

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Actualmente, en las grandes industrias de fabricación, se utilizan los sistemas hidráulicos.

El sistema hidráulico no es una fuente de energía, la fuente de energía es el primer impulsor; tales como su motor electrónico o un motor que impulse la bomba. El sistema hidráulico es muy versátil, este permite tener ciertas ventajas con respecto a otros sistemas.

Algunas ventajas serán que tienen una velocidad variable, los motores eléctricos, en su mayoría tienen una velocidad constante. En cambio, un actuador (lineal ó rotatorio) de un sistema hidráulico puede ser dirigido a infinidad de velocidades variables al variar el abastecimiento de la bomba ó usando una válvula de control de flujo.

Los sistemas hidráulicos son reversibles. Algunos de los primeros impulsores son reversibles. Y a estos que son reversibles normalmente se les baja la velocidad hasta un paro total antes de invertirlos. Un actuador hidráulico puede ser invertido en plena operación sin que se dañe. Una válvula de direccional de cuatro pasos, ó una bomba reversible puede dar el control de inversion, mientras que una válvula de alivio de presión protege los componentes del sistema de presión excesiva.

Otra ventaja dentro de los sistemas hidráulicos, es que la válvula de alivio de presión lo protegerá del daño que pueda ocasionar la sobre carga. Cuando la carga excede el ajuste de la válvula, el abastecimiento de la bomba es dirigido al tanque con límites definidos de acuerdo a la torsión ó fuerza de salida. La válvula de alivio de presión también da los medios para ajustar una máquina para una cantidad especificada de torsión ó fuerza, como en la operación de sujetar ó abrazar una pieza.

Cualquier líquido es esencialmente incompresible y por eso transmite la fuerza instantáneamente en un sistema hidráulico. Por cierto, el nombre hidráulico viene de la palabra griega hidros que quiere decir agua y aulos que quiere decir tubo. La primera prensa hidráulica Bramah y algunas otras, usan agua como medio de transmisión.

La propiedad más deseada del aceite es su habilidad de lubricación. En un líquido hidráulico debe lubricar la mayoría de las partes móviles de dos componentes.

Al hablar de los sistemas hidráulicos, tendríamos que hablar sobre la definición de la hidráulica, esta es una ciencia que transmite fuerza y/ó movimiento a través de líquido confinado.

En la actualidad, hay miles de máquinas operadas por presión y son muy distintas, se dividen en dos ciencias. Hidrodinámica e hidrostática.

En este manual se estudiará solo la hidrostática, que se define como la ciencia de líquidos bajo presión.

La mayoría de las máquinas hidráulicas en uso actualmente son operadas hidrostáticamente, esto es, a través de presión. Su estudio técnicamente debe referirse como hidrostático ó de presión hidráulica.

1.1. Objetivo de la Tesis

El objetivo de esta tesis es que se pueda promover como libro de texto dentro de la clase de potencia hidráulica; ó así mismo pueda ser para el alumno un libro de apoyo ó de consulta para la misma.

1.2. Justificación del trabajo

La elaboración de esta tesis se justifica en virtud de que la materia de potencia fluida, no existe libro de texto alguno, así mismo hay muy poca información en biblioteca de la misma, esperando que con lo anterior sirva de ayuda para el alumno de la materia de potencia fluida.

1.3. Metodología

La tesis cuenta con una parte inicial desde el primer capítulo hasta el capítulo diez en los cuales se describe información general sobre contenido teórico. En esta parte de la tesis se darán explicaciones de todo lo relacionado con los sistemas hidráulicos, la teoría de los fluidos hidráulicos y la explicación de los diferentes equipos y accesorios involucrados en los sistemas hidráulicos.

Después de haber estudiado estos capítulos, el alumno estaría en posibilidad de poder desarrollar circuitos hidráulicos para diversas aplicaciones por lo que la segunda parte de la tesis, que cubre los capítulos once, doce y trece, el estudiante obtendrá los conocimientos sobre las diversas aplicaciones en el ámbito industrial.

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN A LA HIDRÁULICA

2.1 Definiciones y Conceptos Generales

La hidráulica, es la ciencia que transmite fuerza y/o movimiento a través de líquido confinado. Esto es, de un modo, de alcance algo reducido. Porque en su sentido más amplio, hidráulica abarca cualquier estudio de fluido en movimiento.

2.1.1 Definición de Presión

La definición técnica de presión es igual a la fuerza por unidad de área.

Al estudiar los principios de la hidráulica, hablaremos de fuerzas, transferencias de energía, trabajo y potencia con una de las condiciones fundamentales que se encontraran en un sistema hidráulico, esta será la presión.

