



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

"MODELO PARA EXPLICAR LA FRECUENCIA DE LA TOS Y  
PROPUESTA PARA DESOBSTRUIR LAS VIAS RESPIRATORIAS  
EN LA BRONQUITIS CRONICA"

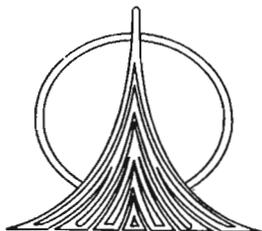
**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A :

**JOSE JUAN MORALES MORALES**



Unidad en la Diversidad  
Zaragoza Frente al Siglo XXI

MEXICO, D.F.

2005

m343000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/059/04**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: MORALES MORALES JOSÉ JUAN**

**P r e s e n t e .**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>PRESIDENTE</b>	<b>I.I.Q. Alejandro Rubio Martínez</b>
<b>VOCAL</b>	<b>Dra. Eugenia Corvera Poiré</b>
<b>SECRETARIO</b>	<b>Quim. Teresa Mendoza Mata</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>Biol. Guillermo González Martínez</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>I.Q. Dominga Ortiz Bautista</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**

México, D.F., 26 de Noviembre del 2004.

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**M. EN C. ANDRES AQUINO CANCHOLA**

***A mis padres...***

***A mis hermanos...***

***A mi esposa...***

## **DEDICATORIAS**

### ***Dedico esta tesis a mis padres.***

A mi padre quien siempre ha sido para mí, un ejemplo de trabajo y responsabilidad. Porque siempre se esforzó por darnos todo lo necesario y que nunca nos faltara nada.

Gracias papá, por ser un gran hombre al que siempre he admirado y respetado. Gracias por dejarme la mejor herencia que una persona puede tener: el estudio.

Dios te bendiga papá.

A mi madre, por sus regaños, su cariño y su comprensión.

Gracias mamá por cuidarme en todo sentido, por estimularme al estudio, por enseñarme que nada es imposible con esfuerzo y dedicación.

Dios te bendiga mamá.

*Porque siempre me han amado y se han preocupado por mí.*

### ***Dedico esta tesis a mis hermanos.***

A Beto, porque me hubiera gustado compartir este día con él y celebrar con unos buenos tacos.

*In memoriam*

A Clarita, porque es una niña preciosa, inteligente y muy centrada. Que esta tesis sea un ejemplo de superación para ti.

Gracias por ser mi hermana, te quiero mucho.

*Porque son los mejores hermanos.*

### ***Dedico esta tesis a mi esposa.***

Marthita, gracias por tu amor, paciencia e impulso para realizar esta tesis. Pero sobretodo, gracias por aceptarme en tu vida y por ser mi esposa; eres realmente extraordinaria.

*Te amo con todo mi corazón.*

---

---

## **AGRADECIMIENTOS**

---

---

En primer lugar quiero agradecer a la Dra. Eugenia Corvera Poiré, por toda su ayuda y enseñanzas, ya que esta tesis no se hubiera podido realizar sin ella. Gracias Dra. Eugenia por su paciencia y por todo el tiempo invertido en esta tesis. Gracias por las pláticas tan amenas, por la cena de navidad y las experiencias que compartió conmigo. La admiro y la respeto.

Quiero agradecer a la Q. Rosana Colleparado Guevara, por su ayuda en la realización de esta tesis. Gracias Ros, porque siempre tuviste tiempo y paciencia para ayudarme cuando me atoraba en algo; por los programas y los libros de medicina.

A mis compañeros del cubículo por todos los días que trabajamos juntos. A Rodrigo, Marcela, Tomás y Marco.

Agradezco a DGAPA por la beca otorgada a través del proyecto IN117802.

A mis compañeros y profesores de la FES Zaragoza, en el tiempo que duró mi carrera.

A mis pastores Guillermo y Lilian Hurtado, porque siempre se preocupan y oran por mí.

A la UNAM por adoptarme como hijo.

Finalmente, y no por ser menos importante, agradezco a Dios que me permite cerrar este ciclo de mi vida. Sin Él nada sería posible, a él le debo todo lo que soy. Mi gratitud es eterna para con Él.

***Gracias Señor Jesucristo***

---

---

# CONTENIDO

---

---

Dedicatorias.

Agradecimientos.

<b>Capítulo 1</b>	INTRODUCCIÓN.....	1
<b>Capítulo 2</b>	APARATO RESPIRATORIO.....	5
<b>2.1</b>	La Respiración.....	6
<b>2.2</b>	Estructura de las vías respiratorias.....	8
<b>2.3</b>	Mecanismos de defensa.....	11
<b>2.3.1</b>	Tos.....	12
<b>2.3.2</b>	Secreciones bronquiales.....	13
<b>2.3.3</b>	Movimiento muco ciliar.....	14
<b>Capítulo 3</b>	ENFERMEDAD PULMONAR OBSTRUCTIVA CRÓNICA.....	16
<b>3.1</b>	Enfisema pulmonar.....	18
<b>3.2</b>	Bronquitis crónica.....	19
<b>3.3</b>	Tratamiento.....	22
<b>3.4</b>	Propiedades del moco bronquial.....	23
<b>Capítulo 4</b>	FLUIDOS VISCOELÁSTICOS.....	25
<b>4.1</b>	Modelo de Maxwell.....	26
<b>4.2</b>	Permeabilidad dinámica.....	29
<b>4.3</b>	Ecuación de la permeabilidad dinámica para un tubo.....	31

<b>Capítulo 5</b>	<b>FRECUENCIA DE LA TOS.....</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Frecuencia de la tos.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2</b>	<b>Señal de presión.....</b>	<b>42</b>
<b>5.3</b>	<b>Cálculo del flujo.....</b>	<b>43</b>
<b>5.4</b>	<b>Sensibilidad al cambio de viscosidad.....</b>	<b>45</b>
<b>Capítulo 6</b>	<b>AUMENTO DEL FLUJO DE MOCO     EN LA BRONQUITIS CRÓNICA.....</b>	<b>47</b>
<b>6.1</b>	<b>Frecuencia de Resonancia en la Bronquitis crónica.....</b>	<b>48</b>
<b>6.2</b>	<b>Señal de presión.....</b>	<b>49</b>
<b>6.3</b>	<b>Cálculo del flujo.....</b>	<b>50</b>
<b>6.4</b>	<b>Impacto médico de los resultados.....</b>	<b>52</b>
<b>Capítulo 7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>Capítulo 8</b>	<b>APÉNDICES.....</b>	<b>56</b>
<b>8.1</b>	<b>Causas de la bronquitis crónica.....</b>	<b>56</b>
<b>8.2</b>	<b>Síntomas.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>59</b>

---

---

## FIGURAS

---

---

1. Esquema del árbol bronquial y sus principales divisiones.....	7
2. Alvéolos.....	9
3. Estructura de la pared de la vía respiratoria.....	10
4. Acumulación de moco en los bronquios.....	21
5. Esquema del sistema sólido elástico y fluido viscoso.....	26
6. Geometría cilíndrica.....	31
7. Curva típica de la permeabilidad dinámica.....	36
8. Curva de la permeabilidad dinámica para el moco sano.....	41
9. Señal de presión para el moco sano.....	43
10. Comparación del flujo de moco a distintas frecuencias de resonancia.....	44
11. Sensibilidad al cambio de viscosidad.....	45
12. Curva de la permeabilidad dinámica para el moco enfermo.....	49
13. Señal de presión para el moco enfermo.....	50
14. Comparación del flujo de moco en salud y enfermedad.....	51

## ***RESUMEN***

Los resultados más recientes de la investigación en fluidos viscoelásticos, sugieren que existen condiciones en las que estos fluyen con la menor resistencia posible. Esto es prometedor en medicina, ya que muchos de los fluidos de nuestro cuerpo, tales como la sangre, las mucosas, los fluidos que lubrican la vagina, presentan propiedades viscoelásticas. Aprovechando las propiedades elásticas de estos fluidos, podrían en principio evitarse cirugías. Recientemente se ha mostrado que la permeabilidad de los fluidos viscoelásticos aumenta varios órdenes de magnitud cuando el fluido se somete a un gradiente de presión que en lugar de ser constante, varía en el tiempo con cierta frecuencia. Es necesario estudiar las características específicas de los diferentes subsistemas del cuerpo humano para poder decir si los resultados de la física de fluidos viscoelásticos son o no útiles.

En base a lo anterior, se realizó un estudio sobre la bronquitis crónica y se utilizó el modelo de Maxwell para fluidos viscoelásticos. Este modelo fue capaz de predecir la frecuencia de resonancia de la tos en una persona sana y en una persona enferma. Esto nos llevó a la conclusión de que el modelo sentaba una base teórica muy importante, que en el futuro nos podría llevar a implementar una técnica –que no es nuestra intención proponer- que permitiera el desarrollo de un nuevo tratamiento para pacientes con bronquitis crónica.

---

---

**MODELO PARA EXPLICAR LA FRECUENCIA DE LA TOS  
Y PROPUESTA PARA DESOBSTRUIR LAS VÍAS  
RESPIRATORIAS EN LA BRONQUITIS CRÓNICA**

---

---

**José Juan Morales Morales**

Asesor de Tesis: Dra. Eugenia Corvera Poiré

México, D.F. 2005.

Este trabajo fue desarrollado en el  
Departamento de Física y Química Teórica  
Facultad de Química  
Universidad Nacional Autónoma de México  
bajo la dirección de la  
**Dra. Eugenia Corvera Poiré**

## **INTRODUCCIÓN**

---

---

Algunas enfermedades están relacionadas con la falta de movimiento de fluidos corporales. Entre éstas, podemos encontrar la aterosclerosis, la trombosis y la bronquitis crónica. El común denominador de estos padecimientos, es que el flujo de un fluido viscoelástico se ve disminuido. En la bronquitis crónica, la falta de movimiento de las secreciones bronquiales ocasiona una acumulación excesiva de moco en los bronquios terminales, misma que impide el flujo de aire y que repercute directamente en una correcta respiración. Está por demás mencionar las graves consecuencias que pueden presentarse en el organismo por la falta de oxígeno. Es por esto, que si se lograra movilizar eficientemente el moco acumulado en los bronquios terminales, se podría incrementar el flujo de aire ayudando a mejorar la respiración.

El moco bronquial que recubre las vías respiratorias es un fluido viscoelástico. Recientemente se han obtenido resultados en el área de fluidos viscoelásticos confinados [1,2,3,4,5,6] que abren una gama de posibilidades interesantes en el campo de la medicina. López de Haro M.,

del Río J. A. y Whitaker [1,2] mostraron que la permeabilidad dinámica de un fluido viscoelástico confinado presenta máximos a determinadas frecuencias. Debido a que la permeabilidad dinámica es una medida de la resistencia a fluir de un fluido, este resultado indica que existen frecuencias a las cuales el movimiento del fluido está favorecido. A la frecuencia a la cual el fluido tiene el máximo valor de permeabilidad dinámica, se le llama frecuencia de resonancia. A la frecuencia de resonancia el fluido fluirá con mayor facilidad.

En condiciones normales el moco bronquial es expulsado fuera del sistema respiratorio por el movimiento muco ciliar y por el mecanismo de la tos. En una persona sana, la producción continua de moco es muy pequeña y el movimiento muco ciliar permite su fácil eliminación. Cuando se produce moco en cantidades un poco mayores a las normales, entra en acción el mecanismo de la tos a fin de movilizarlo. Sin embargo, en la bronquitis crónica el movimiento muco ciliar deja de funcionar y aunque el mecanismo de la tos aún existe, no es suficiente para expulsar el moco de las vías respiratorias. Como explicaremos más adelante, esto se debe en parte a que en la bronquitis crónica la viscosidad del moco aumenta considerablemente.

