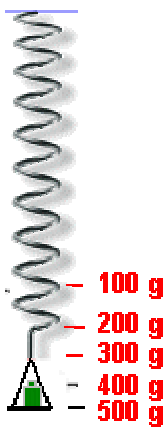


## Dinamómetro

Un dinamómetro es cualquiera de los diferentes instrumentos de laboratorio empleados para medir la fuerza. Un dinamómetro básicamente no es otra cosa que un resorte graduado, del cual se cuelga el objeto que se desea pesar.

## COMO HACER UN DINAMÓMETRO

Fabrica un dinamómetro clavando un clavo en una tabla y colgando de él un resorte.

	<p>Para calibrarlo cuelga masas conocidas de la parte inferior del resorte y se marca sobre la tabla los puntos hasta donde cada masa estira el resorte.</p> <p>Una vez hecho, si cuelgas una masa desconocida puedes hallar su valor comprobando únicamente hasta donde es capaz de estirar el resorte.</p> <p>¿Tienes claro que un dinamómetro mide pesos?</p> <p>Un dinamómetro mide la fuerza con que la tierra tira de una masa, es decir, su peso.</p> <p><b>¡ Pero a cada peso la corresponde una masa !</b></p>
--	---

## Cómo hacerse millonario comprando oro en el Ecuador y vendiéndolo en el Polo

Seguro oíste hablar de que las cosas en la Luna pesan menos que en la Tierra. Esto es la purísima verdad, y se debe a que la Luna es más chica que la Tierra y tiene una atracción gravitatoria menor sobre los cuerpos.

Lo que es menos sabido es que la gravedad de la Tierra no es igual en todas las partes de la Tierra. O sea que las cosas pesan más cuanto más cerca de los Polos y más lejos del Ecuador estemos.

El oro se vende por peso. Entonces, ¿no sería un extraordinario negocio comprar una cantidad de oro en la Luna y después venderlo en la Tierra? ¡Al traerlo a nuestro Planeta el peso aumentaría varias veces y por lo tanto sería más caro!

Un negocio no tan espectacular pero basado en la misma idea consiste en comprar oro en Ecuador o Kenya o Ghana (donde es más liviano) y venderlo en, digamos, Ushuaia, Oslo, Vladivostok (donde es más pesado).

### **¿Dinamómetro o balanza?**

Pero, ¿cuál sistema de pesado hay que usar?

Para hacerte millonario con la triquiñuela del oro, no te aconsejamos usar una balanza. ¿Por qué?

Digamos que pesamos en el Ecuador equilibrando en nuestra balanza un pedazo de oro con una pesa de 500 gramos.

Ahora viajamos al Polo: el oro pesa más, pero la pesa también y siguen estando equilibradas, así que la balanza sigue marcando 500 gramos.

En cambio, si usamos el dinamómetro, el peso del oro va a cambiar al acercarnos al Polo, pero cuánto se estira el resorte no, porque el estiramiento del resorte no depende de en qué parte de la Tierra nos encontremos. O sea, que el dinamómetro va a decir que el peso del oro es mayor en el Polo que en el Ecuador. Con un dinamómetro sí podemos ver las diferencias.

Fíjense que si llevamos una balanza y un dinamómetro a la Luna, de acuerdo al dinamómetro seremos considerablemente más livianos, pero de acuerdo a la balanza... ¡seguimos pesando exactamente lo mismo, aun cuando es obvio que no!

## Medida de la presión. Manómetro

Para medir la presión empleamos un dispositivo denominado manómetro.

### Presión Absoluta

Es la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular es muy pequeña.

### Presión Atmosférica

El hecho de estar rodeados por una masa gaseosa (aire), y al tener este aire un peso actuando sobre la tierra, quiere decir que estamos sometidos a una presión (atmosférica), la presión ejercida por la atmósfera de la tierra, tal como se mide normalmente por medio del barómetro (presión barométrica). Al nivel del mar o a las alturas próximas a este, el valor de la presión es cercano a 1.0135bar, disminuyendo estos valores con la altitud.

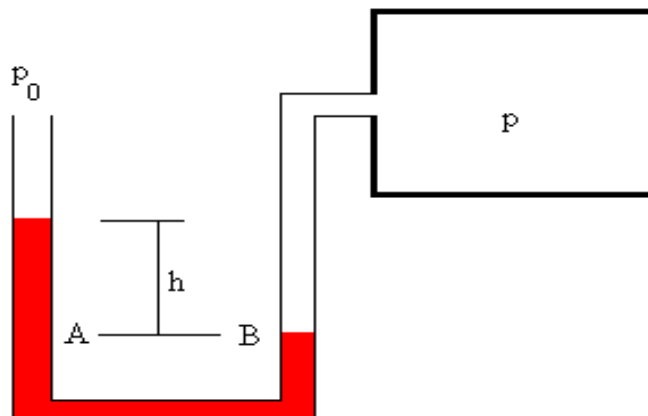
### Presión Manométrica

Son normalmente las presiones superiores a la atmosférica, que se mide por medio de un elemento que se define la diferencia entre la presión que es desconocida y la presión atmosférica que existe, si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña mientras que en las mediciones de presiones superiores, dicha diferencia es insignificante, es evidente que el valor absoluto de la presión puede abstenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

### Vacío

Se refiere a presiones manométricas menores que la atmosférica, que normalmente se miden, mediante los mismos tipos de elementos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, es decir, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente. Los valores que corresponden al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto.

