

## **CAPÍTULO II:**

### **GENERALIDADES MÉDICAS Y FÍSICAS DEL SISTEMA RESPIRATORIO**

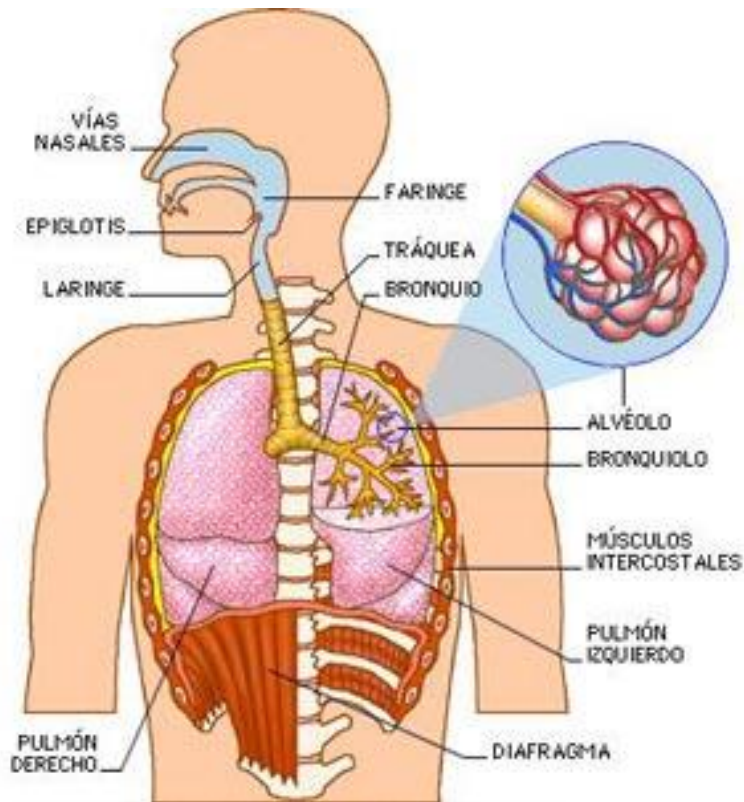
En este capítulo se presentan los conceptos médicos básicos y las leyes físicas que rigen en el funcionamiento del sistema respiratorio, conocimientos indispensables para comprender qué es lo que se desea y se requiere para la realización de este proyecto.

#### **2. 1 CONCEPTOS MÉDICOS Y FISIOLÓGICOS**

El control de la respiración ocurre en diferentes partes del cuerpo, tanto en la estructura pulmonar como en la cerebral, por lo que, además de ser un proceso orgánico vital, se caracteriza por ser un funcionamiento complejo. La regulación respiratoria es un criterio esencial para medir la fortaleza física, pues ocurre para el intercambio adecuado de gases (transporte de oxígeno del exterior hasta la sangre, y de dióxido de carbono en sentido opuesto), control del ritmo respiratorio, protección y liberación de sustancias tóxicas, colaboración junto con el riñón en la regulación del pH, termorregulación y contribución en la homeostasis, entre otras.

El control respiratorio en la estructura pulmonar inicia cuando el aire entra al sistema a través de la nariz o la boca. El aire que entra por la nariz es filtrado, calentado a la temperatura corporal y humedecido mientras recorre la nariz y los cornetes nasales, para proteger a los alvéolos (saco terminal del aparato respiratorio en el que se realiza el intercambio de gases entre la sangre y el aire respirado). El aire inspirado entra en las vías aéreas a través de la laringe, ingresando después al árbol traqueo-bronquial. A partir de la tráquea, el aire puede ser conducido a través de 10 o hasta 23 ramificaciones durante su tránsito

hacia los alvéolos. En los alvéolos, el aire se pone en contacto directo con la sangre venosa de los capilares pulmonares.



*Figura 6. Elementos básicos del Sistema Respiratorio Humano*

### **2. 1. 1 ORGANIZACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL**

El sistema respiratorio realiza la función de intercambio de gases con la sangre. Aporta oxígeno desde los alvéolos hasta la sangre, y elimina de la sangre hacia el exterior el dióxido de carbono procedente del metabolismo celular.