La presión en un sistema hidráulico será la encargada de empujar ó ejercer la fuerza ó torsión.

La presión se origina por medio de comprimir ó empujar en un líquido confinado, solo si hay una resistencia al flujo. Hay dos formas de empujar en un flujo, ya sea por la acción de una clase de bomba mecánica ó por el mismo peso de flujo.

2.1.2 Conservación de la Energía

Antes del rompimiento del átomo, se nos decía que la energía no podía ser creada ó destruida. Esta es la ley de conservación de la energía.

En un sistema hidráulico, no se destruye la energía desde un punto a otro y desde una forma a otra. La energía que se pierde en la fricción se transforma en calor, pero no está pérdida. Es simplemente energía gastada.

El propósito de un sistema hidráulico es transferir energía mecánica desde un punto a otro a través del medio de energía de presión. Si la energía mecánica impulsa la bomba hidráulica se convierte en energía de presión y energía cinética en el fluido. Esto se reconvierte en energía mecánica para mover una carga. Los transductores son los elementos que transforman de un tipo de energía a otro tipo de energía. Ejemplo: Una bomba toma energía eléctrica y la transforma en energía de movimiento en el fluido.

La fricción a través del camino causa algunas pérdidas en forma de energía de calor.

Algunos tipos de energía pueden ser el calor en un motor de combustible ó energía eléctrica en una batería ó desde líneas de potencia.

El contenido energético de un sistema hidráulico esta compuesto de varias energías parciales. Según la ley de conservación de la energía, la energía de un líquido que fluye, siempre es constante a menos que se agregue ó se consuma energía externamente por efecto de trabajo. La energía total es la suma de las siguientes energías parciales.

Energía Potencial	}	Energía Estática
Energía de Presión		
Energía Cinética	}	Energía Dinámica
Energía Térmica		

Energía potencial: Es la que posee un cuerpo (ó un líquido) si es elevado a una Altura h . En ese proceso de elevación se efectúa trabajo contra la gravedad. Esta Energía potencial es utilizada en prensas con Cilindros de grandes dimensiones para llenar rápidamente la cámara del cilindro y para crear una presión inicial para la bomba. En el ejemplo se calcula la energía acumulada.