En esta tesis se presentan dos hipótesis. La primera, es que la frecuencia de la tos en una persona sana, corresponde a la frecuencia de resonancia del moco sano confinado a fluir en los bronquios terminales. Para probar esto se propone un modelo simplificado del sistema moco-

bronquio consistente con la física de fluidos viscoelásticos, se calcula la permeabilidad dinámica del sistema y su frecuencia de resonancia. Se obtiene para esta frecuencia un valor de entre 2 y 3 Hz que coincide con la frecuencia de la tos. Esto permite pensar que aunque simplificado, el modelo es adecuado para estudiar el sistema de interés.

La segunda hipótesis de la tesis es que durante la bronquitis crónica, el aumento en la viscosidad del moco causa que la frecuencia de resonancia del sistema cambie y que el mecanismo de la tos, que sigue actuando *a grosso modo* con la misma frecuencia, no favorece el movimiento del moco por no encontrarse a una frecuencia que maximice la permeabilidad dinámica y por ende minimice la resistencia a fluir.

Se calcula, con el modelo propuesto, el cambio que habría en el flujo del moco en condiciones de enfermedad y verificamos que efectivamente la frecuencia de resonancia aumenta, lo que hace que el flujo de moco a la frecuencia de la tos disminuya. Finalmente se hace una propuesta de cómo podría aumentarse el flujo de moco en personas con bronquitis crónica. La propuesta consiste en aplicar –por medio de alguna técnica que no es nuestra intención proponer– una frecuencia que corresponda a la frecuencia de resonancia del sistema enfermo que sería la que maximizará la correspondiente permeabilidad dinámica y favoreciera el flujo de moco en condiciones de enfermedad.

El presente trabajo, podría sentar una base teórica para aliviar en parte el problema de la bronquitis crónica y otras enfermedades respiratorias en las que el aumento de la viscosidad del moco impide su correcta expulsión.

## **APARATO RESPIRATORIO**

---

---

El cuerpo humano necesita oxígeno para vivir, este oxígeno es tomado de la atmósfera y llevado a todos los órganos del cuerpo por medio de la sangre. Sin embargo, para que el oxígeno sea llevado a los diferentes órganos y estos a su vez desechen el dióxido de carbono, es necesario un sistema que permita dicho intercambio de gases de manera óptima. Este sistema también deberá tener la capacidad de proteger al organismo de partículas y cuerpos extraños que se encuentren en el ambiente, los cuales pueden ser perjudiciales o potencialmente patógenos; este sistema es el aparato respiratorio.

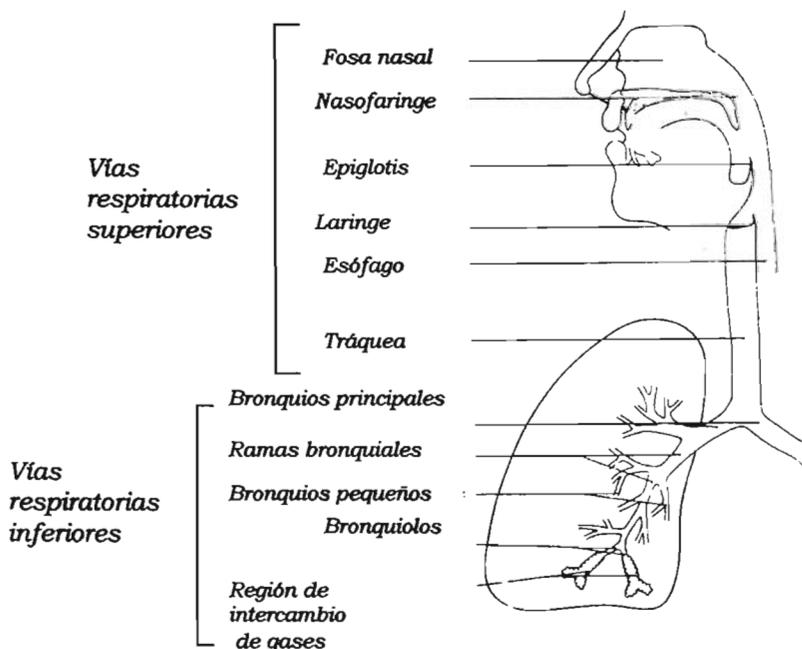
Este estudio iniciará, explicando en detalle la función del aparato respiratorio, mencionando sus mecanismos de defensa y analizando la manera en la que una enfermedad específica puede alterar de manera considerable la correcta oxigenación del cuerpo. La enfermedad en la que centraremos nuestro estudio, es conocida como Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica.

## **2.1 La Respiración.**

La respiración es el trayecto que recorre el flujo de aire desde la boca o la nariz hasta los sacos alveolares, en donde el oxígeno es intercambiado por dióxido de carbono.

En la nariz se filtran las partículas de gran tamaño. El aire se calienta y humidifica. Todo esto tiene el propósito de preparar el flujo de aire que se introducirá en el organismo. Después de este primer filtro, el aire pasa hacia la orofaringe o nasofaringe, la traquea y finalmente, un sistema de bronquios y bronquiólos que se asemeja a las ramas de un árbol. Razón por la cual, a este sistema de bronquios y bronquiólos se le conoce también como árbol bronquial. En la Fig. 1 se puede apreciar un esquema del árbol bronquial. La traquea se divide en dos bronquios principales, el izquierdo y el derecho. Estos a su vez se subdividen en bronquios lobares, tres en el lado derecho y dos en el izquierdo. Posteriormente, se encuentran bronquios de menor diámetro, bronquiólos terminales, bronquiólos respiratorios y alvéolos. Las vías respiratorias se dividen de 15 a 20 veces [7].

A las vías respiratorias que comprenden desde la traquea hasta los bronquiólos terminales, se les conoce como vías de conducción; ya que su única función es la de conducir el flujo de aire y no participan en el intercambio de gases. A las vías que comprenden de los bronquiólos respiratorios hasta los sacos alveolares, se les conoce como unidad respiratoria terminal o acino y es aquí donde se efectúa el intercambio gaseoso.



**Figura 1. Esquema del árbol bronquial y sus principales divisiones [8].**

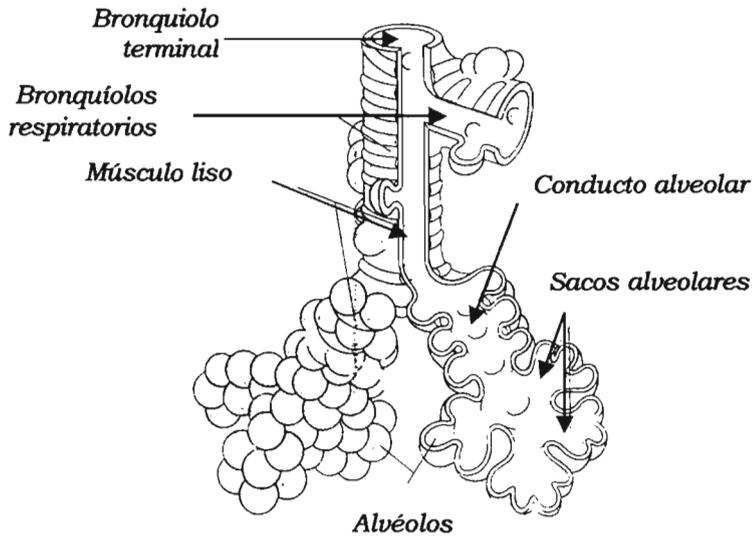
Las paredes de los alvéolos tienen la apariencia de una membrana. De un lado de ellas se encuentra el aire captado de la atmósfera que contiene oxígeno, y del otro lado hay vasos capilares con sangre cargada de dióxido de carbono. El intercambio de gases permite que el dióxido de carbono, desechado por el organismo, sea expulsado fuera de él y permite que el oxígeno sea transportado por la sangre a cada célula del cuerpo. La superficie alveolar es grande, se estima que en el pulmón de un adulto existen alrededor de 300 millones de alvéolos con una superficie de

intercambio de aproximadamente 70 m<sup>2</sup>. Una persona normal respira aproximadamente 500 ml de aire por cada aspiración con una frecuencia de 12 a 16 veces por minuto. Esto da un total de 6 a 8 litros de aire por minuto.

## ***2.2 Estructura de las vías respiratorias.***

Como se mencionó anteriormente, la tráquea, los bronquios y los bronquiolos hasta el nivel de los bronquiolos terminales, son vías respiratorias de conducción y su función es exclusivamente de transporte y filtrado del flujo de aire. Después se encuentran los bronquiolos respiratorios que marcan el inicio de la zona respiratoria del pulmón. Los alvéolos se encuentran en las paredes de los bronquiolos respiratorios y a medida que se avanza en el árbol respiratorio, estas paredes se encuentran cada vez más pobladas de alvéolos (alveolarizadas), hasta llegar al punto donde los conductos se encuentran totalmente alveolarizados (Fig. 2). Las vías respiratorias que componen el árbol bronquial se componen de varias capas de tejido. Al espacio de la vía aérea por donde pasa el flujo de aire se le conoce como luz; adyacente a la luz encontramos la primera capa de las vías respiratorias, esta capa es la mucosa. En la mucosa encontramos células epiteliales, glándulas mucosas, músculo liso, tejido conectivo, nervios y vasos linfáticos. Las glándulas mucosas que se encuentran en esta capa de tejido, descargan moco hacia la luz. Este moco

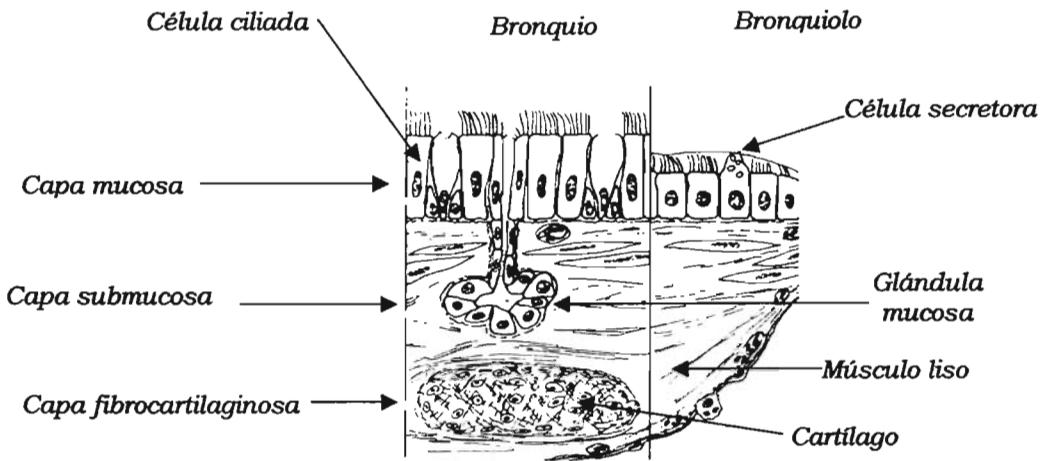
y sus propiedades tienen funciones bien definidas, las cuales se analizarán más adelante.



**Figura 2. Alvéolos [8].**

La capa mucosa está formada por células cilíndricas de dos tipos: células ciliadas y células secretoras de moco. Las células ciliadas se llaman así porque poseen cilios. Estos cilios son vellosidades cuya función es la de remover el moco secretado hacia la tráquea y la faringe, para su posterior expulsión o deglución.

Por fuera de la capa mucosa se localiza una capa de tejido fibrocartilaginoso, cuya función es la de darle rigidez a las vías respiratorias. Esta rigidez se consigue mediante un sistema de anillos cartilagosos ubicados en esta capa de tejido. La Fig. (3) da una perspectiva de los componentes de la pared de la vía respiratoria.



**Figura 3. Estructura de la pared de la vía respiratoria [7].**

Finalmente, estas capas están rodeadas por grasa, vasos sanguíneos y nervios.

En la Tabla 1 se puede ver un listado de las diferentes vías respiratorias y sus respectivas dimensiones.