El sistema respiratorio se compone de:

- Una zona conductora que transporta el aire hacia todos los alvéolos, compuesta por:

- ❖ Fosas nasales
  - ❖ Boca
  - ❖ Faringe
  - ❖ Laringe (con cuerdas vocales)
  - ❖ Tráquea
  - ❖ Bronquios
  - ❖ Bronquiolos
- Una zona donde se produce el intercambio de gases compuesta por:
    - ❖ Bronquios terminales
    - ❖ Alvéolos

La ventilación pulmonar se produce mediante la expansión y reducción de los alvéolos, durante la continua entrada y salida de aire desde el exterior al interior.

Las fosas nasales tienen una función muy importante, preparando el aire para que ingrese al interior de los alvéolos, permitiendo:

- Paso del aire a los alvéolos.
- Atemperar el aire a la temperatura corporal ( $\approx 37^{\circ}\text{C}$ ).
- Humedecer el aire.
- Filtrar el aire (limpiar y purificar).

En las fosas nasales se produce el mucus, y existen unos cilios encargados de purificar el aire, cuando entran en el organismo sustancias extrañas, éstas quedarán adheridas al mucus y a los cilios, los cuales actúan como una escoba, barriéndolas hacia el exterior.

## **2. 1. 2 MECÁNICA RESPIRATORIA**

Los pulmones son dos órganos elásticos y esponjosos situados dentro de la caja torácica, la cual es un armazón flexible formado por 12 pares de costillas, las cuales protegen tanto los pulmones como el corazón; el esternón y la columna vertebral. La base de esta caja torácica es una membrana muscular llamada diafragma.

El acto de la respiración se efectúa aumentando y disminuyendo la jaula torácica, los pulmones siguen a la jaula, adaptándose al espacio que tienen. Además hay que considerar para estos desplazamientos que, los pulmones están rodeados por unas membranas lubricadas llamadas pleuras (visceral, pegada a los pulmones; y parietal, pegada a la jaula). Entre ambas tenemos el espacio intrapleural y un líquido que rellena el espacio encargado de que el movimiento entre ambos sea suave. [1]

### **2. 1. 2. 1 Músculos de la respiración**

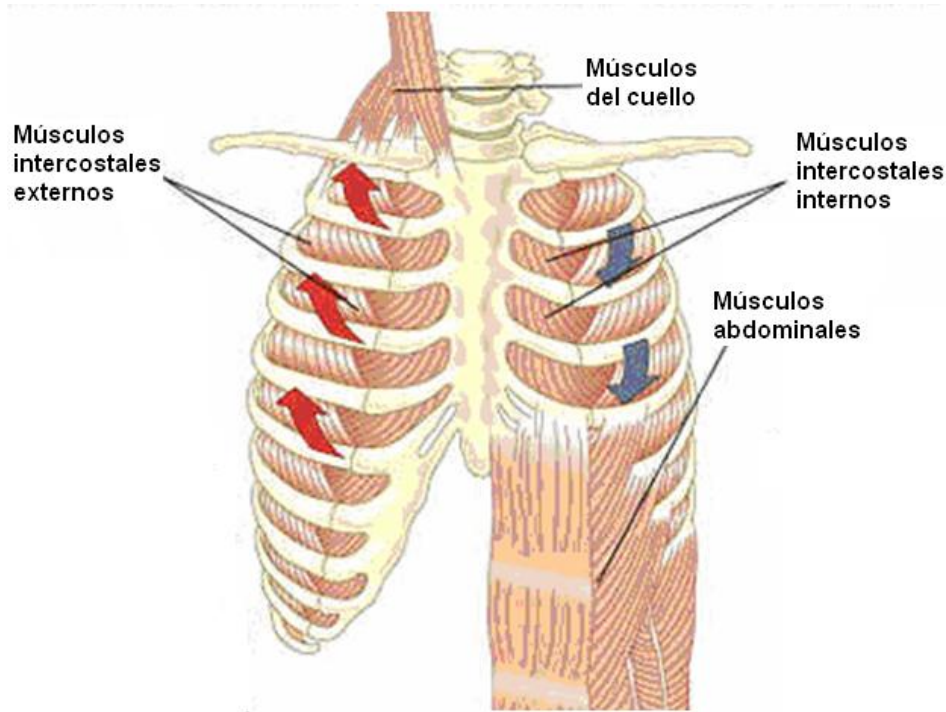
La entrada y salida de aire en los pulmones es generada por diferencias en la presión del interior y exterior del cuerpo. El músculo protagonista de este proceso es el diafragma, en conjunto con otros músculos del organismo.

