorio dependiendo del movimiento de los músculos respiratorios. Con estas, se realizan los modelos matemáticos para poder comparar con otros modelos, como lo es el modelo de circuitos RC [8].

### B. Modelo RC

El modelo fisiológico es análogo al modelo RC, es por ello que podemos realizar un análisis matemático por medio de este último, para de esta manera comprender de manera más sencilla su comportamiento, ante el cambio de las variables a analizar. Cualquier circuito compuesto por una resistencia, un capacitor equivalente y una fuente tanto dependiente como independiente (figura 1), aplicando la ley de Kirchhoff, donde la suma de voltajes ( $V_o$ ) de la resistencia ( $R$ ) y el capacitor ( $C$ ) es igual al de la fuente

( $V_i$ ), para lograr obtener el voltaje en estos componentes es necesario conocer la corriente ( $i$ ) que pasa en ellos.

#### Ecuación (3)

$$V_i = V_R + V_C = i(R + \frac{1}{C} \int dt)$$

La ecuación 3, donde  $i$  es la corriente,  $R$  la resistencia,  $C$  la capacitancia. Utilizando la transformada rápida de Laplace, obtenemos resultado una ecuación de primer orden. El circuito RC es utilizado para describir de manera aproximada el funcionamiento del sistema respiratorio, por lo que se comprende que cada elemento tiene el comportamiento de los tejidos que representan cada uno [9].

### C. Análisis del sistema respiratorio al presentarse SAOS

De esta manera es que podemos analizar las variables afectadas por el SAOS, como lo es el flujo de aire en la VAS y el volumen espirado.

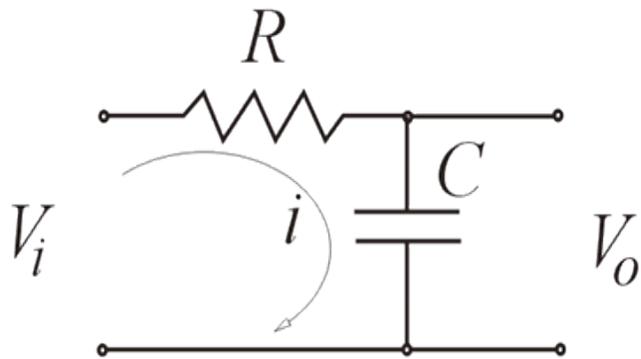


Figura 1. Circuito eléctrico RC.

Utilizando la ecuación 3 y la transformada de Laplace en esta misma es como podemos obtener la impedancia que existe en el flujo de aire en la VAS, lo que nos da como resultado:

#### Ecuación (4)

$$Z_t = R - \frac{j}{2\pi * FR * C}$$

Donde  $Z_t$  es la impedancia total,  $j$  un número imaginario de la transformada de Laplace,  $FR$  la frecuencia respiratoria, y  $C$  es la capacitancia.

Debido a que el flujo es inversamente proporcional a la impedancia y directamente, por lo que a partir de la impedancia es que podemos calcular el flujo en la VAS.

Además, podemos obtener el volumen espirado de la función de transferencia por medio de Laplace inversa.

De esta manera se realizan simulaciones en las cuales manteniendo una capacitancia constante y una resistencia variable, las cuales están proporcionadas por la tabla 2, es como observamos el comportamiento del flujo del aire y el volumen espirado, ya que son las variables que pueden determinar si una persona presenta SAOS.

TABLA 2  
RESISTENCIA Y CAPACITANCIA UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN EN MATLAB

Resistencia (cm*H2O/(L/s))	Capacitancia ((L/cm)*H2O)
4	0.15
8	0.15
16	0.15

### III. RESULTADOS

Se realizaron simulaciones en MATLAB donde por medio de la impedancia, puede ser calculado el flujo de aire que pasa a través de la VAS. El modelo se resolvió para diferentes valores de resistencia y capacitancia. Los resultados se muestran de manera gráfica (figura 3), afectando también el volumen (figura 4).

En las figuras 3 y 4 se muestran el flujo inspiratorio y espiratorio con los 3 diferentes niveles de resistencia en VAS. La línea sólida muestra los resultados de la resistencia de 4 cm\*H2O/(L/s), la línea con guiones muestra la resistencia de 8 cm\*H2O/(L/s) y la línea de cruces muestra la resistencia de 16 cm\*H2O/(L/s), comprobando así que el aumento de la resistencia puede generar el colapso de la VAS.

Por tanto podemos ver que en un estado normal el flujo que pasa por la VAS es de aproximadamente de 0.07 (L/seg), si bien la literatura nos menciona que al aumentar la resistencia en la VAS, esta llegara a un colapso, donde la impedancia del pulmón es mucho mayor a la de la ventilación de entrada, en las simulaciones realizadas en MATLAB, al ingresar tres valores de resistencia, de 4, 8 y 16 (cm) respectivamente, por lo que se ve claramente que al realizar estos cambios el flujo disminuye como se muestra en la grafica, donde este va de aproximadamente a 0.07, 0.04 y 0.02 (L/seg), respectivamente así como se muestra en la figura 3. Además de esto observamos cómo es que afecta al volumen espirado (ml) respecto al tiempo (seg), donde de igual manera se puede apreciar que el aumento de la resistencia crea una disminución del volumen, por medio de la transformada inversa de Laplace de conseguida a partir de la ecuación 3, es como obtenemos los valores del volumen, tal cual en la figura 4.

