

Modelo Viscoelástico de la Mecánica Respiratoria

Matías Addiego – matiasadd@gmail.com

Monografía vinculada a la conferencia del Prof. Dr. Walter Zin sobre "Viscoelasticidad de tejido pulmonar en modelos patológicos" del 4 de abril del 2006

Resumen — Esta monografía tiene como objetivo el planteo y el análisis del modelo viscoelástico de la mecánica respiratoria. En primer lugar se exponen y analizan los componentes utilizados para el modelado mecánico y sus características. Luego se plantea el modelo resistivo-elástico analizando su funcionamiento y resaltando las diferencias con respecto a datos experimentales, para luego introducir el modelo viscoelástico y así observar como éste resuelve dicho problema. Finalmente, se muestran algunos procedimientos para la obtención de los parámetros correspondientes al modelo.

Palabras clave — *modelo viscoelástico, resistencia respiratoria, distensibilidad, elastancia, presión, flujo, volumen.*

I. INTRODUCCIÓN

EL funcionamiento de la respiración puede dividirse en dos grandes procesos, el transporte de gas (comúnmente oxígeno) hacia los pulmones y la mecánica de los pulmones y la caja torácica. En cuanto a dicha mecánica, para que se pueda mantener el intercambio gaseoso entre el exterior y el sistema respiratorio es necesario una inflación y deflación de los pulmones, lo cual se logra a través del trabajo de los músculos respiratorios que deben estirar los componentes elásticos de los pulmones y el tórax y vencer la resistencia al flujo aéreo. Para representar esta situación se utiliza un modelo mecánico que permite una clara visualización del movimiento y los cambios en el sistema

debido al flujo de aire y al volumen pulmonar.

II. MODELOS MECÁNICOS DEL SISTEMA RESPIRATORIO

Para describir la mecánica del sistema respiratorio dos de los modelos utilizados son:

- a) Modelo resistivo-elástico
- b) Modelo viscoelástico

En ambos modelos se plantea al pulmón y a la caja torácica como un recipiente hecho de un material deformable por presión, que exhibe un comportamiento elástico y que opone una resistencia al flujo de gas por el mismo.

Cabe destacar que se para este análisis del sistema respiratorio se toma la aproximación de que este contiene una mezcla saturada de gases ideales que experimentan cambios de estado (presión y volumen) bajo un proceso isotérmico.

Los componentes utilizados para el modelado mecánico son: el resorte (o elastancia) y el amortiguador, los cuales representan a la distensibilidad pulmonar y a la resistencia respiratoria respectivamente.

A) Componente resistivo:

La resistencia respiratoria se debe a la fricción que ejerce el flujo de gas (aire) sobre los tejidos, y se compone de la resistencia del tejido pulmonar mas la resistencia de las vías respiratorias, donde éstas últimas son las que

aportan la mayor parte, en general de un 80% de la resistencia total.

La resistencia en las vías respiratorias se determina a partir de la Ley de Poiseuille, donde $R_{vias} = 8.n.l / \pi.r^4$, o sea que es directamente proporcional a la viscosidad del gas (n) y a la longitud de las vías aéreas (l) e inversamente proporcional a la cuarta potencia del radio (r^4).

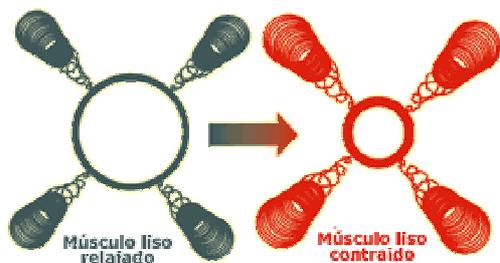
La expresión de la resistencia total se modela como: $R = \frac{\Delta P}{q}$, donde q representa el flujo y

ΔP es la diferencia de presión. La resistencia se expresa en $cmH_2O/lt./seg.$. De dicha relación entre el flujo y la resistencia se observa que la presión resistiva depende linealmente del flujo y que al no existir éste la presión resistiva se vuelve nula.