NOMBRE	NÚMERO	DIÁMETRO (mm)
Tráquea	1	25
Bronquios principales	2	11 - 19
Bronquios lobares	5	4.5 - 13.5
Bronquios segmentarios	19	4.5 - 6.5
Bronquios subsegmentarios	38	3 - 6
Bronquios terminales	1000	1.0
Bronquiolos terminales	35000	0.65
Bronquiolos respiratorios terminales	630000	0.45
Conductos y sacos alveolares	$4 \times 10^6$	0.40
Alvéolos	$300 \times 10^6$	0.25 - 0.30

**Tabla 1 Vías Respiratorias y sus respectivas dimensiones [7].**

### ***2.3 Mecanismos de Defensa.***

El aparato respiratorio es el sistema con mayor contacto directo con el exterior. El aparato respiratorio recibe aproximadamente 10 000 litros de aire al día. Lo cual nos hace pensar que debe poseer mecanismos de defensa que lo protejan de la gran variedad de partículas y microorganismos presentes en el ambiente. Los mecanismos de defensa del aparato respiratorio son de vital importancia ya que de su buen funcionamiento depende la protección de las vías respiratorias, lo cual se verá reflejado en una correcta oxigenación del cuerpo.

Los mecanismos de defensa pueden identificar y eliminar desde partículas de polvo hasta microorganismos potencialmente patógenos. Estos

mecanismos de defensa son diversos y cada uno tiene una función definida, según sea el peligro al que se expongan las vías respiratorias.

A continuación, se estudiarán los tres mecanismos de defensa pulmonar más importantes, que son la tos, las secreciones bronquiales y el movimiento muco ciliar.

### **2.3.1 Tos.**

La tos es una maniobra del aparato respiratorio que viene como una respuesta a la deformación mecánica o a la irritación de las vías respiratorias; aunque también puede ser inducida voluntariamente.

En estado de salud, la tos tiene como función eliminar las partículas extrañas que han logrado introducirse hacia la tráquea y que han quedado adheridas a la capa de moco que recubre a la misma.

En estado de enfermedad, la tos debe estudiarse con más cuidado, ya que cada enfermedad del aparato respiratorio presentará un distinto tipo de tos y en algunos casos, no habrá presencia de este mecanismo.

El mecanismo de la tos consta de los siguientes pasos. En primer lugar ocurre una fase de aspiración, contracción de las cuerdas vocales y una enérgica contracción de los músculos abdominales e intercostales, generándose una presión dentro del tórax de aproximadamente  $3922.552 \text{ N/m}^2$  (3.922 KPa). Después de esto ocurre una rápida apertura de la glotis, y es en este instante cuando se produce una rápida expulsión de aire que arrastra el moco hacia los bronquios más grandes, la tráquea y las

estructuras laríngeas. Al ocurrir el mecanismo de la tos, la tráquea se desplaza hacia adelante por medio de las herraduras cartilagosas ubicadas en su estructura. Esto ayuda también al desplazamiento del moco hacia la faringe. En general, se puede decir que la tos es un reflejo protector que tiene como objetivo expulsar secreciones o partículas sólidas que se han acumulado en las vías aéreas. De acuerdo a los estudios más recientes [9,10], la tos actúa desde los bronquios terminales (de 1mm de diámetro) hacia arriba en el árbol bronquial.

En casos de enfermedad tales como la bronquitis crónica, el mecanismo de la tos puede perder su eficacia atentando contra el flujo de aire mínimo requerido para la correcta respiración.

### ***2.3.2 Secreciones Bronquiales.***

Las secreciones bronquiales son otro mecanismo de defensa de gran importancia para el aparato respiratorio. Como se mencionó, en la capa mucosa de las vías respiratorias se encuentran las glándulas mucosas; estas glándulas segregan moco hacia la luz de las vías respiratorias. La función del moco es la de crear una capa que recubre las vías aéreas de conducción en su totalidad. Los cuerpos extraños y microorganismos patógenos quedan adheridos a esta capa protectora. En el moco existen también células que tienen la capacidad de deglutir ciertos microorganismos, logrando con esto, un mecanismo de defensa extra

dentro del moco. En el adulto, la cantidad de moco segregado o producido por día es de 10 a 100 ml.

Las secreciones bronquiales también son conocidas como esputo, el cual consta de moco, líquido trasudado de los tejidos, saliva, material celular, enzimas e inmunoglobulinas. El moco se compone de un 95% de agua, 1% de hidratos de carbono, proteínas, lípidos y material inorgánico. Además del agua, los principales componentes son los muco polisacáridos.

### ***2.3.3 Movimiento Muco ciliar.***

En la capa mucosa existen células ciliadas, cada una de ellas posee alrededor de 200 a 300 cilios que se mueven con una frecuencia de 5 a 20 veces por segundo [11]. Este movimiento consta de dos fases, un desplazamiento efectivo y un desplazamiento de recuperación, los cuales se sincronizan con los movimientos de los cilios de las células vecinas. Los cilios tienen dos funciones principales, extender de manera uniforme el moco segregado por las glándulas mucosas y mover el moco hacia los grandes bronquios y hacia la faringe. Sin embargo, como veremos al estudiar la bronquitis crónica, el movimiento ciliar puede verse severamente afectado por irritantes tales como el humo del cigarro.

Los tres mecanismos de defensa presentados no actúan de manera independiente uno del otro, sino que funcionan de manera conjunta

creando un excelente mecanismo de defensa pulmonar. Se puede explicar de la siguiente manera.

Al introducirse cuerpos extraños en las vías respiratorias, incluso en las vías de menor diámetro, éstos son atrapados por el recubrimiento de las secreciones bronquiales sobre las vías respiratorias. Posteriormente, los cilios entran en acción y se encargan de desplazar las secreciones bronquiales (con los cuerpos atrapados) hacia los grandes bronquios, la tráquea y la faringe. Las secreciones bronquiales son deglutidas inconscientemente cuando han llegado a la orofaringe. Pero cuando la cantidad de estas secreciones es mayor de lo normal o cuando alguna de sus características ha cambiado (por ejemplo su composición), o bien cuando las partículas son muy grandes se activa el mecanismo de la tos. La tos trata de movilizar el exceso de secreciones, entonces se dice que hay expectoración o producción de esputo.

Sin embargo, en ocasiones el mecanismo tusígeno es insuficiente para eliminar el exceso de secreciones bronquiales. Esto se da principalmente en enfermedades como la bronquitis crónica, donde el exceso de moco llega incluso a obstruir completamente las vías aéreas de 1mm de diámetro.

**ENFERMEDAD PULMONAR**  
**OBSTRUCTIVA CRÓNICA**

---

---

Una vez que se ha analizado el funcionamiento del aparato respiratorio y la manera en la que este se encuentra protegido por los diferentes mecanismos de defensa, se estudiará una enfermedad en la que los mecanismos de defensa dejan de funcionar adecuadamente. También, se analizará de qué manera se ve afectado el proceso de la respiración.

La enfermedad conocida como Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) se define de la siguiente manera: *enfermedad caracterizada por bronquitis crónica o enfisema y obstrucción al flujo aéreo, que suele ser progresiva, se puede acompañar de hiperreactividad de la vía aérea y puede ser reversible en parte* [12].

En realidad la EPOC no es una sola enfermedad sino que es un grupo de enfermedades que tienen un factor común, la obstrucción de las vías respiratorias. Las enfermedades que componen a la EPOC son la bronquitis crónica y el enfisema pulmonar. En algunas ocasiones el asma

también se considera como parte de la EPOC, sin embargo dicha aceptación no está generalizada.

Hay dos síntomas predominantes en los pacientes que padecen EPOC, la tos que frecuentemente es productiva y la dificultad para respirar (disnea). Por tos productiva, se entiende aquel tipo de tos que va acompañada de la expulsión de secreciones bronquiales, conocidas como esputo. En los pacientes que padecen EPOC y que llegan a contraer una enfermedad de origen viral (un resfriado común), los síntomas de tal enfermedad se hacen mucho más severos de lo normal.

Existen dos tipos de pacientes de EPOC el **A** y el **B**. Los pacientes de tipo **A** se ven muy delgados llegando incluso a verse esqueléticos y con frecuencia se inclinan hacia delante descansando sobre sus brazos. Por otro lado, el paciente tipo **B** es obeso y generalmente no tiene tanta dificultad para respirar como el tipo **A**.

La EPOC es un padecimiento que causa aproximadamente 600 millones de muertes prematuras en el mundo. Una gran parte de la población mexicana desconoce este padecimiento, pero lo cierto es que tanto el SIDA como la EPOC matan al mismo número de personas en el mundo. El Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER) reporta que en 1992, los enfermos con EPOC constituían el 10% de los enfermos hospitalizados. El INER también reporta que de todos los pacientes que morían, el 20% era por causa de la EPOC [13].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) decidió instaurar el 20 de Noviembre como el día mundial de la EPOC.

La causa principal de la EPOC es el hábito de fumar, que puede conducir al enfisema o a la bronquitis crónica. Sin embargo, del total de los fumadores sólo del 15 al 20% desarrollan EPOC. También los fumadores pasivos están propensos a contraer EPOC.

Ahora se describirán las dos enfermedades que componen a la EPOC centrandó nuestro estudio en la bronquitis crónica, que tiene como característica principal la obstrucción de las vías respiratorias por la acumulación excesiva de moco.

### ***3.1 Enfisema Pulmonar.***

El enfisema pulmonar es una enfermedad caracterizada por la destrucción de las paredes alveolares, debido a la presencia de irritantes de las vías respiratorias. En el enfisema pulmonar los sacos alveolares quedan inflados permanentemente, esto causa un daño irreversible en sus paredes y hace que sea imposible el intercambio de gases. En esta enfermedad el problema se debe a una destrucción de la pared alveolar y la obstrucción de las vías respiratorias por la acumulación excesiva de moco se da en menor grado o no se presenta.

### **3.2 Bronquitis Crónica.**

El manual Merck de diagnóstico y tratamiento [12] define a la bronquitis crónica de la siguiente manera: Enfermedad que se caracteriza por tos productiva durante al menos 3 meses en 2 años sucesivos, tras excluir otras causas, como las infecciones por *mycobacterium tuberculosis*, el carcinoma pulmonar y la insuficiencia cardiaca crónica.

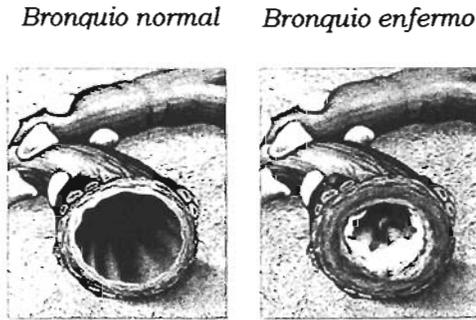
La tos productiva es aquella que expulsa secreciones bronquiales no deglutidas por el organismo. En la bronquitis crónica este tipo de tos se presenta durante al menos tres meses todos los días, especialmente por la mañana. Conforme el día avanza, la tos disminuye considerablemente. En esta enfermedad no sólo hay una producción excesiva de secreciones bronquiales en las vías respiratorias, sino que además la viscosidad de dichas secreciones también aumenta.

El mecanismo de la bronquitis crónica es como sigue: en primer lugar ocurre una severa irritación de las vías respiratorias, que se puede dar por irritantes tales como el humo del tabaco. Como respuesta a esta severa irritación de las vías, las glándulas mucosas segregan moco en exceso con el propósito de proteger las vías respiratorias. La cantidad de este moco es mucho mayor que la cantidad presente en estado de salud y su viscosidad también es mayor. Una vez segregado el moco en las vías respiratorias el mecanismo de movimiento ciliar que tiene como propósito mover las secreciones bronquiales hacia los grandes bronquios y la tráquea, debería entrar en acción. Sin embargo, la severa irritación afecta

al mecanismo de movimiento ciliar de dos maneras. En primer lugar la irritación es tan grave que la gran mayoría de las células ciliadas, si no es que todas, son destruidas. Esto provoca que el movimiento de los cilios quede imposibilitado para remover el moco. En segundo lugar la gran cantidad de moco y el aumento de su viscosidad, hace que sea más difícil removerlo aún cuando todavía existan células ciliadas no dañadas. Por lo anterior, el mecanismo de movimiento ciliar entra en acción solo parcialmente.