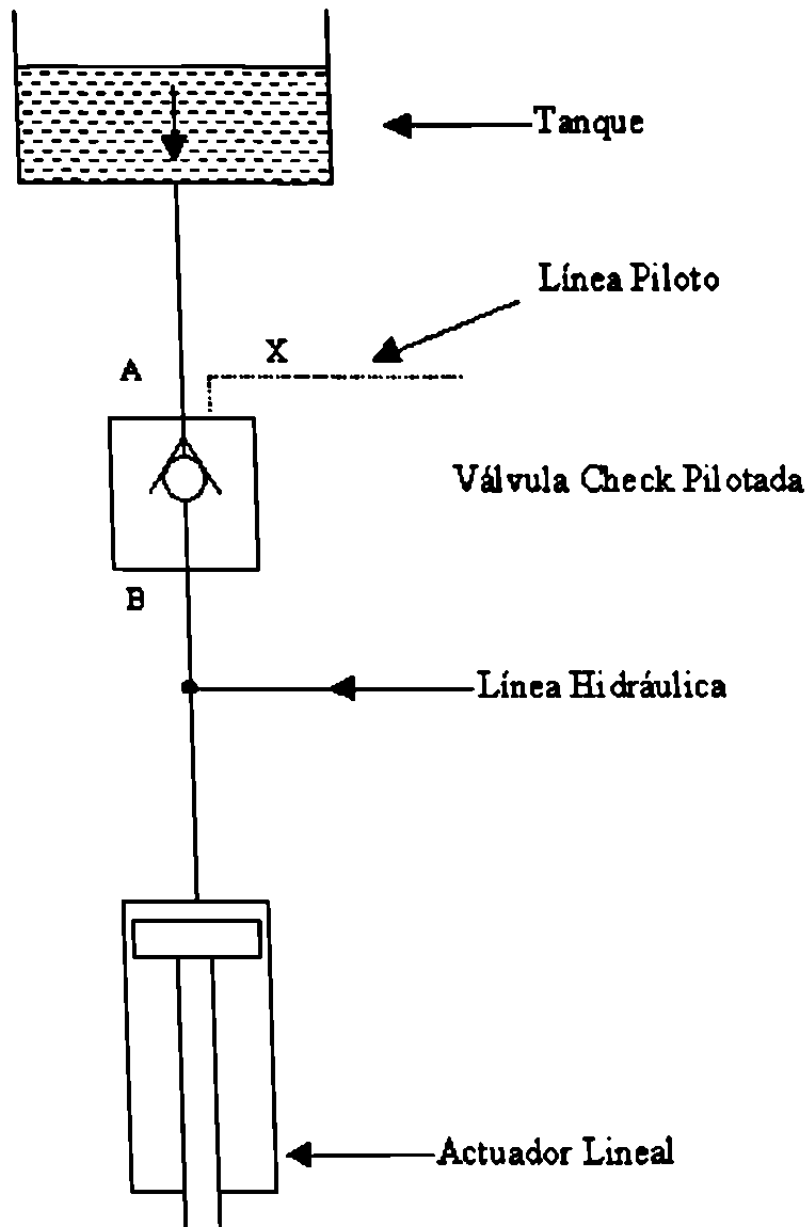


Figura 2.1 Esquema de una prensa con depósito elevado

$$W = m \cdot g \cdot h$$

W= Peso específico

m = Masa de líquido (kg)

g = Gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

h = Altura del líquido (m)

De: $W = F \cdot s$ $F = m \cdot g$

Se obtiene: $W = m \cdot g \cdot h$ $s = h$

Unidad: $1 \text{ kg} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m = 1 \text{ Nm}$ $1 \text{ Joule (J)} = 1 \text{ Watt/s (W/s)}$

Magnitudes conocidas:

$$m = 100 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s} \approx 10 \text{ m/s}$$

$$h = 2 \text{ m} = 200 \text{ cm}$$

$$W = m \cdot g \cdot h$$

$$= 100 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 2 \text{ m}$$

$$= 2000 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\underline{W = 2000 \text{ J}}$$

Un fluido sometido a presión, disminuye su volumen por efecto de los gases disueltos en él. La compresión asciende a 1% a 3% del volumen original. En consecuencia, se trata de una compresión relativamente pequeña, por lo que la energía de presión es poca. Si la presión es de 100 bar, la diferencia es de aproximadamente 1% en relación con el volumen original. A continuación se muestra un cálculo basado en estos valores.

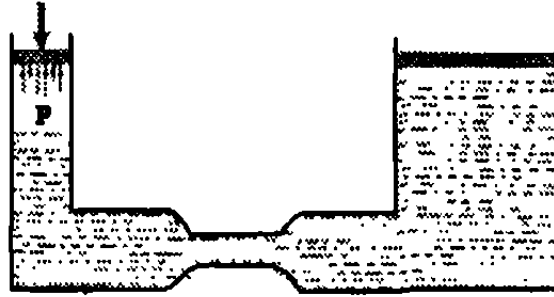


Figura 2.2 Energía de presión

$$\boxed{W = p \cdot \Delta V}$$
 Energía de presión

p = Presión del fluido [Pa]

ΔV = Volumen del fluido [m³]

De $W = F \cdot s$ y de $F = p \cdot A$

Se obtiene: $W = p \cdot A \cdot s$

Sustituyendo $A \cdot s$ por ΔV , se obtiene:

$$W = p \cdot \Delta V$$

Unidad: $1 \text{ N/m}^2 \cdot \text{m}^3 = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Joule (J)}$

Magnitudes conocidas:

$$p = 100 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Delta V = 1\% \text{ de } V$$

$$\Delta V = 0.001 \text{ m}^3$$

$$W = p \cdot \Delta V$$

$$= 1\% \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0.001 \text{ m}^3$$

$$= 0.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^3}{\text{m}^2}$$

$$\underline{W = 10\,000 \text{ J}}$$

La energía de presión es el resultado de la presión que el fluido opone a la compresión.

La energía cinética es aquella que posee un cuerpo (ó líquido) si se mueve a una velocidad determinada. La energía es alimentada por el trabajo de aceleración en la medida en que una fuerza F actúa sobre el cuerpo (ó sobre las partículas de líquido).

La energía cinética viene determinada por la velocidad del flujo y por la masa.