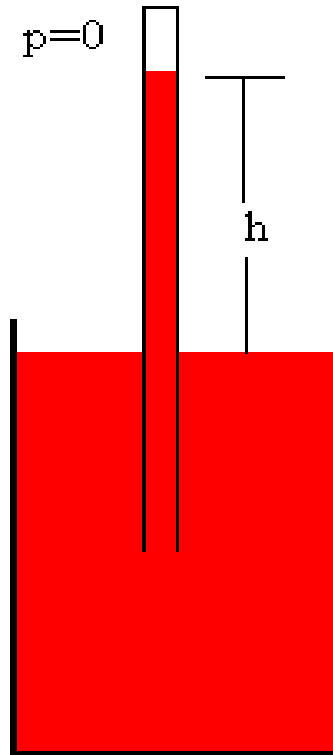
Para medir la presión empleamos un dispositivo denominado manómetro. Como A y B están a la misma altura la presión en A y en B debe ser la misma. Por una rama la presión en B es debida al gas encerrado en el recipiente. Por la otra rama la presión en A es debida a la presión atmosférica más la presión debida a la diferencia de alturas del líquido manométrico.  
 $p = p_0 + \rho gh$



### Experiencia de Torricelli

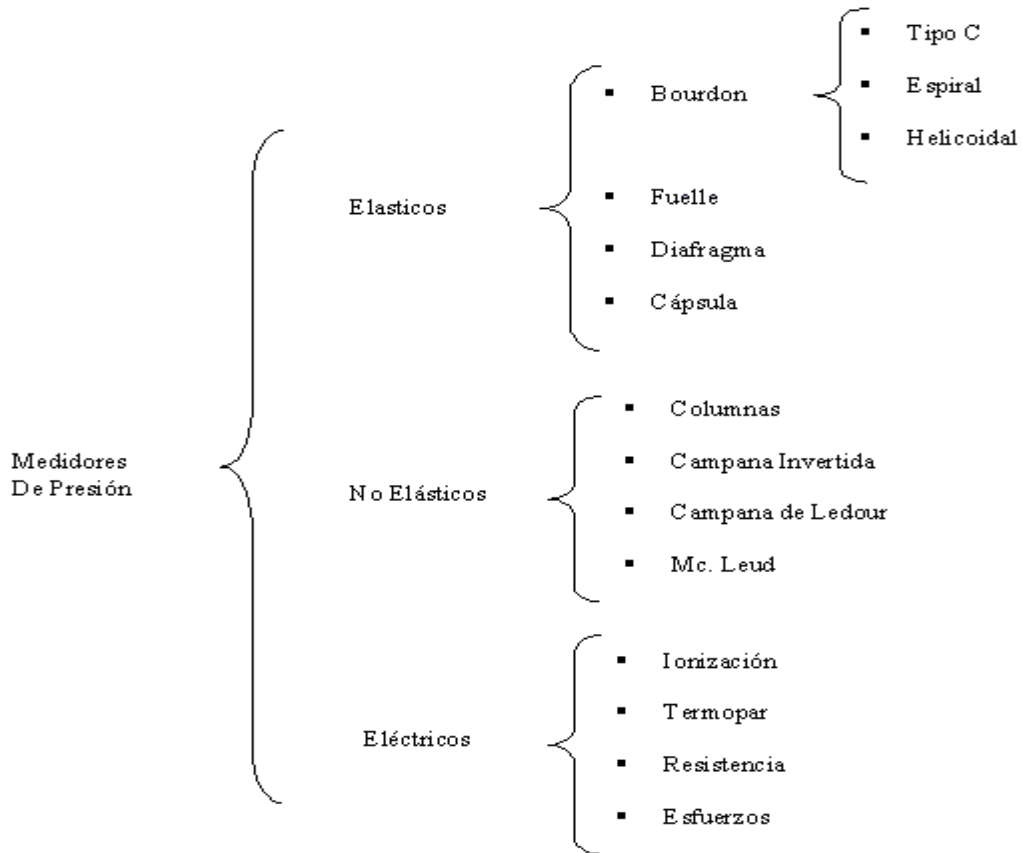
Para medir la presión atmosférica, Torricelli empleó un tubo largo cerrado por uno de sus extremos, lo llenó de mercurio y le dio la vuelta sobre una vasija de mercurio. El mercurio descendió hasta una altura  $h = 0.76$  m al nivel del mar. Dado que el extremo cerrado del tubo se encuentra casi al vacío  $p = 0$ , y sabiendo la densidad del mercurio es  $13.55 \text{ g/cm}^3$  ó  $13550 \text{ kg/m}^3$  podemos determinar el valor de la presión atmosférica.

$$p = \rho gh = 13550 \cdot 9.81 \cdot 0.76 = 101023 \text{ Pa} = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$



## Tipos de Medidores de Presión

Los instrumentos para medición de presión pueden ser indicadores, registradores, transmisores y controladores, y pueden clasificarse de acuerdo a lo siguiente:



Tipo de Manómetro	Rango de Operación
M. de Ionización	0.0001 a $1 \times 10^{-3}$ mmHg ABS
M. de Termopar	$1 \times 10^{-3}$ a 0.05 mmHg
M. de Resistencia	$1 \times 10^{-3}$ a 1 mmHg
M. Mc. Clau	$1 \times 10^{-4}$ a 10 mmHg
M. de Campana Invertida	0 a 7.6 mmH <sub>2</sub> O
M. de Fuelle Abierto	13 a 230 cmH <sub>2</sub> O
M. de Cápsula	2.5 a 250 mmH <sub>2</sub> O
M. de Campana de Mercurio	(LEDOUX) 0 a 5 mts H <sub>2</sub> O
M. "U"	0 a 2 Kg/cm <sup>2</sup>
M. de Fuelle Cerrado	0 a 3 Kg/cm <sup>2</sup>
M. de Espiral	0 a 300 Kg/cm <sup>2</sup>
M. de Bourdon tipo "C"	0 a 1,500 Kg/cm <sup>2</sup>
M. Medidor de esfuerzos (stren geigs)	7 a 3,500 Kg/cm <sup>2</sup>
M. Helicoidal	0 a 10,000 Kg/cm <sup>2</sup>

## MEDIDAS DE PRESION

### Unidades y clases de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) esta normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas que tuvieron lugar en Paris en octubre de 1967 y 1971, y según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la III Conferencia General de la Organización Internacional de Metrología Legal. El pascal es 1 newton por metro cuadrado (1 N/m<sup>2</sup>).