El mecanismo de la tos sigue funcionando y entra en acción cuando el mecanismo de defensa muco ciliar es incapaz de remover el exceso de moco. Pero la tos es un mecanismo de defensa que puede remover el moco sólo en cantidades relativamente pequeñas y que funciona de manera óptima cuando el moco tiene valores de viscosidad propios del estado de salud. Por lo que, a pesar de permanecer como mecanismo de defensa activo, resulta insuficiente para mover el moco con los valores de viscosidad propios de la enfermedad y mover el gran volumen de moco producido. La tos en la bronquitis crónica es productiva, pero esto no es señal de que el exceso de moco en su totalidad sea removido y expulsado. La producción excesiva de secreciones bronquiales y la incapacidad de los mecanismos de defensa para removerlas, provoca una acumulación anormal de moco en las vías respiratorias (Fig. 4) teniendo como consecuencia una obstrucción de las mismas. Esta obstrucción se da principalmente en las vías respiratorias de 1mm de diámetro, que son los

bronquios terminales [14], aunque no es raro encontrar alteraciones en la mucosa de los bronquios mayores.



**Figura 4. Acumulación de moco en los bronquios.**

En la bronquitis crónica el intercambio gaseoso no es el adecuado debido a que la cantidad de aire que llega a los alvéolos no es suficiente como resultado de la obstrucción de los bronquios terminales. En algunas ocasiones, llegan incluso a presentarse bronquios totalmente obstruidos por secreciones bronquiales en exceso, y por lo tanto a través de ellos no llega el aire en lo absoluto.

A diferencia de lo que ocurre en el enfisema pulmonar, en donde el intercambio gaseoso no es el adecuado por la destrucción de las paredes alveolares, en la bronquitis crónica el intercambio gaseoso no es el adecuado por la obstrucción de las vías respiratorias.

### **3.3 Tratamiento.**

No existe cura para la bronquitis crónica y el objetivo de los diversos tratamientos existentes, es mejorar y prevenir complicaciones. Se debe evitar el consumo del tabaco y todos los irritantes respiratorios para prevenir el empeoramiento de la enfermedad. Entre los posibles tratamientos de la bronquitis está el uso de *expectorantes*. Estos fármacos se comercializan alegando que ayudan a expulsar las secreciones bronquiales de las vías respiratorias disminuyendo su viscosidad, lo que favorecería a su eliminación. Sin embargo, el uso de expectorantes es muy controversial ya que no existen datos objetivos que demuestren que alguno de ellos reduzca de hecho la viscosidad del esputo y facilite por ende su expulsión. Así que la elección y uso de algún expectorante, suele basarse en la tradición pero no en datos contundentes y objetivos [12].

La fluidificación y eliminación de las secreciones viscosas de las vías respiratorias es difícil, ya que no existen fármacos ni orales, ni inhalados que consigan fluidificar de forma eficaz las secreciones bronquiales. Aunque cabe señalar que una correcta hidratación, contribuye a su eliminación. Por lo que se puede hacer uso de un humidificador que mantenga una clima agradable dentro de la habitación del enfermo.

La *oxigenoterapia* a largo plazo es otro tratamiento que puede prolongar la vida de los pacientes con EPOC. Este tratamiento consiste en suministrar oxígeno proveniente de un tanque, al enfermo en cuestión. No es un tratamiento que esté al alcance de todas las personas debido a sus

costos relativamente altos. Aunado a esto, tiene la gran desventaja de que el paciente debe cargar con su tanque de oxígeno a donde quiera que se traslade; lo que lo hace un tratamiento incómodo y caro.

*Transplante de pulmón.* Los pacientes con EPOC que son sometidos a un transplante de pulmón, deben ser sometidos a terapia intensiva durante un tiempo prolongado. Esta cirugía no constituye una cura definitiva, ya que se presentan brotes de la enfermedad después de la operación, a largo o corto plazo. Una alternativa es el transplante de un solo pulmón, pero tiene las mismas desventajas e inconvenientes que el transplante de ambos pulmones.

Ninguno de estos tratamientos es totalmente efectivo. Algunas de las complicaciones que puede presentar la bronquitis crónica son: la bronquitis aguda, la neumonía, el enfisema, la arritmia cardiaca y la insuficiencia respiratoria. Como se verá más adelante, en este trabajo se hace una propuesta de cómo podrían eliminarse las secreciones viscosas de las vías respiratorias con menor dificultad.

### ***3.4 Propiedades del moco bronquial.***

El moco bronquial que protege a las vías respiratorias y que es generado por las glándulas mucosas ubicadas en la capa mucosa de la vía, posee propiedades viscosas y elásticas. De esta manera, el moco bronquial se clasifica dentro de los fluidos viscoelásticos. Existen otros biofluidos

dentro del cuerpo humano que también se consideran fluidos viscoelásticos, tales como la sangre, la bilis y las secreciones vaginales. El moco bronquial es una glucoproteína producida tanto por células productoras de moco como por las glándulas mucosas. Está constituido por un 95% de agua, y su densidad es por lo tanto, prácticamente igual a la del agua que es de  $1050 \text{ Kg/m}^3$ . Su viscosidad en estado de salud es del orden de 1.5 poises (g/cms), mientras que su viscosidad en estado de bronquitis crónica tiene un valor de 16 poises (g/cms). Este aumento en la viscosidad se debe a una producción excesiva de proteínas por parte de las glándulas secretoras de moco, como una respuesta de defensa ante la enfermedad. El tiempo de relajación del moco bronquial es de 10 seg. Estos valores fueron tomados de la referencia [15].

Una vez que se conoce la anatomía del aparato respiratorio, el mecanismo de la bronquitis crónica y las propiedades del moco bronquial; se debe presentar la física de fluidos viscoelásticos que nos permita vislumbrar la posible solución al problema. En el próximo capítulo (Cap. 4) nos daremos a la tarea de presentar la física de los fluidos viscoelásticos, para posteriormente proponer como se puede atacar el problema.

## **FLUIDOS VISCOELÁSTICOS**

---

---

En el capítulo anterior (Cap. 3) se analizó que el problema principal de la bronquitis crónica, es la acumulación excesiva de moco bronquial en las vías de 1 mm de diámetro (bronquios terminales). Y también se analizó que aunque el mecanismo de la tos sigue funcionando, se ve imposibilitado para remover las secreciones bronquiales acumuladas en los bronquios terminales, debido tanto a la gran cantidad de moco acumulada, como al incremento de su viscosidad.

Los fluidos viscoelásticos son aquellos que exhiben recuperación elástica a la deformación. Los líquidos poliméricos constituyen la mayor parte de este tipo de fluidos. Son materiales que tienen propiedades viscosas y elásticas. La mayoría de los fluidos en el cuerpo humano (biofluidos) son de tipo viscoelástico.

Como el moco bronquial es un fluido viscoelástico, se presentan algunos aspectos de la física de fluidos viscoelásticos necesarios para el modelo que se propondrá.

El modelo más sencillo de estudio para los fluidos viscoelásticos y el que se utilizará en este trabajo, es el conocido como modelo de Maxwell o fluido de Maxwell [16].

#### 4.1 Modelo de Maxwell.

El modelo de Maxwell es un modelo fenomenológico que se propone considerando un sistema compuesto por un sólido elástico (un resorte) y un fluido viscoso (Fig. 5) conectados en serie, de tal manera que ambos experimentarán la misma fuerza.

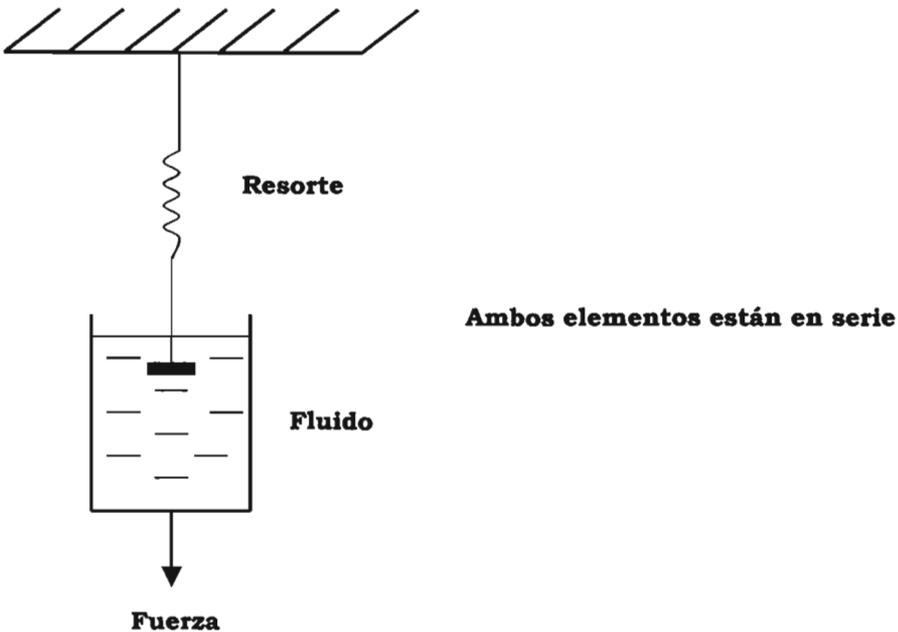


Figura 5.

Al aplicar una fuerza sobre el sistema, ambos elementos opondrán resistencia a la deformación. El sólido es un material elástico y obedece la ley de Hooke, mientras que el fluido viscoso obedece la ley de Newton de la viscosidad. Ambos elementos experimentarán el mismo esfuerzo y se puede escribir la siguiente relación,

$$\sigma = \sigma_s = \sigma_d \quad (4.1)$$

en donde  $\sigma_s$  es el esfuerzo correspondiente al sólido y  $\sigma_d$  es el esfuerzo correspondiente al fluido

Para el material sólido se tiene,

$$\sigma = Gu_s \quad (4.2)$$

y para el fluido,

$$\sigma = \eta \dot{u}_L \quad (4.3)$$

en estas ecuaciones  $u$  es la deformación,  $G$  es el módulo elástico y  $\eta$  es la viscosidad del fluido.

La deformación total se puede expresar como sigue,

$$u = u_s + u_L \quad (4.4)$$

derivando respecto al tiempo y utilizando las ecuaciones (4.2) y (4.3) se tiene

$$\frac{du}{dt} = \frac{du_s}{dt} + \frac{du_L}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = \frac{1}{G} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{G} \frac{\sigma}{tr}$$

y se obtiene

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{G} \left[ \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{tr} \right] \quad (4.5)$$

en donde  $tr$  es un tiempo de relajación, conocido como tiempo de relajación de Maxwell, el cual está definido por la siguiente expresión,

$$tr = \frac{\eta}{G} \quad (4.6)$$

En la ecuación constitutiva del modelo de Maxwell (4.5), si  $tr \rightarrow \infty$  el término  $\sigma/tr$  es despreciable y se obtiene la ecuación (4.2) que es la ecuación constitutiva de un sólido elástico. Por otro lado si  $tr \rightarrow 0$ , el término  $\sigma/tr$  domina y la ecuación (4.5) se reduce a la ecuación (4.3) que es la ecuación constitutiva de un fluido puramente viscoso. Por lo que se puede decir que el modelo de Maxwell describe un material que tiene propiedades intermedias entre un fluido viscoso y un sólido elástico.

La ecuación (4.5) puede ser escrita en términos de la velocidad de la siguiente manera

$$tr \frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\eta \nabla \bar{v} - \sigma \quad (4.7)$$

Esta es la ecuación constitutiva del modelo de Maxwell linealizada. Una limitación de este modelo es que sólo considera un tiempo de relajación y la gran mayoría de los fluidos viscoelásticos requieren de más de un tiempo de relajación para ser descritos. No obstante sus limitaciones,

existen muchos fluidos viscoelásticos que se comportan como maxwellianos.

Consideremos ahora la ecuación de balance de momento linealizada,

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\nabla p - \nabla \cdot \sigma \quad (4.8)$$

donde se ha despreciado el término  $\bar{v} \cdot \nabla \bar{v}$ . En esta expresión,  $\rho$  es la densidad del fluido.