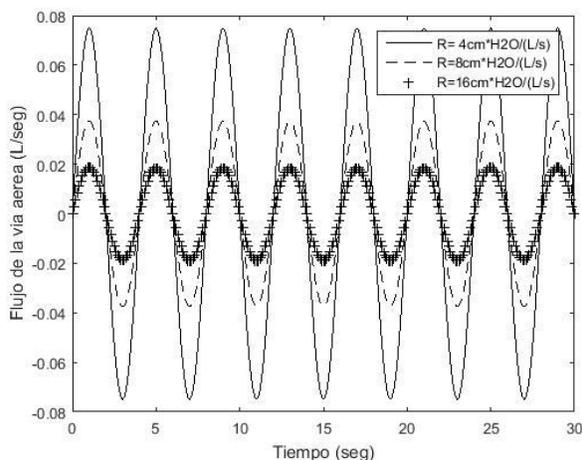


Figura 3. Flujo de la vía aérea respecto al tiempo.

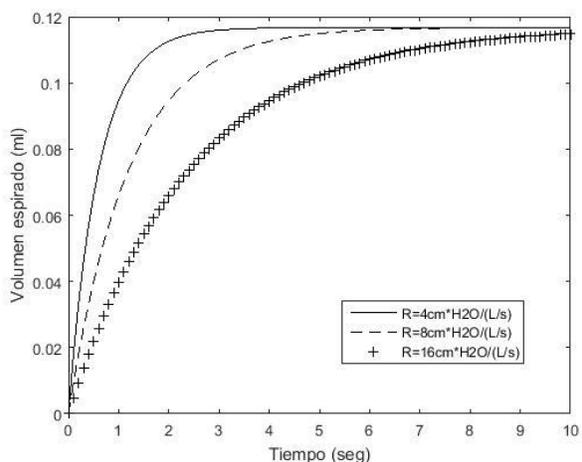


Figura 4. Volumen espirado respecto al tiempo

### IV. DISCUSIÓN

La utilidad de genera modelos como el que presentamos es crear escenarios en los que se puedan replicar los diferentes factores causantes del SAOS, como los mencionados en la tabla 1. Estas condiciones traen como consecuencia la caída de SAO2 e incremento de PCO2, lo cual desencadena el aumento del esfuerzo respiratorio y la generación de ronquidos intermitentes, este trabajo podría extenderse para determinar el nivel de PCO2 (o SPO2) en el cual se produce episodio de apnea [1,3].

Lo cual por medio del modelo es que pudimos comprobar que la resistencia influye en el flujo de aire por la VAS. La dilatación de los músculos genera la apertura de la VAS, creemos que es posible determinar la fuerza que generan los músculos respiratorios al final de un episodio de apnea. Esto es importante para calcular la energía que una persona ocupa para salir de un episodio de apnea [5].