	Psi	Pulgada c. de agua	Pulgada c. de Hg	Atmósfera	kg/cm <sup>2</sup>	cm c. de a.	mm c. de Hg	Bar	Pa
Psi	1	27,68	2,036	0,0680	0,0703	70,31	51,72	0,0689	7142
Pulgada c. de a.	0,0361	1	0,0735	0,0024	0,0025	2,540	1,868	0,0024	256,4
Pulgada c. de Hg	0,4912	13,6	1	0,0334	0,0345	34,53	25,4	0,0333	3448
Atmósfera	14,7	406,79	29,92	1	1,033	1033	760	1,0131	1,01 × 10 <sup>5</sup>
kg/cm <sup>2</sup>	14,22	393,7	28,96	0,9678	1	1000	735,6	0,98	98100
cm c. de a.	0,0142	0,3937	0,0289	0,00096	0,0010	1	0,7355	0,0009	100
mm c. de Hg	0,0193	0,5353	0,0393	0,0013	0,0013	0,0013	1	0,00133	133
Bar	14,5	408	29,99	0,987	1,02	1024	750	1	10 <sup>5</sup>
Pa	0,00014	0,0039	0,00029	0,987 × 10 <sup>-5</sup>	0,102 × 10 <sup>-4</sup>	0,01	0,0075	10 <sup>-5</sup>	1

**Tabla 1** de unidades de presión

Como el pascal es una unidad muy pequeña, se emplean también el kilopascal (1 kPa = 10<sup>3</sup> Pa), el megapascal (1 MPa = 10<sup>6</sup> Pa) y el gigapascal (1 GPa = 10<sup>9</sup> Pa). En la industria se utiliza también el bar (1 bar = 10<sup>5</sup> Pa = 1,02 kg/cm. cuadrado) y el kg/CM<sup>2</sup>, Si bien esta última unidad, a pesar de su uso todavía muy extendido, se emplea cada vez con menos frecuencia.

En la **tabla 1**. figuran las equivalencias entre estas unidades.

Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos: **mecánicos, neumáticos, electromecánicos y electrónicos.**

### Elementos mecánicos

Se dividen en:

**Elementos primarios de medida directa** que miden la presión comparándola con la ejercida por un liquido de densidad y altura conocidas (barómetro de cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, manómetro de toro pendular, manómetro de campana), y .

**Elementos primarios elásticos** que se deforman por la presión interna del fluido que contienen.

Los elementos primarios elásticos mas empleados son: el tubo Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle.

**El tubo Bourdon** es un tubo de sección elástica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón. La ley de deformación del tubo Bourdon es bastante compleja y ha sido determinada empíricamente a través de numerosas observaciones y ensayos en varios tubos.

El material empleado normalmente en el tubo Bourdon es de acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales como hastelloy y monel.

**El elemento en espiral** se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal arrollando mas de una espira en forma de hélice. Estos elementos proporcionan un desplazamiento grande del extremo libre y por ello, son ideales para los registradores.

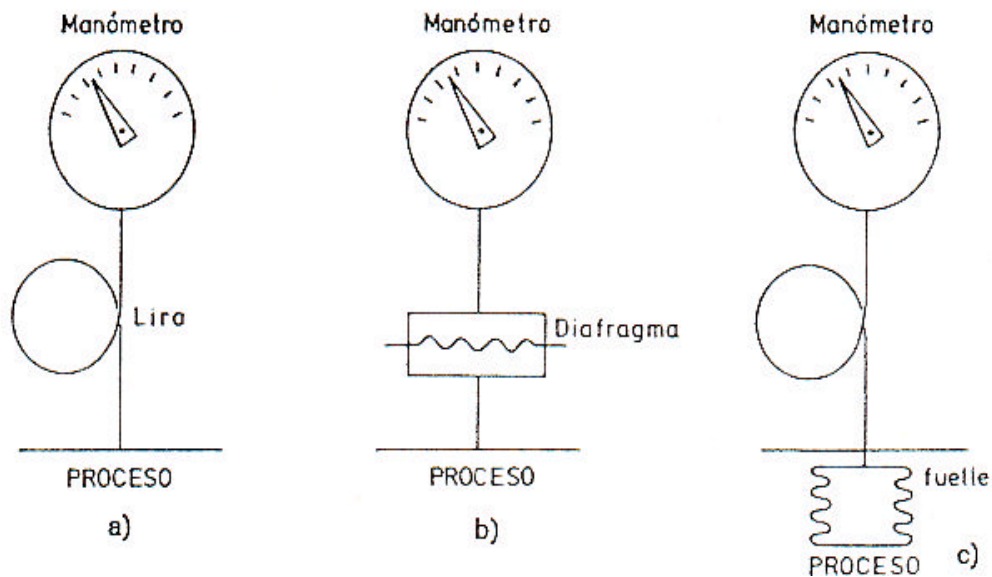
**El diafragma** consiste en una o varias capsulas circulares conectadas rigidamente entre si por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada capsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El sistema se proyecta de tal modo que, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relacion lineal en un intervalo de medida lo mas amplio posible con un minimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento.