Con las ecuaciones (4.7) y (4.8) se obtiene,

$$\rho tr \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial t^2} + \rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -tr \frac{\partial \nabla p}{\partial t} - \nabla p + \eta \nabla^2 \bar{v} \quad (4.9)$$

En esta ecuación se puede ver claramente que si  $tr=0$  se recupera la ecuación de Navier-Stokes. Esta es la ecuación que se utilizará para el modelo. Su principal limitación sea probablemente el hecho de que esté linealizada, pero será este mismo hecho el que facilite el estudio.

## 4.2 Permeabilidad Dinámica.

En el estudio de medios porosos la permeabilidad es una propiedad que indica que tan fácilmente fluye un fluido a través de él. Si se tiene una permeabilidad grande significa que el fluido puede fluir fácilmente. Por el contrario, si la permeabilidad es pequeña significa que el fluido requiere de un mayor gradiente de presión para fluir.

La ecuación del modelo de Maxwell que se presentó anteriormente está en el dominio del tiempo. Se aplicará la transformada de Fourier para obtener una expresión en el dominio de frecuencias.

La transformada de Fourier de una función  $f(r,t)$  se define de la siguiente manera,

$$\hat{f}(r,\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(r,t) e^{i\omega t} dt \quad (4.10)$$

en donde  $\omega$  es la frecuencia y la función  $f(r,\omega)$  es la transformada de Fourier de  $f(r,t)$ . Al realizar la transformada de Fourier se estará trabajando en el espacio de Fourier, esto resulta muy útil, ya que las ecuaciones de este problema se simplifican enormemente. En lugar de tener una ecuación diferencial en el espacio y el tiempo, se tendrá una ecuación diferencial en el espacio y algebraica en la frecuencia.

Se aplica la transformada de Fourier a la ecuación (4.9) para obtener la siguiente expresión,

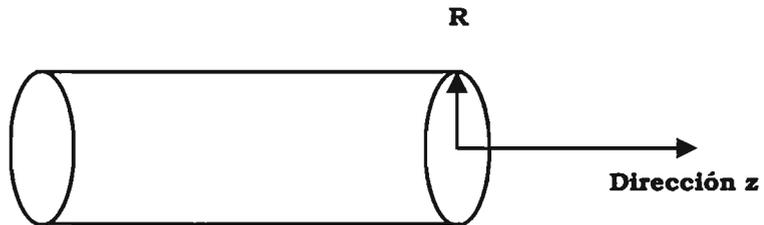
$$-\rho (tr\omega^2 + i\omega) \vec{v} - \eta \nabla^2 \vec{v} = - (1 - i\omega tr) \nabla p \quad (4.11)$$

La ecuación (4.11) es la ecuación de movimiento para un fluido de Maxwell en el dominio de frecuencias. La velocidad y la presión están en el dominio de frecuencias, esto es, son funciones de las coordenadas espaciales y de la frecuencia.

Por simplicidad en la notación, se omite el uso del acento circunflejo en el dominio de frecuencias.

### **4.3 Ecuación de la permeabilidad dinámica para un tubo.**

Para fines de nuestro estudio, la geometría que se utilizará es la de un tubo, es decir la geometría cilíndrica (Fig. 6). Esta elección de geometría se debe a que se desea aplicar la física de fluidos viscoelásticos, a la bronquitis crónica y la forma de los bronquios es aproximadamente cilíndrica.



**Figura 6.**

En el sistema, el fluido fluye en un tubo de radio  $R$  en la dirección de la coordenada  $z$  y la velocidad es función del radio,  $\vec{v} = v_z(r)\hat{k}$ . El gradiente de presión a lo largo del tubo no depende de la coordenada  $r$ .

Se imponen condiciones de frontera de no deslizamiento como sigue:

$$\text{Condición de frontera 1: } v_z(r=R) = 0$$

$$\text{Condición de frontera 2: } v_z(r=0) = \text{finita}$$

Se toma la ecuación (4.11) en coordenadas cilíndricas,

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\rho}{\eta} (tr\omega^2 + i\omega) v_z = \frac{(1 - i\omega tr)}{\eta} \frac{dp}{dz} \quad (4.12)$$

Por simplicidad en la nomenclatura se usarán las siguientes expresiones,

$$A^2 = \frac{\rho}{\eta} (tr\omega^2 + i\omega) = \frac{\rho}{\eta} i\omega (1 - i\omega tr) \quad (4.13)$$

$$B = \frac{(1 - i\omega tr)}{\eta} \frac{dp}{dz} \quad (4.14)$$

se sustituyen estas dos últimas expresiones en la ecuación (4.12) y se multiplica por  $r^2$ ,

$$r^2 \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + r \frac{\partial v_z}{\partial r} + A^2 r^2 v_z = r^2 B \quad (4.15)$$

Para resolver esta ecuación son necesarias dos soluciones linealmente independientes de la ecuación homogénea y una solución particular,

La ecuación homogénea correspondiente está dada por

$$r^2 \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + r \frac{\partial v_z}{\partial r} + A^2 r^2 v_z = 0 \quad (4.16)$$

Esta es una ecuación de Bessel de orden cero, cuya solución está dada por

$$v_z^H = J_0(Ar) + N_0(Ar) \quad (4.17)$$

en donde  $J_0$  es la función de Bessel de orden cero y  $N_0$  es la función de Neumann de orden cero.

Una solución particular de la ecuación diferencial (4.15) está dada por,

$$v_z^p = \frac{B}{A^2} = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{dp}{dz} \quad (4.18)$$

Así que la solución general de la ecuación está dada por,

$$v_z = aJ_0(Ar) + bN_0(Ar) + \frac{1}{i\omega\rho} \frac{dp}{dz} \quad (4.19)$$

Para encontrar las constantes  $a$  y  $b$  se hace uso de las condiciones de frontera.

Con la condición de frontera (2) se sabe que la constante  $b=0$ , ya que la función de Neumann diverge en el origen. Sustituyendo la condición (1) en la ecuación (4.19), se obtiene el valor de la constante  $a$ ,

$$0 = aJ_0(AR) + \frac{1}{i\omega\rho} \frac{dp}{dz}$$

$$a = -\frac{1}{i\omega\rho J_0(AR)} \frac{dp}{dz} \quad (4.20)$$

Con lo que la expresión para la velocidad es la siguiente,

$$v_z = \frac{1}{i\omega\rho} \left[ 1 - \frac{J_0(AR)}{J_0(AR)} \right] \frac{dp}{dz} \quad (4.21)$$

La velocidad depende de la coordenada radial. Sin embargo, nos interesa calcular el promedio de la velocidad en la sección transversal debido a que es éste el que está relacionado con la cantidad de fluido transportado por unidad de tiempo. Promediando la ecuación (4.21) en la sección transversal se obtiene una expresión para la velocidad promedio dada por

$$\langle v_z \rangle = \frac{1}{i\omega\rho} \left[ 1 - \frac{2}{AR} \frac{J_1(AR)}{J_0(AR)} \right] \frac{dp}{dz} \quad (4.22)$$

en donde  $\langle v_z \rangle$  ha sido calculada utilizando,

$$\langle v_z \rangle = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_z 2\pi r dr$$

En la ecuación (4.22)  $J_1$  es la función de Bessel de orden 1.

De acuerdo a la ecuación (4.22) la velocidad promedio en el dominio de frecuencias es proporcional a  $dp/dz$  y es por tanto, una ley de Darcy generalizada. La ley de Darcy generalizada establece una relación lineal entre el promedio de la velocidad y el gradiente de presión, ambos en el espacio de frecuencias según la siguiente ecuación.

$$\langle \bar{v}(\omega) \rangle = -\frac{K(\omega)}{\eta} \nabla p(\omega) \quad (4.23)$$

en donde el término  $K(\omega)$  es la permeabilidad dinámica dada por la siguiente expresión,

$$K(\omega) = -\frac{\eta}{i\omega\rho} \left[ 1 - \frac{2 J_1(AR)}{AR J_0(AR)} \right] \quad (4.24)$$

Es importante hacer notar , que la permeabilidad dinámica depende tanto de las características del fluido, esto es, la densidad, la viscosidad y el tiempo de relajación; como de la geometría del medio que lo confina, en este caso, la dependencia con el radio del tubo.

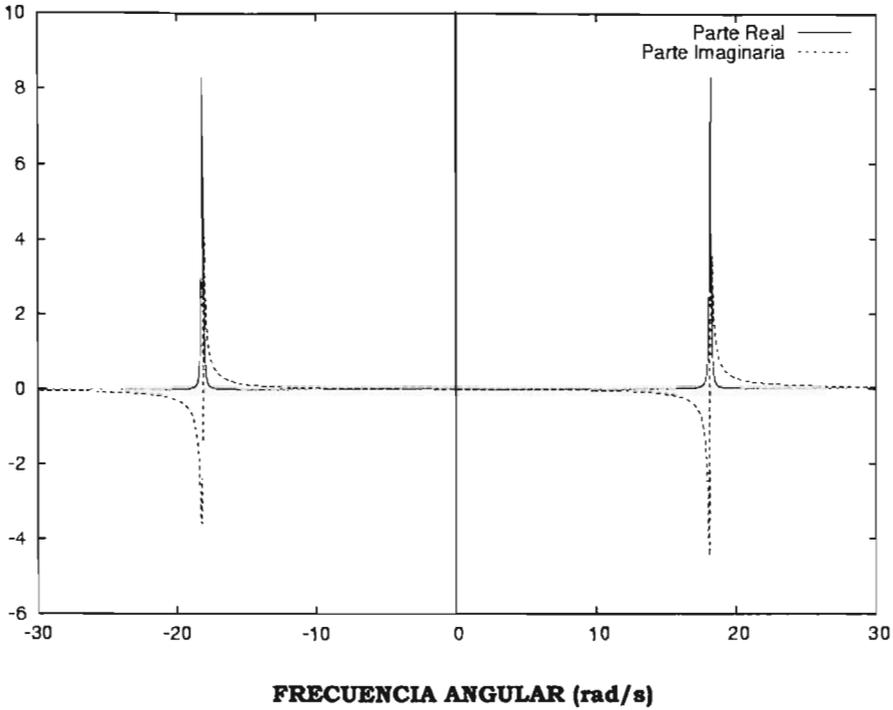
La ecuación (4.24) nos da una expresión para la permeabilidad dinámica en el dominio de frecuencias para un fluido viscoelástico que fluye por un tubo.

La parte real de la permeabilidad dinámica para un tubo es simétrica y su parte imaginaria es antisimétrica. Una curva típica de permeabilidad dinámica para el tubo se muestra en la Fig. 7.

Como se puede ver existe una frecuencia, llamada frecuencia de resonancia  $\omega_{res}$ , para la cual la parte real de la permeabilidad dinámica es máxima y la parte imaginaria de ésta cambia de signo.

A esta frecuencia la cantidad de fluido que pasa por la sección transversal por unidad de tiempo es máxima [17]. Esta cantidad se denomina flujo,  $Q(t)$ , y se define de la siguiente manera (Ec. 4.25).

**PERMEABILIDAD ( $m^2$ )**



**Figura 7.** Curva típica de la permeabilidad dinámica en el dominio de frecuencias para un fluido viscoelástico en un tubo de radio de 0.0005 m. La permeabilidad dinámica está en  $m^2$  y la frecuencia angular en rad/s. El fluido tiene una densidad  $\rho=1050 \text{ Kg}/m^3$ , un tiempo de relajación  $t_r=10 \text{ s}$  y una viscosidad  $\eta=1.5 \text{ p}$ . La frecuencia de resonancia es  $\omega_{res}=18.6 \text{ rad}/s$ .

$$Q(t) \equiv \langle v(t) \rangle \times A \quad (4.25)$$

en donde  $A$  es el área de la sección transversal. Nótese que  $Q(t)$  depende del promedio de la velocidad en el dominio del tiempo,  $\langle v(t) \rangle$ , y no en el dominio de frecuencias.