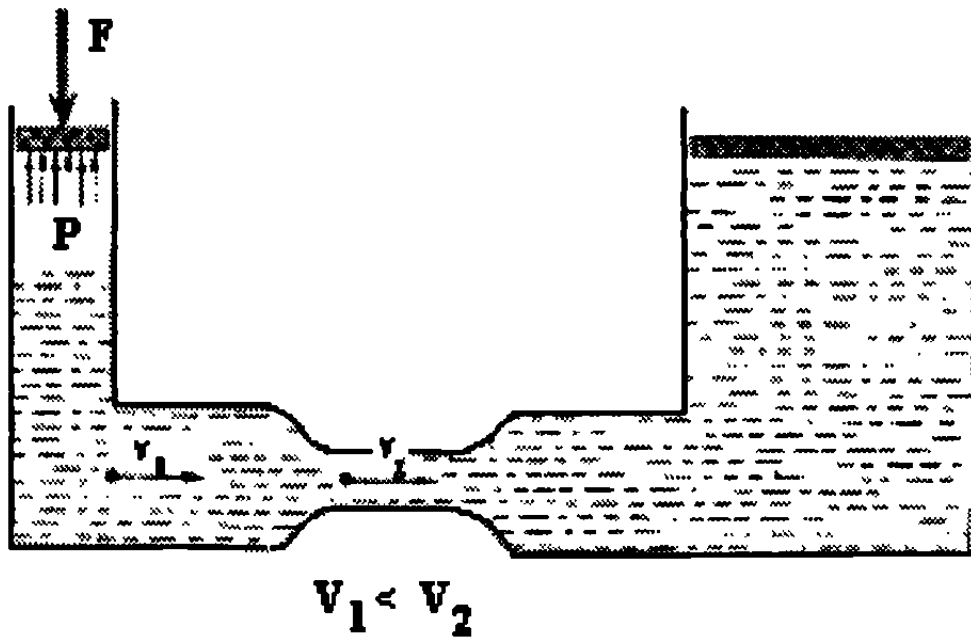


Figura 2.3 Energía cinética

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$W = F \cdot s$$

$$= m \cdot a \cdot s$$

$$= m \cdot a \cdot \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

$$= \frac{1}{2} m \cdot a^2 \cdot t^2$$

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

v Velocidad [m/s]

a Aceleración [m/s²]

$$F = m \cdot a$$

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

$$v = a \cdot t$$

Unidad : $1 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2 = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Joule (J)}$

Magnitudes conocidas

$$m = 100 \text{ kg}$$

$$v_1 = 4 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} m \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 100 \text{ kg} \cdot (4 \text{ m/s})^2 \\ &= 800 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \end{aligned}$$

$$\underline{W = 800 \text{ J}}$$

$$v_2 = 100 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} m \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 100 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m/s})^2 \\ &= 500\,000 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \end{aligned}$$

$$\underline{W = 500\,000 \text{ J}}$$

Cualquier cambio en la velocidad de flujo (permaneciendo constante el caudal volumétrico) provoca automáticamente un cambio de la energía cinética. El porcentaje de esta aumenta en relación con la energía total si el líquido fluye con mayor velocidad y disminuye si la velocidad del flujo del líquido disminuye.

Tal como puede observarse en la figura, el líquido fluye con diversas velocidades debido a los diferentes diámetros de los conductos por que el caudal volumétrico, es decir, el producto de la velocidad del flujo y el diámetro, es constante.

La energía térmica es la energía que se necesita para que un cuerpo (ó un líquido) adquiera temperatura determinada.

En los sistemas hidráulicos, parte de la energía es transformada en energía térmica debido a la fricción. Ello provoca un calentamiento del fluido y de los elementos del sistema. Una parte de calor es cedido hacia el exterior, con lo que se reduce la energía en el sistema, incluyendo la energía de presión. La energía térmica puede calcularse recurriendo a la disminución de la presión y al volumen.

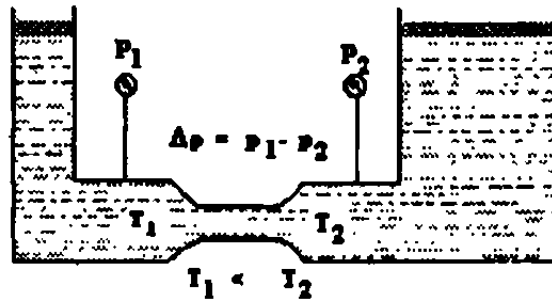


Figura 2.4 Energía Térmica

$$W = \Delta p \cdot V$$

p = Pérdida de presión por fricción [Pa]

$$\text{Unidad: } 1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 = 1 \text{ N} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Joule (J)}$$

Magnitudes conocidas:

Ejemplo

$$\Delta p = 5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$V = 0.1 \text{ m}^3$$

$$W = p \cdot V$$

$$= 5 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0.1 \text{ m}^3$$

$$= 0.5 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0.1 \text{ m}^3$$

$$W = 50\,000 \text{ J}$$

2.1.3. Transmisión de la potencia hidráulica

La potencia se puede definir como el trabajo ó cambio de energía por unidad de tiempo. Otra definición podría ser el porcentaje de efectuar trabajo ó el porcentaje de ejecutar trabajo ó el porcentaje de energía transferida.