B) Componente elástico:

El tejido pulmonar presenta una distensibilidad o complacencia (C), que es la que determina la facilidad con la cual el pulmón puede distenderse o contraerse para permitir la entrada o salida del aire durante la inspiración o espiración respectivamente. Por lo tanto es un factor importante en cuanto al funcionamiento del proceso de la respiración.

figura 1 – representación de la elastancia pulmonar.



La distensibilidad es el inverso de la elastancia

(E): $C = 1/E$ y se define como: $C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$, o sea

que es función de los cambios en el volumen y en la presión y se expresa entonces como ml/cmH_2O .

El rango en que generalmente se encuentra el valor de esta distensibilidad es entre 200–240

ml/cmH_2O

En ocasiones, para estudiar el comportamiento del modelo utilizado, es conveniente realizar una analogía entre el sistema respiratorio y un sistema eléctrico. En dicha analogía, la corriente eléctrica representa el flujo de aire, el voltaje a la presión, el capacitor a la distensibilidad y la resistencia a la resistencia respiratoria.

II.1 – MODELO RESISTIVO-ELÁSTICO

En primer lugar veamos el modelo resistivo-elástico, que utiliza, como se puede observar en la figura 2, una resistencia (R) y una elastancia (E).

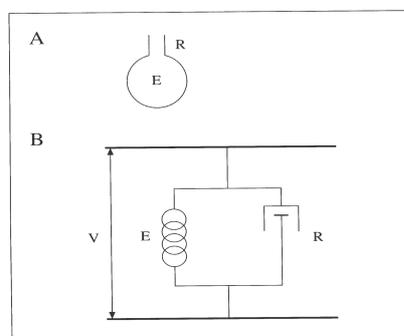


figura 2 – esquema del modelo resistivo-elástico.

En este caso se plantea que una parte de la presión se utiliza para vencer la resistencia que se opone a la circulación del flujo, llamada entonces **presión resistiva** (P_r), y otra es utilizada para distender al pulmón.

A) Funcionamiento del modelo:

Entonces para este modelo, durante el proceso de respiración, al realizar la inspiración haciendo ejercer un flujo (que se supone constante), se logra aumentar el volumen disipando energía mediante el componente resistivo (R), que actúa como amortiguador, a la vez que se almacena energía en el componente elástico (E), la cual genera a continuación la presión motriz necesaria para realizar la espiración y así concluir el proceso.

En la gráfica de la figura 3 se muestra la presión en función del tiempo durante un proceso de inspiración a flujo constante. La-

línea a trazos representa la fracción de la presión utilizada para distender la componente elástica, mientras que el trazo continuo representa la presión total que se ejerce. Por lo tanto la diferencia entre estas dos representa a la presión resistiva.

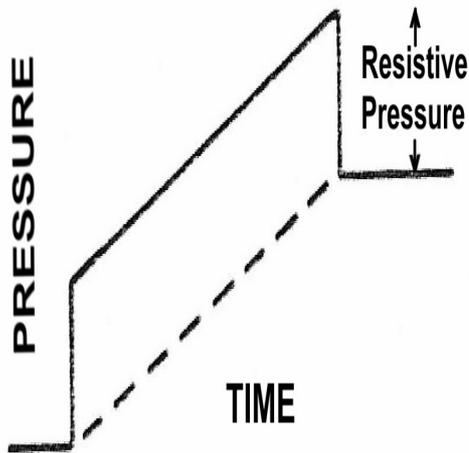


figura 3 – gráfica de presión en función del tiempo durante inspiración a flujo constante.

B) Comparación del modelo con valores experimentales:

Al contrastar valores estándar obtenidos mediante mediciones, con los resultados del modelo resistivo-elástico, se observa que el comportamiento no es el que predice dicho modelo. La figura 4 muestra claramente lo anterior, ya que es notoria la diferencia existente al momento en el que cesa la inspiración, porque los valores de presión medidos presentan una caída inicial rápida, seguida por otra más lenta y no una caída brusca de la presión hacia un valor fijo como se obtiene del modelo.