El material del diafragma es normalmente aleacion de niquel o inconel. Se utiliza para pequeñas presiones.

**El fuelle** es parecido al diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable.

Hay que señalar que los elementos de fuelle se caracterizan por su larga duración, demostrada en ensayos en los que han soportado sin deformación alguna millones de ciclos de flexión. El material empleado para el fuelle es usualmente bronce fosforoso y el muelle es tratado térmicamente para mantener fija su constante de fuerza por unidad de compresión. Se emplean para pequeñas presiones.

**Los medidores de presión absoluta** consisten en un conjunto de fuelle y muelle opuesto a un fuelle sellado al vacio absoluto. El movimiento resultante de la unión de los dos fuelles equivale a la presión absoluta del fluido. El material empleado para los fuelles es latón o acero inoxidable. Se utilizan para la medida exacta y el control preciso de bajas presiones, a las que puedan afectar las variaciones en la presión atmosférica. Por ejemplo, en el caso de emplear un vacuometro para el mantenimiento de una presión absoluta de 50 mm de mercurio en una columna de destilación, el punto de consigna seria de 710 mm, con una presión atmosférica de 760 mm. Si la presión atmosférica cambiase a 775 mm el vacuometro indicaría:  $710 + 15 = 725$  mm con lo cual la presión absoluta en la columna sería controlada a  $50 + 15 = 65$  mm, es decir, a un 30 % más de la deseada.



**Tabla 2** elementos mecanicos

	Campo de medida	Precisión en % de toda la escala	Temperatura máxima de servicio	Presión estática máxima
Barómetro cubeta	0,1-3 m cda	0,5-1 %	Ambiente	6 bar
Tubo en U	0,2-1,2 m cda	0,5-1 %	↓	10 bar
Tubo inclinado	0,01-1,2 m cda			↓
Toro pendular	0,5-10 m cda		↓	Atmosférica
Manómetro campana	0,005-1 m cda		90° C	6000 bar
Tubo Bourdon	0,5-6000 bar		↓	2500 bar
Espiral	0,5-2500 bar			5000 bar
Helicoidal	0,5-5000 bar			2 bar
Diafragma	50 mm cda-2 bar			↓
Fuelle	100 mm cda-2 bar			Atmosférica
Presión absoluta	6-760 mm Hg abs	1 %	Ambiente	600 bar
Sello volumétrico	3-600 bar	0,5-1 %	400° C	

### Elementos Electromecánicos Electronicos

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, helice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

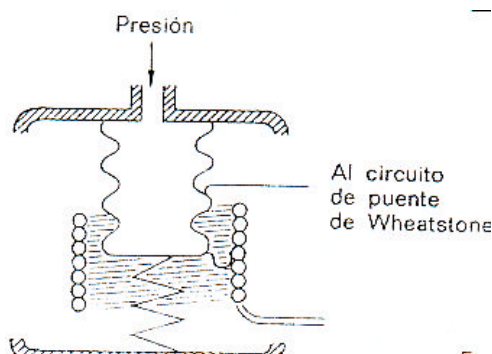
Los elementos electromecánicos de presión se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas:

Resistivos, Magnéticos, Capacitivos, Extensométricos, y Piezoeléctricos.

### Transductores resistivos

Constituyen, sin duda, uno de los transmisores eléctricos más sencillos. Consisten en un elemento elástico que varía la resistencia ohmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia. Existen varios tipos de potenciómetro según sea el elemento de resistencia: potenciómetros de grafito, de resistencia bobinada, de película metálica y de plástico moldeado. En la **figura 3.1** puede verse un transductor resistivo representativo que consta de un muelle de referencia, el elemento de presión y un potenciómetro de precisión. El muelle de referencia es el corazón del transductor ya que su desviación al comprimirse debe ser únicamente una función de la presión y además debe ser independiente de la temperatura, de la aceleración y de otros factores ambientes externos.



**Figura 3.1** Transductor resistivo



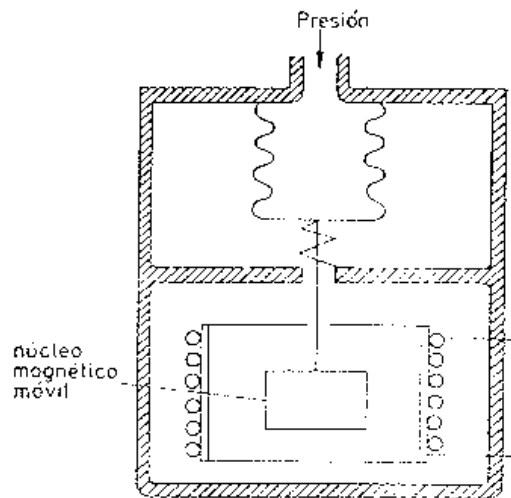
El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre el potenciómetro de precisión. Este está conectado a un ohmetro.

Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación. Sin embargo, son insensibles a pequeños movimientos del contacto del cursor, muy sensibles a vibraciones y presentan una estabilidad pobre en el tiempo.

El intervalo de medida de estos transmisores varía en general de 0-0,1 a 0-300 kg/cm<sup>2</sup>. La precisión es del orden de 1-2 %

### Transductores magnéticos

Se clasifican en dos grupos según el principio de funcionamiento. a) **Transductores de inductancia variable figura 3.2** en los que el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de esta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina.