## RECONOCIMIENTOS

Los primeros autores le agradecemos al tercer autor Sebastián Larraza Rico, por dar soporte de revisión al trabajo, con el fin de ser presentado en el congreso nacional de Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cota-Gómez H. (2012). "Alteraciones cognitivas por SAHOS y sus cambios posteriores al tratamiento con CPAP." *An Orl Mex* 2012;57(2):95-98.
- [2] Dr. Dadonim Vila Morales, Dra. Georgia Garmendía Hernández, Dra. Noemí Morales García y Dra. Belkis Correa Mozo. (2001). "Síndrome De Apnea Obstructiva Del Sueño. Fisiopatología Y Diagnóstico". *Rev Cubana Ortod* 2001;16(2):69-75. Dr. Joaquín Durán-Cantolla, Phd, Dra. Cristina Martínez-Null, Phd, Dr. Carlos Egea Santaolalla, (2013). "Tratamiento Del Síndrome De Apneas-Hipoapneas Del Sueño (Sahs) Con Dispositivos Mecánicos Generadores De Presión Postiva. Cpap, Apap Y Ventilación Servoasistida". *REV. MED. CLIN. CONDES - 2013*. pp. 375-397.
- [3] Dr. Joaquín Durán-Cantolla, Phd, Dra. Cristina Martínez-Null, Phd, Dr. Carlos Egea Santaolalla, (2013). "Tratamiento Del Síndrome De Apneas-Hipoapneas Del Sueño (Sahs) Con Dispositivos Mecánicos Generadores De Presión Postiva. Cpap, Apap Y Ventilación Servoasistida". *REV. MED. CLIN. CONDES - 2013*. pp. 375-397.
- [4] Álvarez-Sala Walther, Calle Rubio, Fernández Sánchez-Alarcos, Martínez Cruz., Rodríguez Hermosa. (1999). "Apnea obstructiva del sueño". *Información Terapéutica del Sistema Nacional de Salud*, Vol. 23—N.º 5- 1999; 23: 121-131.
- [5] Dr. Jorge Jorquera A. (2007). "Síndrome De Apnea Obstructiva Del Sueño". *BOLETÍN ESCUELA DE MEDICINA U.C., PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE VOL. 32 N°2 2007*. pp. 83-88.
- [6] R. Peraita-Adrados, A. Salcedo-Posadas, M. Gutiérrez-Triguero. (2006). "Síndrome de apnea obstructiva del sueño en la infancia". Publicado en *Revista Española Ped* 2006; 62: 249-62.
- [7] D. Pedro José Benito Peinado. (2004). "Estudio del modelo respiratorio: Nuevo método de determinación de los umbrales ventilatorios". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- [8] Nestor Flores Luna. (2007). " Simulación del Modelo Matemático de la Presión Muscular a la Inspiración Forzada por un Ventilador Mecánico". Universidad Manuela Beltrán, Bogotá D.C, Colombia.
- [9] Federico Bliman, Juan Braga, Martín Cáceres, Daniel Geido, Javier Hurtado, Valentina Ramírez, Cristina Santos y Franco Simini. (2011). "SIMVENT – Simulador pulmonar de paciente para ensayar ventiladores mecánicos". XVIII Congreso Argentino de Bioingeniería SABI 2011.
- [10] Michael C.K. Khoo, Anna Blasi. (2013). " Sleep-related changes in autonomic control in obstructive sleep apnea: A model-based perspective". *Respiratory Physiology & Neurobiology* 188 (2013) 267–276.
- [11] Jan-Marino Ramirez, Alfredo J. Garcia III, Tatiana M. Anderson, Jenna E. Koschnitzky, Ying-Jie Peng, Ganesh K. Kumar, Nanduri R. Prabhakar. (2013). "Central and peripheral factors contributing to obstructive sleep apneas". *Respiratory Physiology & Neurobiology* 189 (2013) 344–353.
- [12] Vipa Bernhardt, Gordon S. Mitchell, Won Y. Lee, Tony G. Babb. (2017). "Short-term modulation of the ventilatory response to exercise is preserved in obstructive sleep apnea". *Respiratory Physiology & Neurobiology* 236 (2017) 42–50.

Las ecuaciones del modelo se resolvieron utilizando el modelo fisiológico, lo cual permitió calcular y graficar transformada rápida de Laplace, lo cual permitió calcular y graficar el flujo de aire y el volumen que los pulmones almacenan. Las simulaciones, además de proporcionarnos el comportamiento de la SAOS, estas pueden ser utilizadas para realizar estudios en los que se deriven enfermedades relacionadas a problemas respiratorios, los cuales también son causados por la presencia del SAOS, por ejemplo: la variación de frecuencia cardíaca (VFC), ya que existe un acoplamiento respiratorio-cardíaco, así como la dinámica barorrefleja. Los datos obtenidos por la simulación, pueden ser utilizados para analizar enfermedades derivadas por la falta de flujo de aire en la VAS. La VFC ha sido investigada en función de la respuesta respiratoria, se ha encontrado que existe un deterioro del acoplamiento respiratorio, cardíaco y la dinámica del barorreflejo [8,9,10].

Debido a que se trata de un problema respiratorio, este puede presentar anomalías en el intercambio de gases en la sangre, por lo que problemas cardíacos pueden derivarse por el bajo volumen de aire presente en los pulmones, debido a los efectos del SAOS. Por lo tanto el SAOS es el resultado de las interacciones químico y mecánico sensoriales. Por lo que se deben tomar en cuenta los diferentes problemas neuronales que pueda presentar el paciente que presente este síndrome, ya que estos representan parte de los factores causantes del SAOS [11, 12].

## V. CONCLUSIÓN

El SAOS es una patología que debe ser considerado como problema de salud pública, ya que afecta a un gran número de personas. Esta patología se puede diagnosticar cuando se presentan varios episodios de obstrucción de la vía aérea que sucede al momento en que la resistencia de esta misma aumenta, provocando un cierre de la misma hasta que llega al punto del colapso y una disminución del volumen espirado. Además, existen varios factores fisiológicos que generan que las vías aéreas se cierren. El uso de las simulaciones para verificar el comportamiento del modelo RC para describir el incremento de la resistencia en la VAS y el efecto de la capacitancia del pulmón para generar un volumen corriente determinado. Es necesario para el estudio de diferentes patologías y síndromes. Por lo que el estudio del SAOS es aun campo de oportunidad, ya que no sólo puede ser un problema respiratorio, sino que uno de los factores de su causa es posible que sea neuronal, y pueda llegar a derivarse a problemas cardíacos, así como de problemas de presión arterial.