En este capítulo se ha derivado una ley de Darcy generalizada que nos permite determinar el promedio de la velocidad en el dominio de frecuencias. Estamos interesados en determinar si al imponer una frecuencia de resonancia, a través de una gradiente de presión dinámico, la cantidad de fluido por unidad de tiempo aumenta en los bronquios, este flujo se determina mediante la ecuación (4.25). Para ello es necesario conocer el promedio de la velocidad en el dominio del tiempo, por lo que se deben seguir los siguientes pasos: dado un gradiente de presión en función del tiempo, es necesario hacer una transformada de Fourier para obtener el gradiente de presión en el dominio de frecuencias. Luego, con la ley de Darcy generalizada dada por la ecuación (4.23), se obtiene la velocidad en el dominio de frecuencias. Finalmente, para obtener la velocidad en el dominio del tiempo es necesario hacer una transformada de Fourier inversa.

El cálculo de la transformada de Fourier inversa del promedio de la velocidad  $\langle v(\omega) \rangle$ , requiere en la mayoría de los casos el uso de métodos numéricos. Sin embargo, hay algunos casos [17] para los cuales  $\langle v(t) \rangle$  se puede encontrar de forma analítica. Tal es el caso de la señal de presión de

seno rectificado, ecuación (5.1), que utilizaremos en esta tesis, para la cual,  $\langle v(t) \rangle$  está dada por (5.3).

## **FRECUENCIA DE LA TOS**

---

---

En este capítulo, se presenta la primera hipótesis, esto es, que la frecuencia de la tos en una persona sana, corresponde a la frecuencia de resonancia del moco sano confinado a fluir en los bronquios terminales.

Uno podría preguntarse por qué centrar la atención en los bronquios terminales, si la tos actúa desde los bronquios terminales hacia arriba en el árbol bronquial. La razón es que la frecuencia de resonancia en las distintas ramas del árbol bronquial cambia con el radio. Mientras más grande el radio, menor la frecuencia de resonancia correspondiente.

Se escoge pues, el radio más pequeño en la región del árbol bronquial que moviliza la tos, ya que este radio pequeño, corresponderá a la frecuencia de resonancia más alta de la región del árbol bronquial movilizada por la tos. Por otro lado, una señal periódica a la frecuencia más alta contiene necesariamente, frecuencias menores, las cuales corresponderán a *grosso modo* a frecuencias de resonancia de ramas más externas del árbol bronquial.

Un modelo más sofisticado debería incluir la modelación de todo el árbol, sin embargo, por los argumentos expuestos se piensa, que la frecuencia de resonancia de todo el árbol será similar a la frecuencia de resonancia de los bronquios terminales. Esto es, que la frecuencia de resonancia de los bronquios terminales es capaz de movilizar el moco en estado de salud desde los bronquios terminales hasta la tráquea.

Se propone un modelo en el que se simula al bronquio terminal como un cilindro rígido en el cual hay un fluido viscoelástico con las características del moco. Se simula al moco como un fluido de Maxwell.

Utilizando la física de fluidos viscoelásticos presentada en el capítulo 4, se calcula la permeabilidad dinámica y su frecuencia de resonancia.

Una vez obtenida esta frecuencia de resonancia, se verifica que efectivamente corresponde a un valor cercano a la frecuencia de la tos en una persona sana.

Posteriormente se analizará como es el flujo como función del tiempo, para la frecuencia de resonancia obtenida y se comparará con el flujo a una frecuencia mayor y una menor.

### **5.1 Frecuencia de la Tos.**

Para explicar la frecuencia de la tos se hace uso de las propiedades del moco bronquial en condiciones de salud:  $\eta=0.15 \text{ Kg}/(\text{m s})$ ,  $\rho=1050 \text{ Kg}/\text{m}^3$  y  $\tau=10 \text{ s}$ . Se trabaja con un cilindro de 1 mm que corresponde al diámetro de los bronquios terminales.

Con estos datos y haciendo uso de la ecuación (4.24) vemos que la frecuencia angular de resonancia del sistema  $\omega_{res}$  es  $18.6 \text{ rad/s}$ . Este valor de frecuencia angular corresponde a una frecuencia de resonancia  $\nu_{res}=2.9 \text{ Hz}$  como se observa en la Fig. 8. Este valor de la frecuencia de resonancia corresponde al máximo de la permeabilidad dinámica.

Este dato es alentador, ya que en nuestra opinión explica porque tosemos a una cierta frecuencia (*entre 2 y 3 Hz*) y no a otra. Es decir, el mecanismo de la tos está adaptado para movilizar el moco bronquial a la frecuencia con la que el moco fluye con la menor resistencia posible, y en estado de salud, esta frecuencia de resonancia es suficiente para expulsar el moco de las vías respiratorias.

Este resultado permite pensar que, aunque simplificado, el modelo es adecuado para estudiar el sistema que nos interesa y nos indica que la frecuencia de resonancia de la tos, tiene una explicación física.

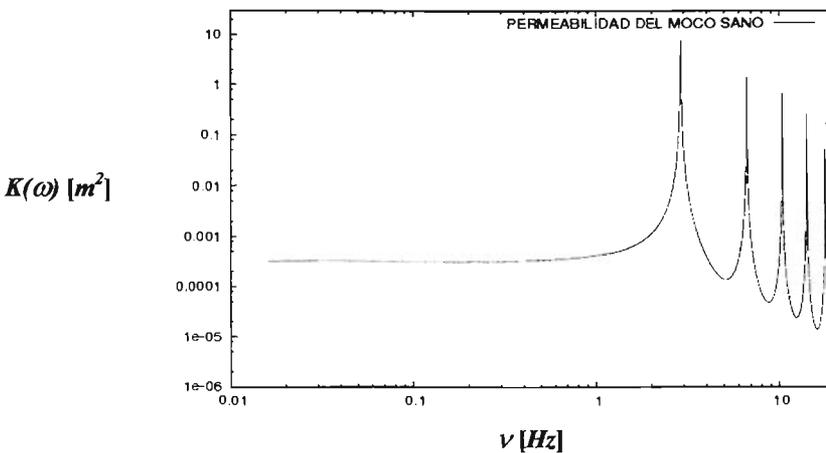


Figura 8.

## 5.2 Señal de presión.

Para poder calcular el flujo se debe establecer una señal de presión. La señal de presión que se utilizará es una función de seno rectificado, esto es,

$$\nabla p(t) = \frac{\pi \nabla p_0}{2} |\text{sen}(\omega_0 t)| \quad (5.1)$$

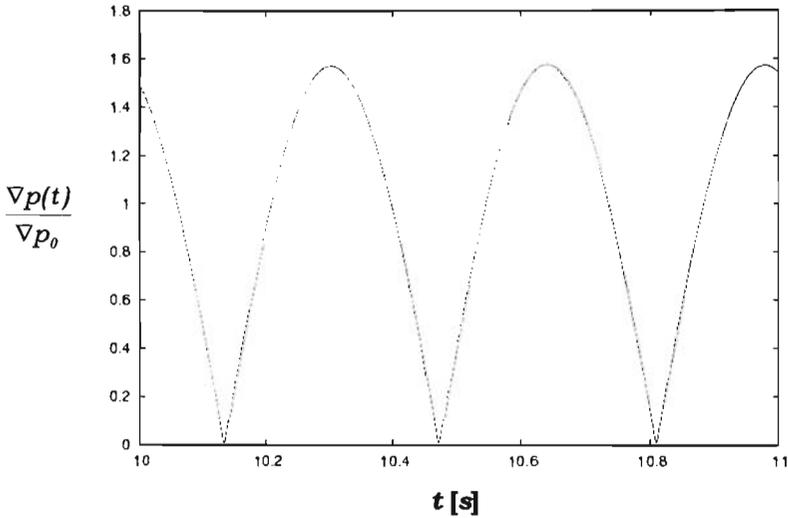
La frecuencia de este gradiente de presión es  $2\omega_0$ . Por tanto, para aplicar la frecuencia de resonancia,  $\omega_{res}$ , el parámetro  $\omega_0$  deberá ser igual a  $\omega_{res} / 2$ .

Esta función se puede escribir como una serie de Fourier dada por,

$$\nabla p(t) = \frac{\pi \nabla p_0}{2} \left[ \frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\cos(n * \omega_0 t)}{n^2 - 1} \right] \quad (5.2)$$

y su gráfica se muestra en la Fig. 9.

En la ecuación (5.2) se fija un gradiente de presión  $\nabla p_0$  con un valor de  $-56750.4 \text{ Pa/m}$ . Eso se fijó considerando que la cantidad de moco que se mueve al toser es del orden de  $0.39 \text{ g/min}$  [18].



**Figura 9. Señal de Presión**

### 5.3 Cálculo del flujo.

Con la señal de presión impuesta a la frecuencia de resonancia y la permeabilidad dinámica del moco sano en los bronquios, se puede calcular el flujo por medio de la ecuación (4.25). La velocidad correspondiente a un gradiente de presión dado por la ecuación (5.2) esta dada por [17],

$$\begin{aligned}
 v(t) = & -\frac{\pi \nabla p_0}{2\eta} \left[ \frac{2}{\pi} \operatorname{Re}K(0) - \frac{4}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \operatorname{Re}K(n\omega_0) \cos(n\omega_0 t) \right. \\
 & \left. - \frac{4}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \operatorname{Im}K(n\omega_0) \operatorname{sen}(n\omega_0 t) \right] \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

En la Fig. 10 se puede ver la gráfica del flujo. Para efectos de comparación se ha calculado el flujo a la frecuencia de resonancia del moco sano  $18.6 \text{ rad/seg}$ , a la mitad de esta frecuencia  $9.3 \text{ rad/seg}$  y al doble de la misma  $37.2 \text{ rad/seg}$ .

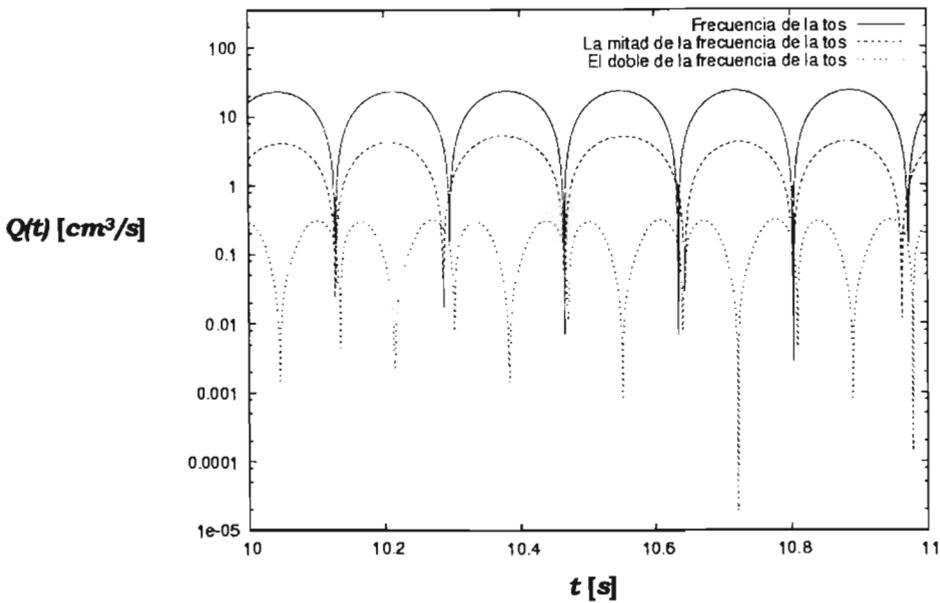
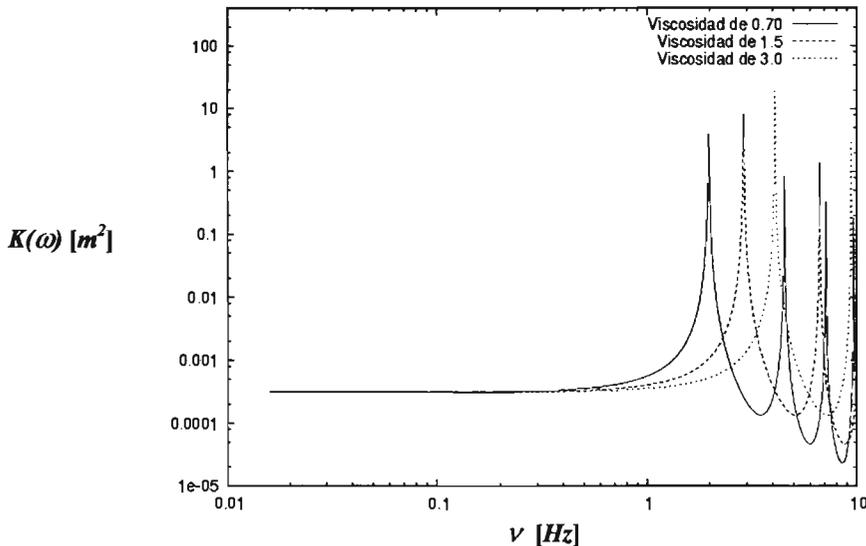


Figura 10 .