En sistemas hidráulicos se diferencia entre potencia mecánica y potencia hidráulica. La potencia mecánica es transformada en potencia hidráulica, la cual es transportada y controlada y luego es nuevamente transportada en potencia mecánica.

La potencia hidráulica viene determinada por la presión y el caudal volumétrico

En base a la fórmula de presión pueden deducirse las ecuaciones necesarias para calcular la presión y el caudal volumétrico.

$$P = p \cdot Q$$

P = Potencial [W] = [Nm/s]

p = Presión [Pa]

Q= Caudal volumétrico [m³/s]

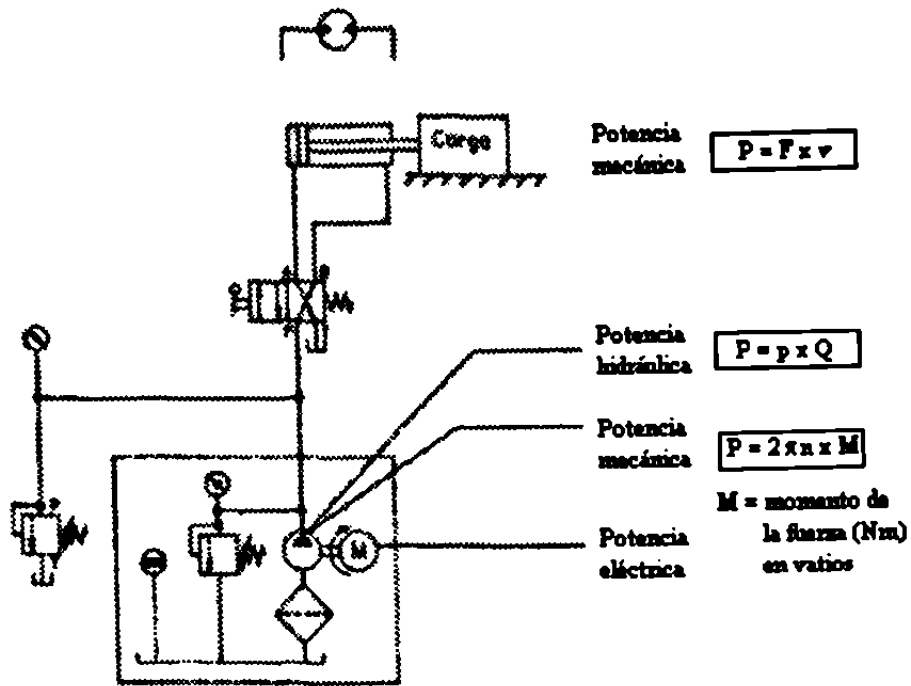


Figura 2.5 Potencia

Magnitudes conocidas:

Ejemplo

$$p = 60 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$Q = 4.21/\text{min} = 4.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$= \frac{4.2}{60} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} = 0.07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$P = p \cdot Q$$

$$= 60 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0.07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$= 4.2 \cdot 10^2 \frac{\text{Nm}^3}{\text{m}^2 \text{s}}$$

$$P = 420 \text{ W}$$

En base a la fórmula de la presión pueden deducirse las ecuaciones necesarias para calcular la presión y el caudal volumétrico

$$p = \frac{P}{Q}$$

Magnitudes conocidas:

Ejemplo

$$P = 315 \text{ W}$$

$$Q = 4.2 \text{ l/min} = \frac{4.2}{60} \text{ dm}^3 / \text{s} = 0.07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$p = \frac{315}{0.07 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{m}^3}$$

$$= 4500 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$p = 45 \cdot 10^5 \text{ Pa (45 bar)}$$

$$Q = \frac{P}{p}$$

Magnitudes conocidas:

$$p = 150 \text{ W}$$

$$p = 45 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$Q = \frac{150 \text{ W}}{45 \cdot 10^5 \text{ Pa}}$$

$$= 3.3 \cdot 10^5 \frac{\text{Nm} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{N}}$$

$$= 3.3 \cdot 10^5 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q = 0.033 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} = 0.033 \text{ dm}^3 / \text{s}$$

La potencia de entrada no es igual a la potencia de salida debido a la pérdida de potencia. La relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida es denominada grado de eficiencia (η).

$$\text{Grado de eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}}$$

En el trabajo práctico se diferencia entre la pérdida de potencia volumétrica provocada por fugas y la pérdida hidráulica y mecánica ocasionada por la fricción.