**Figura 3.2** Transductor de inductancia variable.

El devanado de la bobina se alimenta con una corriente alterna y la f.e.m. de autoinducción generada se opone a la f.e.m. de alimentación, de tal modo que al ir penetrando el núcleo móvil dentro de la bobina la corriente presente en el circuito se va reduciendo por aumentar la f.e.m. de autoinducción.

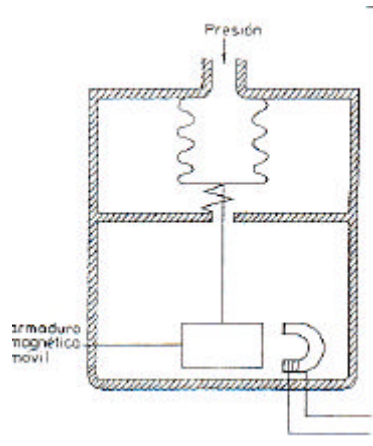
El transformador diferencial estudiado en los transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas es también un transductor de inductancia variable, si bien, en lugar de considerar una sola bobina con un núcleo móvil, se trata de tres bobinas en las que la bobina central o primaria es alimentada con una corriente alterna y el flujo magnético generado induce tensiones en las otras dos bobinas, con la particularidad de que si el núcleo está en el centro, las dos tensiones son iguales y opuestas y si se desplaza a la derecha o a la izquierda, las tensiones son distintas.

Es decir, que el transformador diferencial es más bien un aparato de relación de inductancias.

Los transductores de inductancia variable tienen las siguientes ventajas: no producen rozamiento en la medición, tienen una respuesta lineal, son pequeños y de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje. Su precisión del orden de  $\pm 1$  %.

b) **Los transductores de inductancia variable figura 3.3** consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético.

El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.



**Figura 3.3** Transductor de inductancia variable

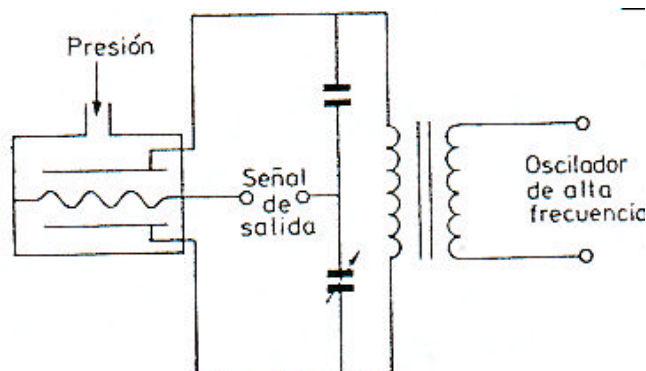
El movimiento de la armadura es pequeño (del orden de un grado como máximo en armaduras giratorias) sin contacto alguno con las partes fijas, por lo cual no existen rozamientos eliminándose la histéresis mecánica típica de otros instrumentos. Los transductores de reluctancia variable presentan una alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo y son sensibles a la temperatura. Su precisión es del orden de  $\pm 0,5\%$ .

Ambos tipos de transductores posicionan el núcleo o la armadura móviles con un elemento de presión (tubo Bourdon, espiral ...) y utilizan circuitos eléctricos bobinados de puente de inductancias de corriente alterna.

### Transductores capacitivos

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión **figura 3.4**. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos de puente de Wheatstone alimentados con corriente alterna.

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Son sensibles a las variaciones de temperatura y a las aceleraciones transversales y precisan de un ajuste de los circuitos oscilantes y de los puentes de c.a. a los que están acoplados.

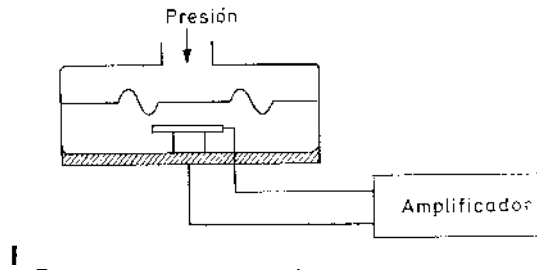


**Figura 3.4** Transductor capacitivo

Su intervalo de medida es relativamente amplio, entre 0,05-5 a 0,5-600 bar y su precisión es del orden de  $\pm 0,2$  a  $\pm 0,5\%$ .

### Transductores piezoeléctricos

Los elementos piezoeléctricos **figura 3.8** son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150° C en servicio continuo y de 230° C en servicio intermitente.



Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios en la temperatura y de experimentar deriva en el cero y precisar ajuste de impedancias en caso de fuerte choque. Asimismo, su señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición.

En el **tabla 3** pueden verse las características de los elementos electromecánicos descritos.

TABLA 3.3 Transductores electromecánicos

	Margen en bar	Alón en % de todo el escote	Estabilidad en el tiempo	Sobre-carga	Temper. max. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓
Magnéticos	↓	Inductancia variable	0,5	Media	150 %	0-5 V	2 kΩ	0,9-2,3 %	Continua	↓
		Reluctancia variable	1	Media	150 %	↓	0-5 V	2 kΩ	0,6-2,4 %	
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 kΩ	0,5-1,9 %	↓	Media
Galgas extenso-métricas	Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	Alta
	Sin cementar	0-0,01 a 0-500	1	Mala	200 %	↓	↓	350 Ω	↓	↓
	Silicio difundido	0-2 a 0-500	0,3	Muy buena	200 %	107	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓
Piezoeléctricos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 MΩ	1-4,8 %	1/5000	Baja

## Sustentación

### Concepto general

La fuerza del viento en el ala principal de un avión se puede pensar que esta dividida en dos partes: un componente que empuja el avión hacia arriba y un componente que empuja el avión para atrás. La fuerza ascendente, la fuerza de sustentación o elevación, es lo que mantiene el avión en el aire. La fuerza lateral que disminuye la velocidad del avión es lo que se llama resistencia aerodinámica. En realidad, el piloto puede cambiar la fuerza de sustentación: necesita mucha sustentación durante el despegue (para acelerar el avión hacia arriba), y menos sustentación durante el crucero (sólo se necesita superar el peso del avión).