#### **Músculos inspiratorios.**

El músculo inspiratorio más importante es el diafragma, pero se tienen también otros que intervienen en el proceso de inspiración, como lo son los músculos intercostales y los músculos del cuello.

Cuando los músculos inspiratorios se contraen, el tamaño de la jaula aumenta en sentido longitudinal (arriba-abajo) contrayendo el diafragma.

Cuando actúan los músculos intercostales externos y los del cuello, se elevan las costillas hacia arriba, aumentando el diámetro antero-posterior de la jaula.



*Figura 7. Músculos que intervienen en el proceso respiratorio*

### **Músculos espiratorios.**

Se activan cuando hay una respiración forzada, como por ejemplo en situaciones de ejercicio, fiebre, etc. Los músculos espiratorios son: los músculos abdominales, los cuales, si se contraen, desplazan hacia arriba el diafragma y reducen el diámetro longitudinal del tórax; y los músculos intercostales internos, situados entre las costillas, los cuales cuando se contraen bajan aún más las costillas, reduciendo el diámetro antero-posterior (reducen más la caja torácica). Con la actuación de estos músculos disminuye mucho más el volumen de la caja torácica.

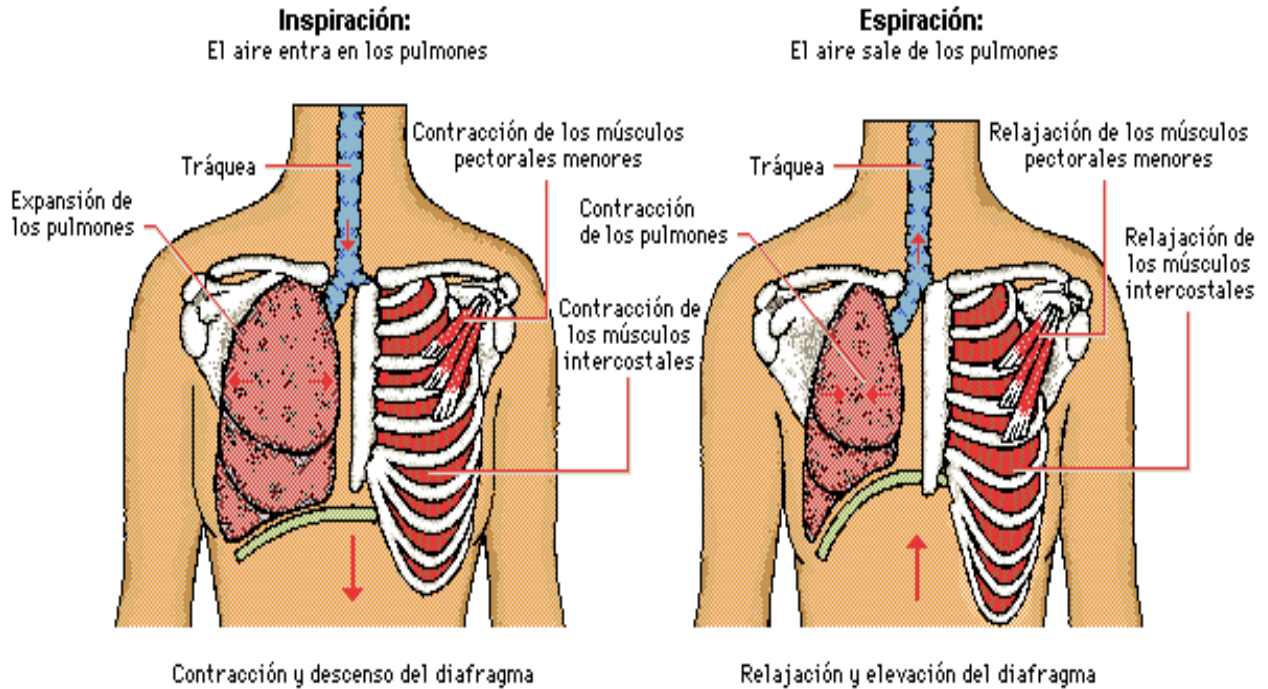


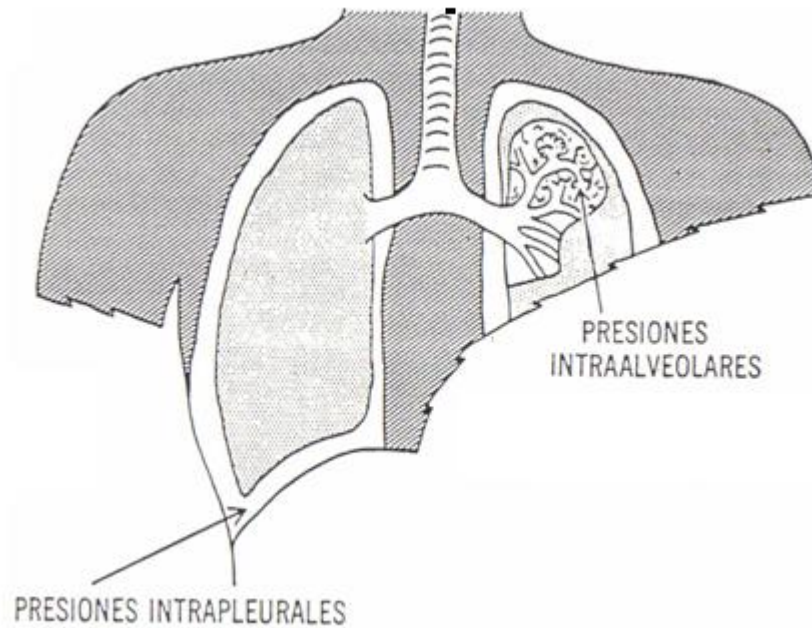
Figura 8. Mecánica respiratoria (inspiración y espiración)

### 2. 1. 2. 2 Presiones intraalveolares e intrapleurales

La Ley de Boyle establece que "a temperatura constante, cuando el volumen de un gas aumenta, su presión disminuye". Esto es lo que sucede con la presión a nivel del alvéolo. Dentro de los alvéolos, en situaciones de inspiración basal, los alvéolos aumentan de volumen por lo que la presión disminuye.