Esto se debe a que para este modelo, en el momento en que cesa el flujo, la componente resistiva es cero, lo que implica que la energía almacenada en la componente elástica se disipa instantáneamente, hecho que se representa en la caída brusca de la presión. Pero como se obtuvo de la experimentación, en realidad esto no ocurre de esa manera, por lo que se introdujo

entonces otro modelo más completo para representar esta situación, al que se denomina modelo viscoelástico.

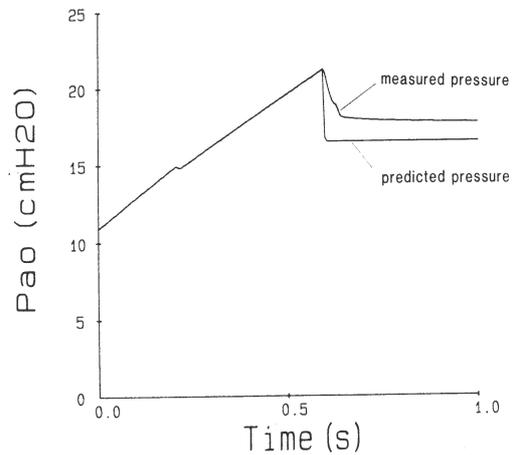


figura 4 – gráfica comparativa de valores experimentales contra los correspondientes al modelo resistivo-elástico.

II.2 - MODELO VISCOELÁSTICO

Este modelo incorpora un tercer componente en paralelo a los ya existentes en el modelo anterior, que se conoce como cuerpo de Maxwell y se compone de un amortiguador (R2) en serie con una elastancia (E2).

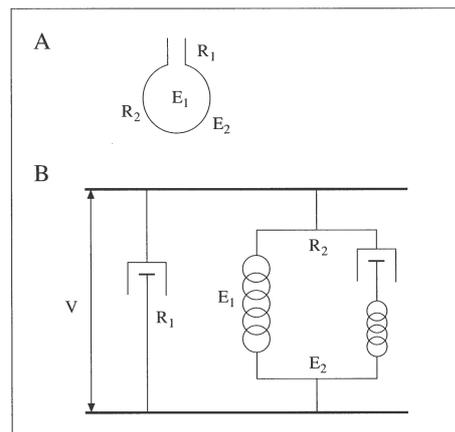


figura 5 – esquema del modelo viscoelástico.

A) Funcionamiento del modelo:

Esta modificación resuelve el problema de la incongruencia del modelo anterior, debido a que el nuevo componente funciona de la siguiente manera: en el momento en que cesa el flujo, la energía almacenada en la elastancia E2 se va disipando a través del amortiguador R2, evitando que se libere instantáneamente, echo que evita entonces el descenso brusco de la presión.

Por lo tanto el comportamiento de este modelo se acerca mas al que se obtiene experimentalmente que el mostrado por el modelo resistivo-elástico.

B) Modelado final:

La mecánica del aparato respiratorio se divide en dos componentes, los pulmones y la caja torácica, y fue demostrado que ambos presentan un comportamiento viscoelástico y que se modelan en paralelo, por lo que finalmente se obtiene el siguiente modelo:

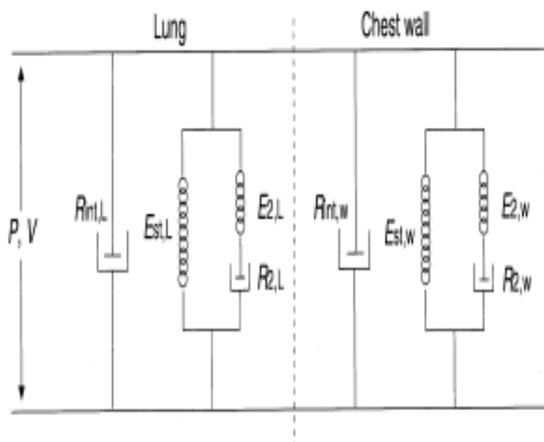


figura 6 – esquema del modelo mecánico para el sistema respiratorio.