Antes de empezar con la causas de sustentación, es una buena idea definir algunas partes del ala:

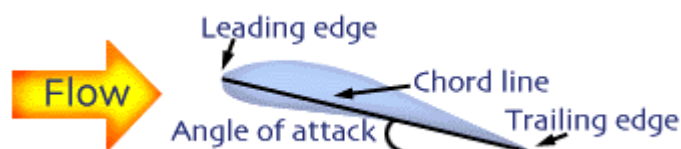
Definiciones:

*borde de ataque*: la parte del ala que ve primero al aire (mira hacia la dirección de movimiento)

*borde de salida*: el borde trasero de un ala

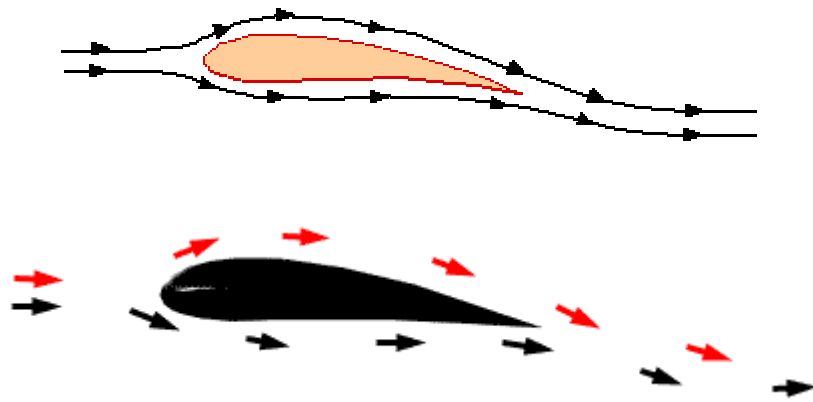
*línea de cuerda*: la línea uniendo el borde de ataque y el borde de salida

*ángulo de ataque*: el ángulo entre la línea de cuerda y el viento que viene de frente.

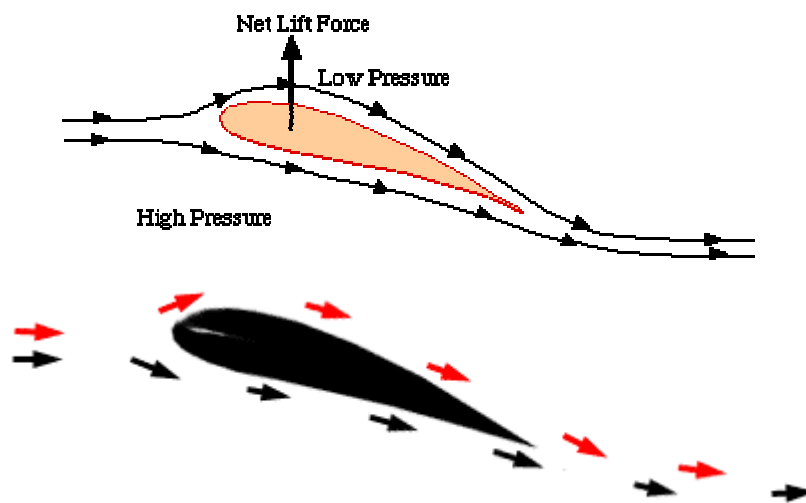


Definiciones del ala

Una *línea aerodinámica* de un flujo de fluido es como una foto instantánea del flujo. La velocidad del flujo siempre es tangente a la línea aerodinámica.



Líneas aerodinámicas alrededor de un perfil de ala

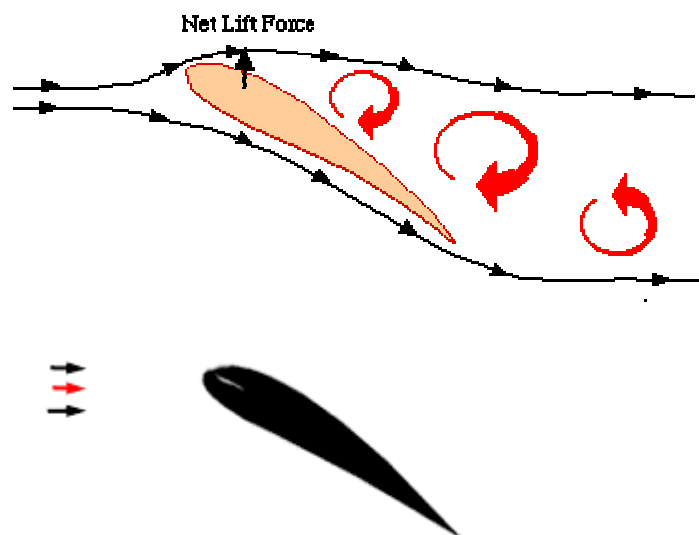


La diferencia de presión produce la fuerza neta de sustentación

### *Sustentación*

Cuando el aire fluye sobre la superficie superior del ala del avión, necesita tomar una forma curva. Para hacer esto, la presión del aire justo arriba del ala necesita estar a una presión ligeramente menor que el aire que está arriba, y el aire entonces es empujado a fluir alrededor de las alas. El aire en la superficie