#### Presión intraalveolar.

Durante la inspiración traqueal normal, la presión dentro de los alvéolos es de -3 mmHg respecto a la atmosférica, y actuará como un aspirador de aire, hacia el alvéolo. Durante la espiración la presión será de +3 mmHg respecto a la atmosférica, y el aire saldrá hacia el exterior. La finalidad de contraer los músculos y relajarlos, es generar diferentes presiones para que el aire entre y salga de los pulmones.



*Figura 9. Localización de las presiones intraalveolares e intrapleurales*

### **Presión intrapleural.**

- Espacio intrapleural durante la inspiración = -8 [mmHg]
- Espacio intrapleural durante la espiración = -2 [mmHg]
- Al final de la espiración = -4 [mmHg]
- Al final de la inspiración = -6 [mmHg]
- Presión media = -5 [mmHg]

La presión intrapleural siempre será negativa porque el pulmón posee fibras elásticas, las cuales tienden a colapsar el pulmón, además, los alveolos están recubiertos de un líquido que hace que los pulmones tengan tendencia a cerrar sus alveolos



### 2. 1. 3 VOLÚMENES Y CAPACIDADES PULMONARES

El volumen de gas en los pulmones depende en cualquier momento de la mecánica de éstos. El volumen pulmonar puede alterarse por procesos patológicos y fisiológicos.

En general los volúmenes pulmonares se expresan en función de la temperatura corporal y la presión ambiental. La figura 10 muestra los diversos volúmenes y capacidades pulmonares que se miden comúnmente en las pruebas de función pulmonar.