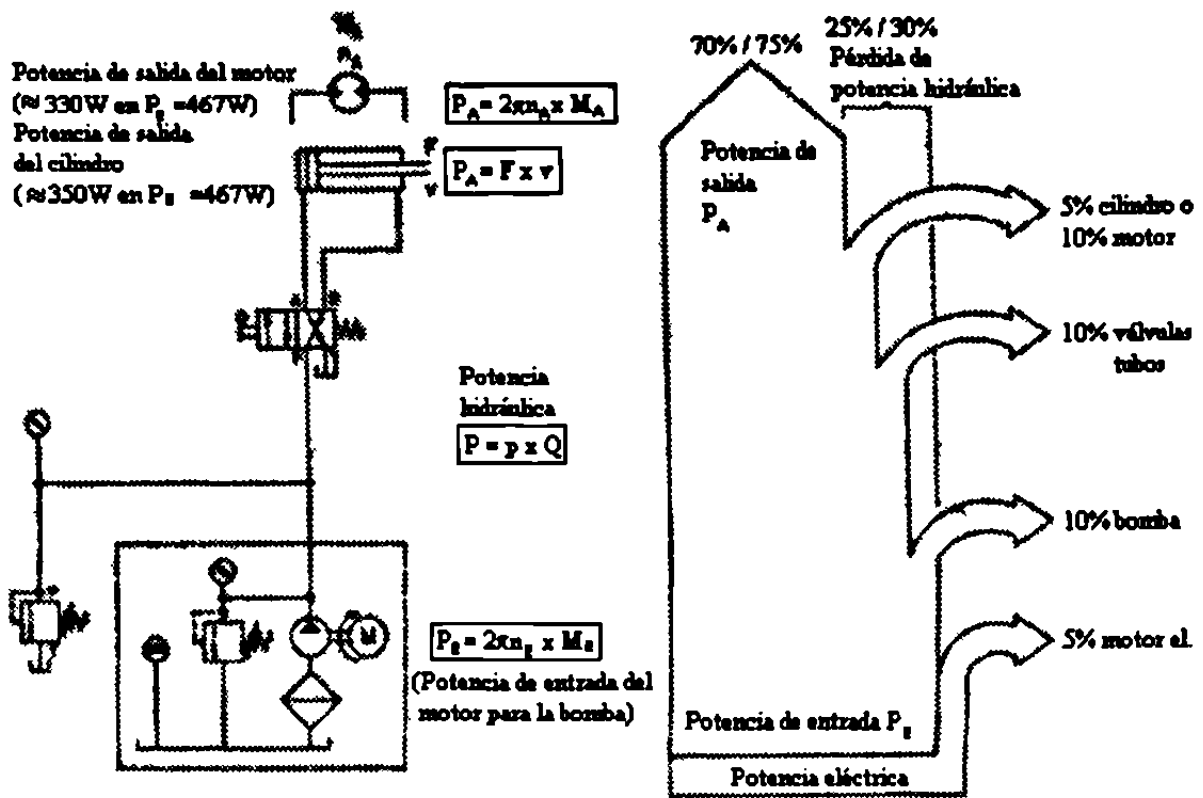


Figura 2.6 Cálculo de las potencias de entrada y de salida

2.1.4. Las Ventajas de la Hidráulica

Velocidad Variable.- La mayoría de los motores eléctricos trabajan a una velocidad constante. También es deseable operar una máquina a una velocidad constante. Sin embargo, el actuador (lineal ó rotatorio) de un sistema hidráulico puede ser dirigido a infinidad de velocidades variables al variar el abastecimiento de la bomba ó usando una válvula de control de flujo. (figura 2.7)

Reversible.- Algunos de los primeros impulsores son reversibles normalmente se les baja la velocidad hasta un paro total antes de invertirlos. Un actuador hidráulico puede ser invertido en plena operación sin que se dañe. Una reversible puede dar el control de inversión, mientras que una válvula de alivio de presión protege los componentes del sistema de presión excesiva

Protección de sobrecarga.- La válvula de alivio de presión en un sistema hidráulico lo protege del daño que causa la sobre carga. Cuando la carga excede el ajuste de la válvula, el abastecimiento de la bomba es dirigido al tanque con límites definidos de acuerdo a la torsión ó fuerza de salida. La válvula de alivio de presión también de los medios para ajustar una máquina para una cantidad especificada de torsión ó fuerza, como en la operación de sujetar ó abrazar una pieza.