Se puede ver que a la frecuencia de resonancia de la tos, el flujo es máximo.

### 5.4 Sensibilidad al cambio de viscosidad.

Para comprobar que nuestro modelo es válido, se debe estudiar el efecto que tiene el cambio de viscosidad en nuestro problema. se utilizará la ecuación para la permeabilidad dinámica (Ec. 4.24) y se calculará la frecuencia de resonancia a tres diferentes valores de viscosidad. El primer valor de viscosidad es de 1.5 poises que corresponde al valor de la viscosidad del moco sano, el segundo valor es de 0.70 poises que es la mitad, y el tercer valor es de 3.0 poises, que es el doble. En la **Fig. 11.** se observa la gráfica correspondiente a estos tres cálculos.



**Figura 11. Sensibilidad al cambio de Viscosidad.**

Para una viscosidad de 0.70 poises, el valor de la frecuencia de resonancia es de 1.9 Hz; para el valor de viscosidad de 1.5 poises, la frecuencia de

resonancia es de 2.9 Hz; y para una viscosidad de 3.0 poises, el valor de la frecuencia de resonancia es de 4.09 Hz. Estos resultados nos muestran que el valor más cercano a la frecuencia de resonancia de la tos es el que corresponde a la viscosidad de 1.5 poises, el cual es de 2.9 Hz. El valor de 1.9 Hz es un poco bajo y el de 4.09 Hz es alto. Esto significa que nuestro modelo se aproxima a las condiciones reales del cuerpo humano.

Conforme aumenta el valor de la viscosidad también incrementa el valor de la frecuencia de resonancia, alejándose cada vez más de la frecuencia de resonancia de la tos. Este efecto se vuelve importante en el caso de la bronquitis crónica, en donde el valor de la viscosidad del moco es de 16 poises, lo cual incrementa su frecuencia de resonancia a un valor de 9.67 Hz.

---

## AUMENTO DEL FLUJO DE MOCO

### EN LA BRONQUITIS CRÓNICA

---

En este capítulo se presenta la segunda hipótesis, esto es, que durante la bronquitis crónica, el aumento en la viscosidad del moco causa que la frecuencia de resonancia del sistema cambie y que el mecanismo de la tos, que sigue actuando *a grosso modo* con la misma frecuencia, no favorece el movimiento del moco por no encontrarse a una frecuencia que maximice la permeabilidad dinámica y por ende minimice la resistencia a fluir.

Se calcula, con el modelo propuesto, el cambio que habría en el flujo del moco en condiciones de enfermedad y verificamos que efectivamente la frecuencia de resonancia aumenta, lo que hace que el flujo de moco a la frecuencia de la tos disminuya. Finalmente se hace una propuesta de cómo podría aumentarse el flujo de moco en personas con bronquitis crónica. La propuesta consiste en aplicar –por medio de alguna técnica que no es nuestra intención proponer– una frecuencia que corresponda a la frecuencia de resonancia del sistema enfermo que sería la que maximizara la correspondiente permeabilidad dinámica y favoreciera el flujo de moco en condiciones de enfermedad.

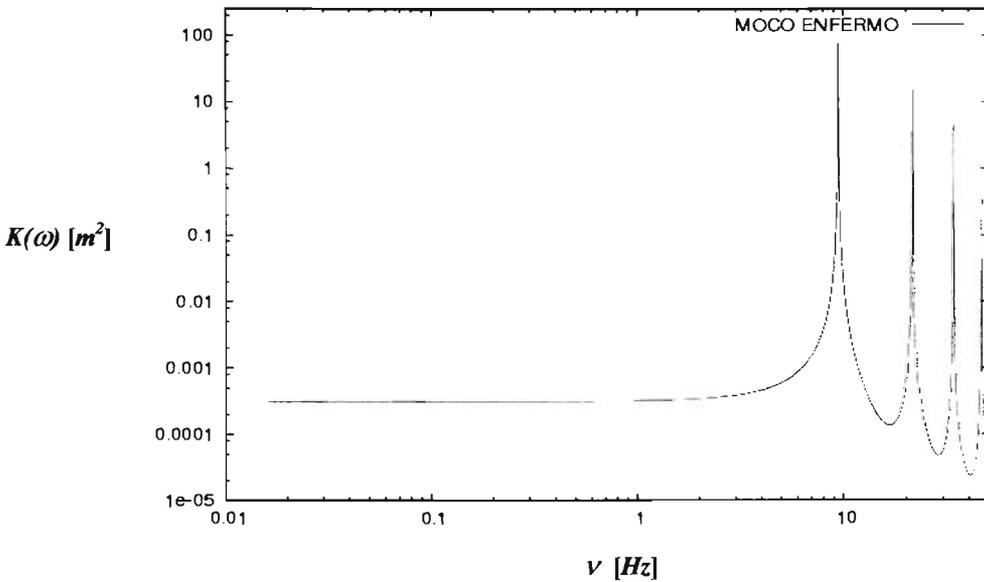
## **6.1 Frecuencia de Resonancia en la Bronquitis**

### **Crónica.**

Los valores de densidad y tiempo de relajación son los mismos en estado de salud y enfermedad, pero el valor de la viscosidad cambia [19,20]; de  $0.15$  (en condiciones normales) a  $1.6 \text{ Kg}/(m \text{ s})$  y el diámetro de los bronquios sigue siendo de  $1 \text{ mm}$ .

Debemos mencionar que una aproximación de nuestro modelo, es considerar que el bronquio está completamente lleno de fluido viscoelástico. Esto no ocurre en la realidad, ya que en los bronquios hay moco y aire. Sin embargo no es una mala aproximación en estado de enfermedad, ya que llegan a presentarse casos en los que el bronquio está saturado de moco.

Al hacer el cálculo de la permeabilidad dinámica utilizando la ecuación (4.24) y el nuevo valor de la viscosidad para el moco, se obtiene un nuevo valor de frecuencia de resonancia que es del orden de  $60.8 \text{ rad/s}$  ( $9.7 \text{ Hz}$ ). Esto se puede ver en la Fig. 12 donde nuevamente se observa que a esta frecuencia, la permeabilidad del fluido tiene el valor máximo.



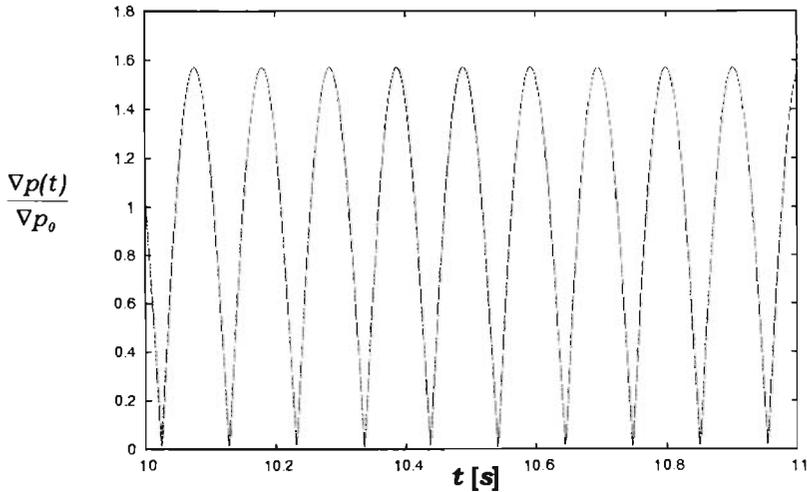
**Figura 12.**

Recordemos que la permeabilidad dinámica es una medida de la resistencia a fluir. Esto quiere decir que para la bronquitis crónica, la frecuencia de resonancia óptima para movilizar el moco es de  $9.7 Hz$ . Lo cual nos explica por qué el mecanismo de la tos –que sigue actuando a la frecuencia de resonancia del sistema sano- es ya insuficiente para expulsar las secreciones bronquiales de las vías respiratorias.

## **6.2 Señal de presión.**

Antes de calcular el flujo con esta nueva frecuencia de resonancia, se necesita establecer la señal de presión. Para esto se utiliza la ecuación

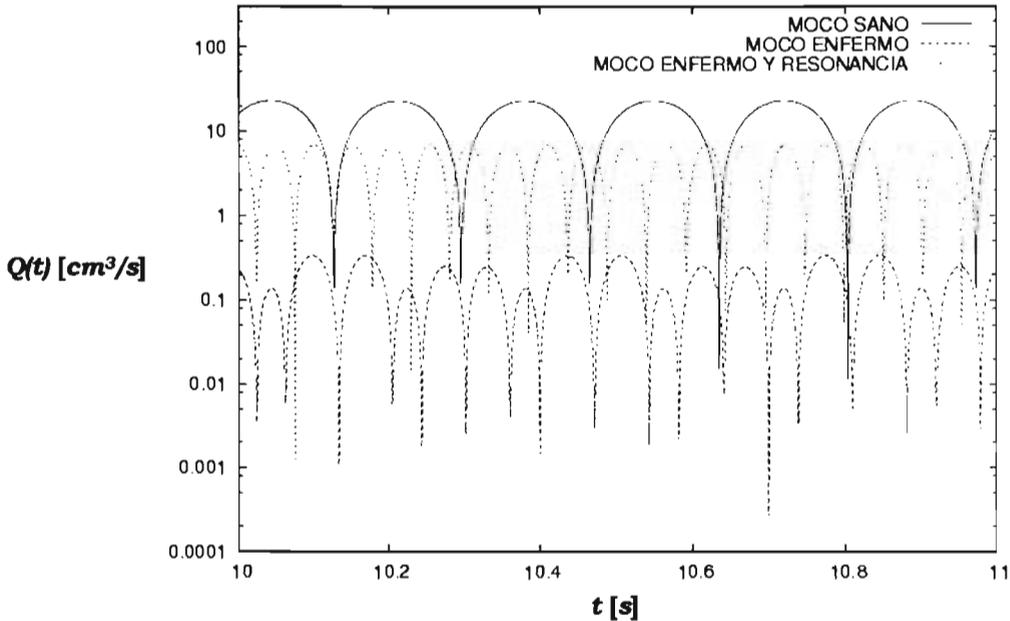
(5.2). En la siguiente gráfica (Fig. 13) se puede ver la señal de presión que habría que imponer al moco enfermo.



**Figura 13. Señal de Presión**

### **6.3 Cálculo del Flujo.**

Para poder evaluar la validez de nuestra hipótesis, se calculará el flujo del moco sano a la frecuencia de la tos (2.9 Hz), el flujo del moco enfermo a la frecuencia de la tos y el flujo del moco enfermo a la nueva frecuencia de resonancia (9.7 Hz). En la siguiente gráfica (Fig. 14) se han graficado los resultados obtenidos una vez realizado este cálculo.



**Figura 14.** Se ha graficado el flujo de moco sano a la frecuencia de la tos, el flujo de moco enfermo a la misma frecuencia de la tos, y el flujo de moco enfermo a la frecuencia de resonancia del sistema enfermo. Se puede observar que existe una recuperación del flujo de moco, al imponer una frecuencia diferente a la frecuencia de la tos.