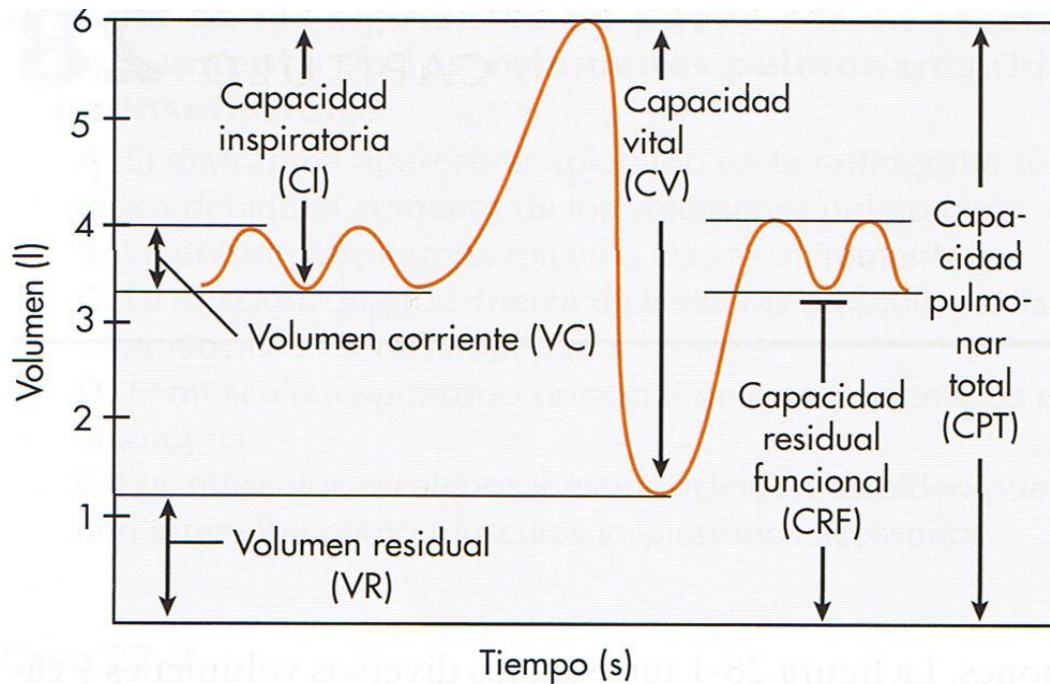


Figura 10. Espirograma del ciclo respiratorio con volúmenes y capacidades pulmonares estándar [2]

#### Volumen Corriente (VC).

Se denomina volumen corriente o volumen tidal al volumen de aire movilizado en cada respiración normal y tranquila. Su valor es de aproximadamente 500 ml.



**Volumen Residual (VR)**

El volumen residual es el volumen de aire que permanece en el pulmón después de una espiración máxima. El aumento de éste valor indica atrapamiento aéreo, y su ausencia provocaría que los pulmones se colapsaran. En condiciones normales su valor es de 1.2 litros y equivale aproximadamente al 20% de la Capacidad Pulmonar Total.

**Capacidad Pulmonar Total (CPT)**

Es la máxima cantidad de aire que albergan los pulmones después de una inspiración forzada; su valor es de aproximadamente 6 litros.

**Capacidad Vital (CV)**

Se denomina Capacidad vital al volumen de aire total capaz de ser movilizado por los pulmones. Su valor es de aproximadamente 4.8 litros y equivale alrededor del 80% de la Capacidad Pulmonar Total.

Durante el envejecimiento, es normal que haya un descenso de la capacidad vital. Es una medida de la capacidad que tiene una persona para inspirar y para espirar; informa acerca de:

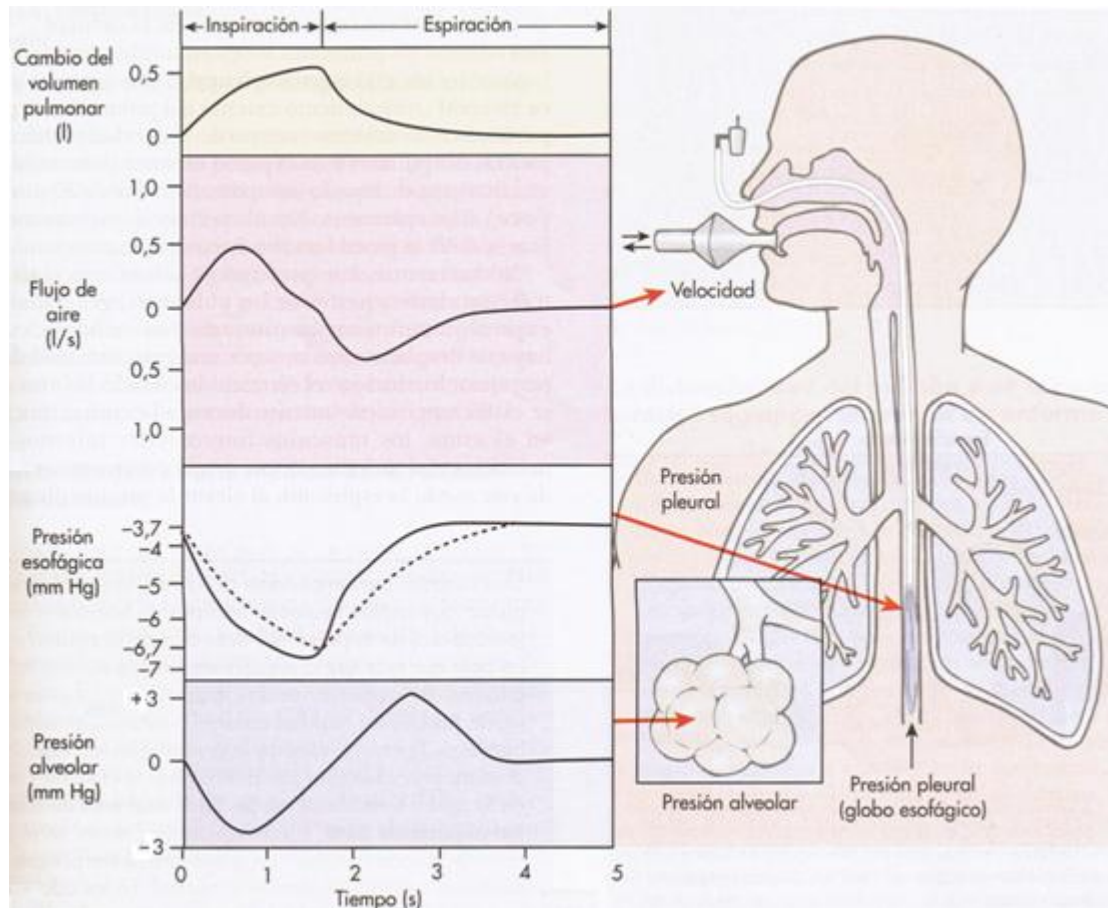
- La fuerza y funcionamiento de los músculos respiratorios
- Proporciona una idea de cómo está la elasticidad del pulmón y la elasticidad de la caja torácica

**Capacidad Inspiratoria (CI)**

Corresponde al máximo volumen que puede inhalarse después de una espiración normal. Su valor es de aproximadamente 3.6 litros y equivale a cerca del 60% de la Capacidad Pulmonar Total.

### Capacidad Residual Funcional (CRF)

La Capacidad residual funcional es la cantidad de aire que permanece en los pulmones después de una espiración normal. Su valor ronda normalmente entre 2 y 2.4 litros.



*Figura 11. Dinámica de una respiración corriente normal donde se muestran las relaciones entre los cambios en el volumen pulmonar, el flujo de aire, la presión pleural (esofágica) y la presión alveolar [15].*

#### 2. 1. 4 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO VENTILATORIO

Para evaluar la eficiencia y la posible detección de disfunciones respiratorias, se necesita de exámenes clínicos que permiten evaluar prácticamente el estado del paciente. La Prueba Funcional Ventilatoria (PFV) es una práctica que permite:

- Cuantificar la capacidad pulmonar o, en su defecto, las deficiencias respiratorias del paciente.
- Diagnosticar diferentes tipos de enfermedades respiratorias.
- Evaluar la respuesta del paciente a las terapias por trastornos ya determinados.
- Diagnóstico preoperatorio para determinar cuando la presencia de una enfermedad respiratoria incrementa el riesgo de cirugía.

Las técnicas de PFV comúnmente usadas son la Espirometría y la Pletismografía. En el siguiente capítulo se hablará de la técnica de Espirometría, la metodología que sigue, la información que proporciona, así como los distintos tipos de espirómetros que existen.

Aunque estas pruebas pueden proporcionar información importante sobre la condición física de un paciente, poseen importantes limitaciones como son:

- No se puede determinar que porción de los pulmones están dañados o enfermos, sólo se determina la presencia del padecimiento.
- Existe una total dependencia de la cooperación del paciente, lo que excluye a pacientes con enfermedades críticas.

Para una correcta y completa evaluación se recurre a procedimientos complementarios como el examen físico, evaluación del historia médico, pruebas de rayos X, entre otros.

## **2. 2 LEYES FÍSICAS Y EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA RESPIRATORIO**

El aire, al igual que otros fluidos, se mueve de una región de mayor presión a otra de menor presión. El intercambio de gases en el organismo es posible debido a la

diferencia de presión existente entre el interior del pulmón y la atmósfera. En condiciones normales, la inspiración ocurre cuando la presión alveolar cae por debajo de la presión atmosférica (0 cmH<sub>2</sub>O), permitiendo así, la entrada de aire a los pulmones; por otro lado, la espiración sucede cuando la presión alveolar supera a la presión atmosférica, y así el aire sale del interior de los pulmones a la atmósfera. Este constante movimiento de aire ocasionado por el proceso respiratorio se conoce como flujo aéreo y puede presentarse en dos formas: flujo laminar o flujo turbulento.