Paquetes pequeños.- Los componentes hidráulicos, a causa de sus altas velocidades y la compatibilidad de su presión, pueden dar una alta fuerza de salida siendo estos muy pequeños y ligeros.

Pueden ser parados.- Parar un motor eléctrico causaría daños ó fundiría un fusible. Igualmente las máquinas no se pueden parar sin la necesidad de volverlas a prender. Sin embargo, un actuador hidráulico puede ser parado sin causar daños cuando esté sobrecargado y arrancará inmediatamente cuando le reduzcan la carga. Mientras esté parado, la válvula de alivio simplemente desviará el abastecimiento de la bomba al tanque. La única pérdida causada será el desperdicio de caballos de fuerza.

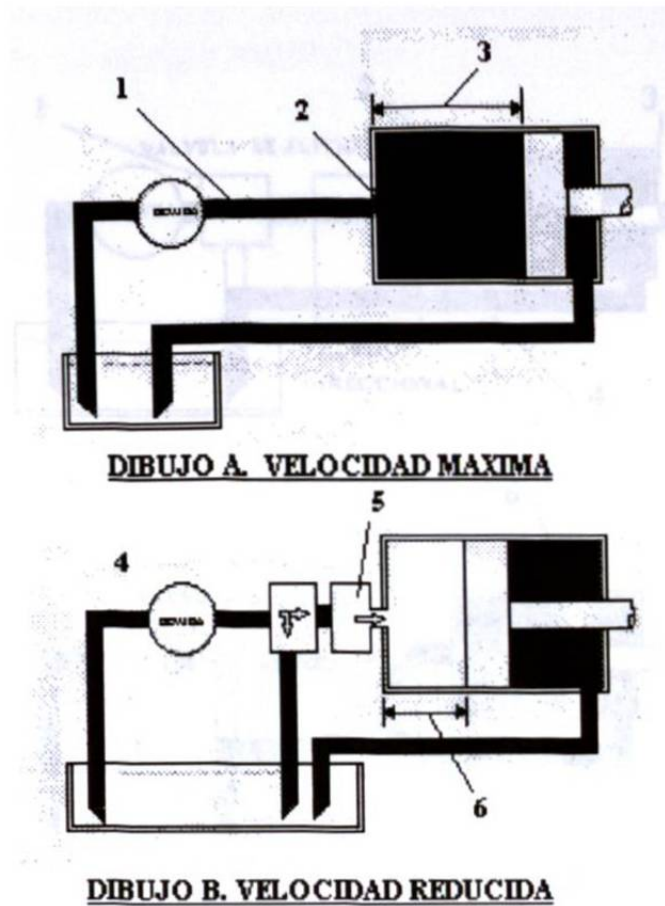


Figura 2.7 El impulso hidráulico de velocidad es variable

1. Si la bomba constantemente abastece 10 galones por minuto.
2. Y este volumen es de 10 galones
3. El pistón se moverá esto en un minuto
4. Si la bomba abastece 10 galones por minuto
5. Pero la válvula restringe el flujo
6. El actuador solo recibe 5 galones y corre sola la mitad de un minuto