superior del avión entonces está a una presión menor que el aire que está por debajo - y el avión es empujado hacia arriba - lo que nosotros llamamos sustentación. Cuando la curvatura sobre la parte superior del ala se hace más grande debido a la rotación de la nariz del avión hacia arriba, hay una presión diferencial más grande y por lo tanto una mayor fuerza de sustentación. Sin embargo, si la curvatura se hace demasiado grande, el flujo se separa del ala y termina con una pérdida de sustentación. Con esta pérdida, hay un cambio drástico en la curvatura (el flujo prácticamente no se curva para seguir al ala) y por lo tanto la sustentación es mucho menor. La pérdida de sustentación generalmente le causa al piloto perder un poco del control del avión hasta que disminuye el ángulo de ataque y recupera la mayor parte de la sustentación (todos los aviones tienen sirenas que suenan cuando las alas pierden la sustentación).



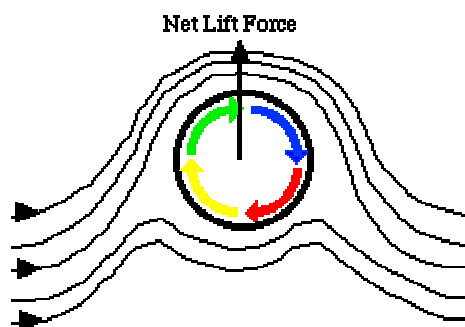
**Pérdida de sustentación: un ángulo de ataque demasiado alto reduce la sustentación (y la curvatura)**

*Circulación:*

Inicialmente, el flujo de aire debajo del ala trata de curvarse alrededor del borde de salida y alrededor de la superficie superior. La viscosidad (fricción) causa que el flujo comience a dejar el borde de salida de manera suave. La baja

presión en el centro de esta circulación cause que el aire sobre la superficie del ala se acelere y esto establece la manera que el aire pasa sobre la curva del ala. Otra circulación de igual fuerza está "pegada" al ala. El mismo efecto se puede observar al mover una cuchara en línea recta en una taza de té. Donde al principio no había ninguna circulación, se forman dos regiones de circulación en direcciones opuestas.

La sustentación puede ocurrir en otros objetos aparte de las alas. La sustentación es responsable por pelotas de que por el efecto recibido terminan en el bosque y lobs que por el efecto recibido caen en la cancha de tenis. Para ilustrar el efecto, imagine la pelota en la figura debajo moviéndose a la izquierda y al mismo tiempo girando en el sentido de las agujas del reloj. Por eso el efecto "back-spin" tiende hacia arriba. Y lo opuesto es verdad para el efecto "top-spin", el cual, por la sustentación negativa tiende a caer adentro de la cancha.



## Resistencia

La resistencia es la fuerza que impide o retarda el movimiento de un aeroplano. La resistencia actúa de forma paralela y en la misma dirección que el viento relativo, aunque también podríamos afirmar que la resistencia es paralela y de dirección opuesta a la trayectoria.



**Fig.1.3.12 - Dirección y sentido de la resistencia.**

Desde un punto de vista aerodinámico, cuando un ala se desplaza a través del aire hay dos tipos de resistencia: (a) resistencia debida a la fricción del aire sobre la superficie del ala, y (b) resistencia por la presión del propio aire oponiéndose al movimiento de un objeto en su seno.

La resistencia por fricción es proporcional a la viscosidad, que en el aire es muy baja, de manera que la mayoría de las veces esta resistencia es pequeña comparada con la producida por la presión, mientras que la resistencia debida a la presión depende de la densidad de la masa de aire.

Ambas resistencias crean una fuerza proporcional al área sobre la que actúan y al cuadrado de la velocidad. Una parte de la resistencia por presión que produce un ala depende de la cantidad de sustentación producida; a esta parte se le denomina resistencia inducida, denominándose resistencia parásita a la suma del resto de resistencias.

La fórmula de la resistencia (en inglés "drag") tiene la misma forma que la de la sustentación:  $D=CD*q*S$  donde **CD** es el coeficiente de resistencia o factor de forma, dependiente del tipo de perfil y del ángulo de ataque; **q** la presión aerodinámica ( $1/2\rho v^2$  siendo  $\rho$  la densidad y  $v$  la velocidad del viento relativo) y **S** la superficie alar.

La resistencia total del avión es pues la suma de dos tipos de resistencia: la resistencia inducida y la resistencia parásita.

**Resistencia inducida.** La resistencia inducida, indeseada pero inevitable, es un producto de la sustentación, y se incrementa en proporción directa al incremento del ángulo de ataque.

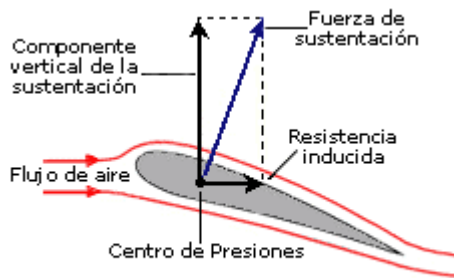


Al encontrarse en la parte posterior del ala la corriente de aire que fluye por arriba con la que fluye por debajo, la mayor velocidad de la primera deflecta hacia abajo a la segunda haciendo variar ligeramente el viento relativo, y este efecto crea una resistencia. Este efecto es más acusado en el extremo del ala, pues el aire que fluye por debajo encuentra una vía de escape hacia arriba donde hay menor presión, pero la mayor velocidad del aire fluyendo por arriba deflecta esa corriente hacia abajo produciéndose resistencia adicional. Este movimiento de remolino crea vórtices que absorben energía del avión.