### **2. 2. 1 FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO**

Cuando un flujo es laminar, las partículas del fluido se desplazan siguiendo trayectorias paralelas, formando así un conjunto de capas o láminas adyacentes, sin que exista una mezcla significativa de partículas vecinas. La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante, y su acción amortigua la tendencia del flujo a ser turbulento. El estudio del flujo laminar es descrito por la Ley de Poiseuille.

Un flujo es turbulento cuando las partículas del fluido no permanecen en capas, sino que se mueven de forma heterogénea a través del flujo, chocando contra otras partículas, produciendo que el flujo esté en constante mezcla. La medición del nivel de turbulencia que presenta un flujo es descrita por el número de Reynolds

La razón por la que un flujo puede ser laminar o turbulento tiene que ver con lo que pasa a partir de una pequeña alteración en dicho flujo o por una perturbación de los componentes de velocidad. Dicha alteración puede aumentar o disminuir. Cuando la perturbación en un flujo laminar aumenta, éste puede cambiar a turbulento, y si dicha perturbación disminuye, el flujo continua siendo laminar.  
[14]

Durante la respiración, el flujo de tipo laminar ocurre solamente dentro de las vías más pequeñas, donde la velocidad lineal del flujo aéreo es muy baja. El flujo turbulento en la respiración es ocasionado por flujos inspiratorios – espiratorios altos y rápidamente variables, vías aéreas grandes, cambios bruscos en el diámetro de los pulmones y vías respiratorias, y ángulos existentes dentro del sistema respiratorio.

### 2. 2. 2 NÚMERO DE REYNOLDS

Los diferentes regímenes de flujo y la asignación de valores numéricos de cada uno fueron reportados por primera vez por Osborne Reynolds en 1883. Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un fluido que fluye dentro de una tubería depende de la velocidad del fluido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del fluido como la viscosidad y la densidad.

Así, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye, y está dado por la siguiente expresión:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (1)$$

Donde:  $Re$  = Número de Reynolds

$D$  = Diámetro del Ducto en  $[m]$

$v$  = Velocidad promedio del líquido en  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$\rho$  = Densidad del líquido en  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$\mu$  = Viscosidad del líquido en  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

Generalmente cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2100 se sabe que el flujo es laminar, el intervalo entre 2100 y 4000 se considera como flujo de transición y para valores mayores de 4000 se considera como flujo turbulento.

### 2. 2. 3 LEY DE POISEUILLE

Como se mencionó al principio del tema 2.2, para que el flujo aéreo se produzca, debe presentarse una diferencia de presión entre la atmósfera y el interior del pulmón. Por lo tanto, debe existir una relación entre dichos fenómenos, es decir, entre la diferencia de presiones y el flujo generado.

La Ley de Poiseuille es la ley que permite determinar la relación que existe entre el flujo de un fluido  $F$ , incompresible, de viscosidad  $\eta$ , que pasa a través de un tubo de radio  $r$  y longitud  $l$ , entre cuyos extremos se establece una diferencia de presiones  $\Delta P$ , siempre y cuando dicho flujo sea de carácter laminar.

Matemáticamente la Ley de Poiseuille se expresa de la siguiente manera:

$$F = \frac{\pi r^4}{8 \mu l} \Delta P \quad (2)$$

Donde:  $F$ : Flujo del gas en  $\left[ \frac{L}{s} \right]$

$r$ : radio del tubo en  $[m]$

$l$ : largo del tubo  $[m]$

$\mu$ : viscosidad del fluido en  $\left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$

$\Delta P$ : diferencia de presión entre los extremos del tubo en  $[Pa]$

Estas leyes y principios físicos son aplicables para describir tanto el flujo aéreo pulmonar, como el flujo corriente dentro del espirómetro. Por lo tanto, el

conocimiento de estos conceptos de mecánica de fluidos serán indispensables para entender el funcionamiento del espirómetro de flujo, y en particular, del transductor de flujo que se empleará para sensar dicho parámetro. En el capítulo IV se utilizarán las ecuaciones aquí expuestas para explicar el funcionamiento del transductor de flujo o *neumotacógrafo*.