Para la figura 6 los subíndices *st* indican que es el valor estático (valor medido con flujo igual a cero) correspondiente, mientras que *L* y *W* significan que corresponden al modelado del pulmón y a la caja torácica respectivamente.

El modelo mecánico completo del sistema respiratorio, por lo tanto es el que incluye al modelado del pulmón y al de la caja torácica, pudiéndose entonces reducir nuevamente a un

sistema como el de la figura5 simplemente tomando los valores de los parámetros como los equivalentes del paralelo de las elastancias y las resistencias: $E_{sr}=E_L+E_W$ y $R_{sr}=R_L+R_W$.

III OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS

De las variables que intervienen en el modelo, sólo unas pocas se logran medir en forma directa, las demás se obtienen entonces a partir de la medida de éstas. Tal es lo que sucede con sus componentes, la resistencia respiratoria y la distensibilidad.

A) Obtención de la resistencia respiratoria:

En el caso en que se quiere determinar el valor de la resistencia respiratoria, si bien existen métodos para medirla directamente, estos requieren de equipos muy complejos, necesitan de mucha cooperación de parte del paciente o son métodos muy invasivos. Por lo tanto en general se prefiere obtener el valor de dicha resistencia midiendo directamente el valor del flujo y de la presión involucradas y utilizando la fórmula que la relaciona con estas variables. Para esto se utiliza un equipo que contiene un sensor de presión y un neumotacómetro para medir el flujo.

Cabe mencionar que de todas maneras en algunos casos se mide directamente, y para ello dos de los equipos utilizados son: a) *pletismógrafo*: que es muy complejo y requiere de una gran cooperación del paciente; b) *globo esofageal*: que es considerado como un método muy invasivo.

Si bien la resistencia respiratoria se compone de dos partes, la que aportan las vías respiratorias y la generada por el tejido pulmonar, a partir de numerosos estudios se determino que la que presenta cambios en su valor en presencia de enfermedades es la resistencia de las vías respiratorias, mientras que la del tejido pulmonar permanece prácticamente constante, por lo cual observando cambios en la resistencia total se pueden obtener los cambios en la resistencia de

las vías. De todas formas si se quiere medir directamente la resistencia provocada por las vías respiratorias, se utiliza el pletismógrafo que lo permite.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- W. Zin, "Viscoelasticidad de tejido pulmonar en modelos patológicos"
- J. G. Webster, "Medical Instrumentation: Application and Design"
- Macia, Gonzalez, Gutierrez, "Método de obstrucción rápida para medir la resistencia respiratoria"

B) Obtención de la distensibilidad:

Como fue mencionado anteriormente la distensibilidad no se mide de manera directa, sino que se obtiene a partir de la ecuación $C = \Delta V / \Delta P$. Para esto entonces, se mide el valor de los cambios en el volumen (ΔV) a partir de un espirómetro y los cambios en la presión (ΔP) mediante un manómetro. En general ambos están incluidos en los respiradores.

IV CONCLUSIONES

El modelo viscoelástico de la mecánica respiratoria es muy útil para representar el comportamiento del sistema respiratorio cuando se quiere relevar alguna de sus funcionalidades, ya que como se observó anteriormente, los datos experimentales se ajustan a los que predice el modelo. En presencia de enfermedades o de anomalías del sistema respiratorio, los valores de los parámetros del modelo se ven afectados, según el caso, lo que entonces permite identificar el problema a partir de la obtención de los mismos. Por lo tanto este modelo mecánico es un marco simple pero que se ajusta con bastante certeza a la realidad, que es de mucha ayuda en cuanto a la manera de proceder y de sacar conclusiones ante un problema en el proceso de la respiración.