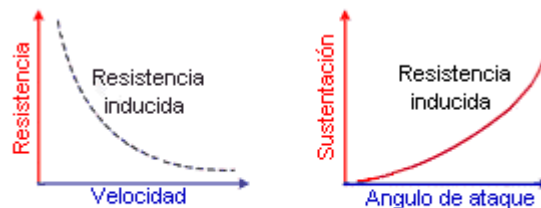
**Fig.1.3.13 - Deflexión del flujo de aire.**

Representadas de forma gráfica la sustentación y la resistencia, la fuerza aerodinámica se descompone en dos fuerzas: una aprovechable de sustentación y otra no deseada pero inevitable de resistencia (fig.1.3.14).



**Fig.1.3.14 - Resistencia inducida.**

De la explicación dada se deduce claramente que la **resistencia inducida aumenta a medida que aumenta el ángulo de ataque**. Pero si para mantener la misma sustentación ponemos más velocidad y menos ángulo de ataque, la resistencia inducida será menor, de lo cual deducimos que **la resistencia inducida disminuye con el aumento de velocidad**. La figura 1.3.15 nos muestra la relación entre la resistencia inducida, la velocidad, y el ángulo de ataque.



**Fig.1.3.15 - Variación de la resistencia inducida con la velocidad y el ángulo de ataque.**

En la resistencia inducida también tiene influencia la forma de las alas; un ala alargada y estrecha tiene menos resistencia inducida que un ala corta y ancha.

**Resistencia parásita.** Es la producida por las demás resistencias no relacionadas con la sustentación, como son: resistencia al avance de las partes del avión que sobresalen (fuselaje, tren de aterrizaje no retráctil, antenas de radio, etc.); entorpecimiento del flujo del aire en alas sucias por impacto de insectos o con formación de hielo; rozamiento o fricción superficial con el aire; interferencia del flujo de aire a lo largo del fuselaje con el flujo de las alas; el flujo de aire canalizado al compartimento del motor para refrigerarlo (que puede suponer en algunos aeroplanos cerca del 30% de la resistencia total); etc... También, la superficie total del ala y la forma de esta afecta a la resistencia parásita; un ala más alargada presenta mayor superficie al viento, y por ello mayor resistencia parásita, que un ala más corta. Lógicamente, cuanto mayor sea la velocidad mayor será el efecto de la resistencia parásita: **la resistencia parásita aumenta con la velocidad.**



**Fig.1.3.16 - Resistencia parásita vs. Velocidad.**

Si la resistencia inducida es un producto de la sustentación, y en la resistencia parásita tienen influencia la superficie alar y la forma del ala, es obvio que prácticamente todos los factores que afectan a la sustentación afectan en mayor o menor medida a la resistencia.

### **Control del piloto sobre la resistencia.**

La resistencia inducida depende del ángulo de ataque. Por lo tanto el piloto puede reducir la resistencia inducida si para lograr más sustentación incrementa la velocidad en vez de incrementar el ángulo de ataque. A mayor velocidad menor resistencia inducida.

El peso influye de forma indirecta en esta resistencia, puesto que a más peso más sustentación se necesita y por tanto mayor ángulo de ataque para

mantener la misma velocidad. Disminuyendo el peso disminuye la resistencia inducida.

Por el contrario, la resistencia parásita se incrementa con la velocidad del avión. La única forma que tiene el piloto para disminuirla es aminorar la velocidad, por que en lo demás, esta resistencia depende sobre todo del diseño del avión y el piloto no dispone apenas de capacidad de acción para modificarla (mantener las alas limpias, impedir la formación de hielo en las mismas, ...).

Si con el aumento de velocidad disminuye la resistencia inducida y se incrementa la resistencia parásita, tiene que haber un punto en que la suma de ambas (resistencia total) sea el menor posible. Este punto de velocidad viene tabulado por el fabricante en el manual del avión.



**Fig.1.3.17 - Resistencia total**

A baja velocidad la mayoría de la resistencia es inducida, debido al incremento del ángulo de ataque para producir suficiente sustentación para soportar el peso del avión. A medida que la velocidad sigue bajando, la resistencia inducida se incrementa rápidamente y la resistencia parásita apenas tiene influencia.

Por el contrario, a alta velocidad la resistencia parásita es la dominante mientras que la inducida es irrelevante.

#### **Resumiendo:**

- A mayor velocidad menor resistencia inducida.
- A mayor ángulo de ataque mayor resistencia inducida.
- A mayor velocidad mayor resistencia parásita.

## Ejemplos de coeficientes aerodinámicos de resistencia

Cuerpo	Superficie frontal ( $m^2$ )	$C_x$	$SC_x$ ( $m^2$ )
Audi A3 (2003)	2,13	0,32	0,68
BMW Serie 1 (2004)	2,09	0,31	0,65
Citröen CX (1974)	1,93	0,36	0,71
Opel Astra (2004)	2,11	0,32	0,68
Peugeot 807 (2002)	2,85	0,33	0,94
Renault Espace (1997)	2,54	0,36	0,92
Renault Espace (2002)	2,8	0,35	0,98
Renault Vel Satis (2002)	2,37	0,33	0,79
Camion	9	0,70	
Autobus	9	0,49	
Motocicleta		0,07	
Formula 1		0,07	
Paracaidas		1,33	
Perfil alar simétrico		0,05	
Esfera		0,1	

Lineas aerodinamicas