En la gráfica se observa que el flujo de moco decae considerablemente del estado de salud al estado de enfermedad. En nuestro modelo esta disminución del flujo es del orden del 98.54%, lo cual es enorme y confirma que en el sistema enfermo la frecuencia de la tos no favorece el movimiento del moco. Sin embargo cuando se aplica la frecuencia de resonancia del sistema enfermo, el flujo aumenta al 28.22% del valor en el estado de salud. Si bien la recuperación del flujo no es del 100%, este resultado es muy alentador, ya que los tratamientos existentes no logran

remover la acumulación excesiva de moco en las vías respiratorias, y nuestra propuesta (al menos en teoría) lograría una recuperación de más de la cuarta parte del flujo en estado de salud.

### **6.4 Impacto Médico de los Resultados.**

Hemos visto que la permeabilidad dinámica de un fluido viscoelástico tiene un valor máximo a una cierta frecuencia.

Para el sistema respiratorio en condiciones normales, el valor máximo de la permeabilidad dinámica se da a un valor de frecuencia de aproximadamente  $2.9 \text{ Hz}$  que corresponde a la frecuencia para que el moco fluya con la menor resistencia posible. Esta es aproximadamente la frecuencia de la tos. En condiciones de bronquitis crónica, el valor máximo de la permeabilidad dinámica, de acuerdo a nuestro modelo, se da a una frecuencia de  $9.7 \text{ Hz}$ . Esta sería la frecuencia necesaria para que el moco fluyera con la menor resistencia posible en condiciones de enfermedad. Sin embargo, el mecanismo de la tos ya no es capaz de movilizar el moco. Esto se debe a que la frecuencia de la tos, que permanece aproximadamente igual en el caso de enfermedad, está por debajo de la frecuencia necesaria para mover el moco.

Al calcular el flujo del moco cuando se tose en condiciones de salud, el flujo de moco cuando se tose en estado de enfermedad y el flujo de moco enfermo con un gradiente de presión a la frecuencia de resonancia; los resultados obtenidos (Fig. 10) nos muestran que la disminución del flujo

debida a la enfermedad puede recuperarse parcialmente imponiendo un gradiente de presión a la frecuencia adecuada.

Estos resultados, pueden establecer una base teórica para el desarrollo de una técnica que ayude a eliminar el exceso de moco acumulado en las vías respiratorias. Es decir, el desarrollo de un método que imponga una frecuencia de resonancia del orden de  $10 \text{ Hz}$  en el sistema respiratorio.

Evidentemente cada paciente debe recibir un tratamiento personalizado, ya que las características de la enfermedad son variables de paciente a paciente. Este trabajo, sienta una base teórica para determinar las características de la señal de presión, que se debería imponer en cada caso de acuerdo a las características del moco enfermo.

No es el objetivo de esta tesis proponer una cura para la bronquitis crónica, sino plantear una base teórica que permita explorar nuevos terrenos en la medicina, con el apoyo de la física de fluidos viscoelásticos, para contribuir al tratamiento de pacientes con bronquitis crónica.

---

---

## CONCLUSIONES

---

---

Al principio de esta tesis se plantearon dos hipótesis. La primera consistía en que la frecuencia de la tos de una persona sana, correspondía a la frecuencia de resonancia del moco sano, confinado a fluir en los bronquios terminales. Haciendo uso de la física de fluidos viscoelásticos, se comprobó que la hipótesis es cierta. Al hacer el cálculo se obtuvo que la frecuencia de resonancia del moco sano es de  $2.9 \text{ Hz}$  que corresponde aproximadamente a la frecuencia de la tos en una persona sana. Este resultado es el más importante de este trabajo, ya que nos explica porque tosemos a una cierta frecuencia y no a otra. Es decir, el mecanismo de la tos está adaptado para trabajar a una frecuencia capaz de movilizar las secreciones bronquiales con la menor resistencia posible.

La segunda hipótesis consistía en que durante la bronquitis crónica, el aumento en la viscosidad de moco segregado por el organismo ocasionaba que la frecuencia de resonancia de la tos ya no fuera suficiente para movilizar eficazmente las secreciones bronquiales de las vías respiratorias. Al hacer el cálculo encontramos que la frecuencia de resonancia necesaria para movilizar las secreciones bronquiales durante la

bronquitis crónica, es del orden de  $10\text{ Hz}$ . Este valor no corresponde a la frecuencia de la tos, y podemos explicarnos por qué el moco ya no fluye durante la bronquitis crónica y se acumula en los bronquios.

Nuestro objetivo, no es proponer una técnica que ayude a curar la bronquitis crónica. Sino establecer una base teórica que permita el desarrollo futuro de nuevos tratamientos que combatan dicha enfermedad.

La hidrodinámica de fluidos viscoelásticos y la medicina, tendrían que trabajar mano a mano, para encontrar un método que permitiera imponer una frecuencia de aproximadamente  $10\text{ Hz}$  en el sistema respiratorio de pacientes con bronquitis crónica.

Los resultados que hemos obtenido son alentadores y nos permiten vislumbrar un nuevo campo de aplicación de la física de fluidos viscoelásticos, cumpliendo así el propósito más noble de la ciencia: la aplicación práctica de los conocimientos para el beneficio de la humanidad.

---

---

## APÉNDICES

---

---

### ***8.1 Causas de la bronquitis crónica.***

Hay cuatro principales causas que provocan que una persona se enferme de bronquitis crónica.

1. Tabaquismo.

El humo del tabaco afecta al pulmón en varios niveles: bronquios, bronquiólos y parénquima pulmonar. El humo del tabaco es el responsable de que las células ciliadas sean destruidas y la alteración del mecanismo muco ciliar. Además de que las sustancias contenidas en el humo del tabaco son altamente irritantes para las vías respiratorias.

2. Contaminación.

La contaminación ambiental es importante debido a su potencial para desarrollar rápidamente una enfermedad crónica como la bronquitis, mas no por ser la iniciadora directa de la bronquitis. Al hablar de contaminación nos referimos a la contaminación ambiental debida al

humo de fábricas y automóviles, pero también a la contaminación del ambiente de trabajo. Por ejemplo, un minero trabaja en un ambiente contaminado por sustancias que irritan la mucosa de las vías respiratorias y que contribuyen al desarrollo de la bronquitis. También, las personas que viven en ciudades grandes y contaminadas como la ciudad de México, son susceptibles de enfermarse de bronquitis crónica.

### 3. Infección.

Las infecciones virales del aparato respiratorio no causan bronquitis crónica, pero sí aceleran de manera considerable el progreso de la enfermedad. De hecho, los pacientes que padecen bronquitis crónica son más susceptibles a contraer enfermedades respiratorias con síntomas mucho más severos que las personas que no padecen bronquitis crónica.

### 4. Factores genéticos.

Existe una proteína llamada *antitripsina alfa<sub>1</sub>* que se genera en el hígado y las personas que por factores genéticos no están generando esta proteína, son susceptibles a padecer de bronquitis crónica. Hasta el día de hoy, esto no se ha considerado como un factor dominante que contribuya al desarrollo de la bronquitis.

Toda la información en la literatura apunta a que el hábito de fumar y la forma de hacerlo, es la principal causa de esta enfermedad. La seriedad

de la enfermedad depende de la cantidad de tabaco que la persona consume y del tiempo que lleve con el hábito de fumar o del grado de exposición pasiva al humo del tabaco.

## **8.2 Síntomas.**

A continuación se presentan los síntomas que manifiestan las personas que padecen bronquitis crónica:

- Tos productiva (esputo) que en ocasiones puede tener rastros de sangre.
- Insuficiencia respiratoria que empeora con el esfuerzo o la actividad moderada. Los pacientes incluso llegan a sofocarse al realizar actividades sencillas como bañarse, vestirse o subir escaleras cortas.
- Infecciones respiratorias muy frecuentes y con síntomas más severos de lo normal.
- Ruidos de carácter musical producidos al respirar (sibilancias)
- Dificultad para respirar (disnea).
- Fatiga.
- Hinchazón de tobillos, pies y piernas de ambos lados.
- Dolores de cabeza.

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

---

- [1] Del Río J. A. y Whitaker S. López de Haro M. *Transport in Porous Media*, 25:167, 1996.
- [2] J. A. Del Río, M. López de Haro and S. Whitaker, *Enhancement in the dynamic response of a viscoelastic fluid flowing in a tube*, Phys. Rev. E 58, 6323 (1998); Phys. Rev. E 63 039901, 2001.
- [3] D. Tsiklauri and I. Beresnev, *Enhancement in the dynamic response of a viscoelastic fluid flowing through a longitudinally vibrating tube*, Phys. Rev. E 63, 046304, 2001.
- [4] S. Cuevas and J. A. Del Río, *Dynamic permability of electrically conducting fluids under magnetic fields in annular ducts*, Phys. Rev. E 64, 016313, 2001.
- [5] J. R. Castrejón-Pita, J. A. del Río, A. A. Castrejón-Pita and G. Huelsz *Experimental observation of dramatic differences in the dynamic response of Newtonian and Maxwellian fluids*, Phys. Rev. E 68, 046301 (2003).
- [6] E. Corvera Poiré and J.A. del Río; J. Phys.: Condensed Matter. 16, S2055 (2004).
- [7] Weinberg, S. E. *Neumología*, McGraw-Hill Interamericana, 2a edición, México 1994.
- [8] Jefferies, A. y Turley A. *Aparato Respiratorio*, Harcourt, Madrid 2000.
- [9] P. W. Scherer, *Mucus Transport by Cough*, CHEST, 80:6, December, 1981, Supplement.
- [10] W. D. Bennett, W. M. Foster, and W. F. Chapman, *Cough-enhanced mucus clearance in the normal lung*, J. Appl. Physiol. 69;1670-75. 1990
- [11] Rivero S. O. *Neumología*, Ed. Trillas, México 1995.
- [12] *El Manual Merck de Diagnóstico y Tratamiento*, Décima edición, Ed. Harcourt, 1999.

- [13] Martínez, S. R. *EPOC*, Gaceta de la Facultad de Medicina UNAM, 10 de Octubre de 2003.
- [14] Cosío Villegas, I. et. al. *Aparato Respiratorio, patología, clínica y terapéutica*, México 1984.
- [15] Yuichi Majima, et. al. *Effect of Biochemical Components on Rheologic Properties Of Nasal Mucus in Chronic Sinusitis*, Am J. Of Respiratory Care, 160(2):421-426, 1999.
- [16] R. S. Brodkey, *The Phenomena of Fluid Motions*, Addison-Wesley Publishing Company, 1967.
- [17] R. Collepardo Guevara, *Propuesta para aumentar el flujo sanguíneo en obstrucciones trombóticas y ateroscleróticas* (tesis de licenciatura). Asesor: Dra. Eugenia Corvera Poiré, Facultad de Química UNAM, México, 2004.
- [18] Ernst, M. Kieselmann, R., et all. *Sputum Rheology Changes in Cystic Fibrosis Lung Disease Following Two Different Types of Physiotherapy*, American College of Physicians CHEST, 114, 1, July 1998.
- [19] Ross, S. M. and Corrsin S. *Results of an analytical model of mucociliary pumping*, Journal Of Applied Physiology, 37(3):333-340, 1974.
- [20] Langlands, J. *The dynamics of cough in health and in chronic bronchitis*, Thorax, 22, 88-96, 1967.
- [21] M. Y. Zhou and P. Sheng, Phys. Rev. B 39, 12027, 1989.
- [22] Peadar G. Noone, et. al. American Journal Of Respiratory Care, 160(1):144-149, 1999.
- [23] Cortran R. S., Kumar V., Collins T. R., *Patología Estructural y Funcional*, McGraw-Hill Interamericana, 6ª edición, España 1999.
- [24] Landau L. D. y Lifshitz E. M. *Fluid Mechanics*, Pergamon, Reino Unido, 2 edition, 1987.
- [25] Currie, I. G. *Fundamental Mechanics of Fluids*, McGraw-Hill, EUA, 2a edición, 1993.
- [27] Arfken G. B. and Weber H. J. *Mathematical Methods for Physicists*, Academic Press, Fifth edition, USA 1995.