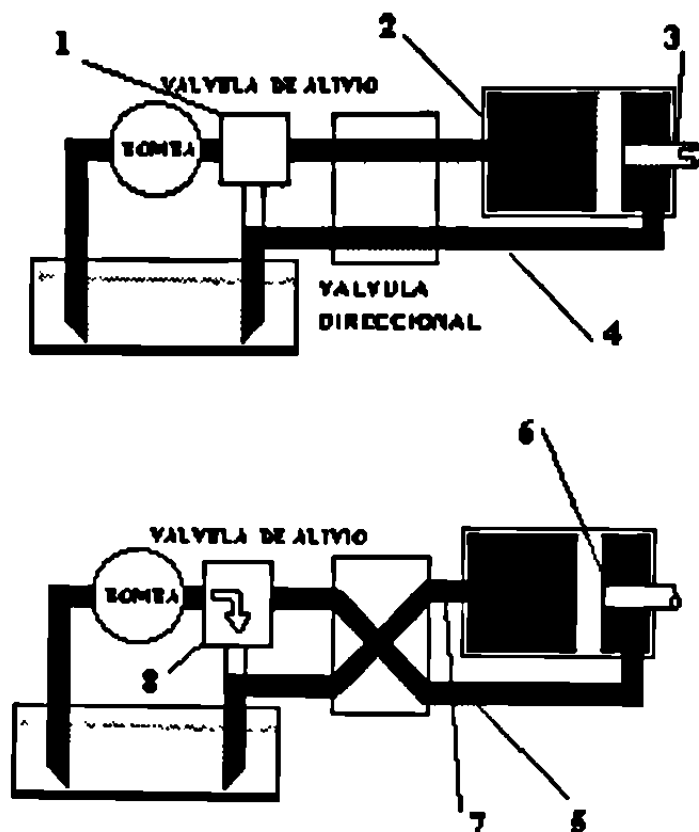


Figura 2.8 El impulso hidráulico de velocidad es reversible

1. En esta posición de la válvula direccional
2. El abastecimiento de la bomba es dirigido al cabezal del cilindro...
3. El vástago del cilindro se extiende
4. El aceite expulsado es empujado hacia fuera del extremo del vástago y dirigido al tanque.
5. En otra posición, el aceite es dirigido al extremo del vástago del cilindro
6. El vástago del pistón se regresa.
7. El aceite expulsado del extremo del cabezal es dirigido al tanque.
8. La válvula de alivio protege al sistema al desviar momentáneamente el flujo al tanque durante el regreso, y cuando el pistón está ahogado ó que pare al terminar su carrera.

2.2. Funciones de un equipo hidráulico.

2.2.1 Hidráulica estacionaria.

La hidráulica estacionaria tiene los siguientes campos de aplicación:

- **Todo tipo de máquinas de producción y montaje**
- **Vías de montaje**
- **Equipos de elevación y transporte**
- **Prensas**
- **Máquinas para moldear por inyección**
- **Laminadoras**
- **Elevadores**

Las máquinas herramientas representan un campo de aplicación típico.

Las máquinas herramientas modernas con control numérico, se encargan de sujetar hidráulicamente piezas y herramientas. Además, el avance y el accionamiento de los ejes también pueden estar a cargo de sistemas hidráulicos.

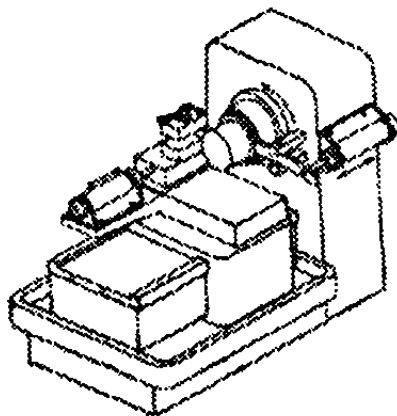


Figura 2.9 Torno

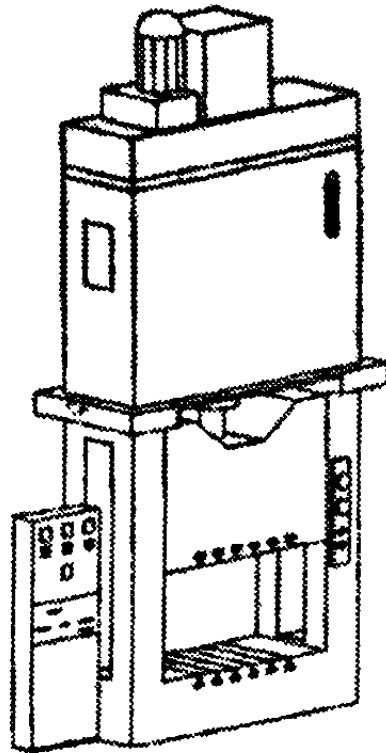


Figura 2.10 Prensa con depósito superior

2.2.2 Hidráulica Móvil

Los campos de aplicación de la hidráulica móvil son los siguientes:

- Máquinas para la construcción
- Volquetes, palas mecánicas, plataformas de carga
- Sistemas de elevación y transporte
- Máquinas para la agricultura

En la industria de la maquinaria para la construcción existen múltiples aplicaciones para la hidráulica móvil. En el caso de una excavadora, por ejemplo, se utiliza la hidráulica para los movimientos de trabajo (elevación, sujeción, giros, etc) y también, para la locomoción del vehículo como tal. Los movimientos giratorios son originados por sistemas rotativos (motores, bombas giratorias).

	Sistemas electrónicos	Sistemas Hidráulicos	Sistemas Neumáticos
Fugas		Contaminación	Aparte de la pérdida de energía, no tiene desventajas
Influencias del entorno	Peligro de explosión de determinados entornos; sensible a la temperatura.	Sensible a las oscilaciones de la temperatura Peligro de incendio en caso de fugas	No produce explosiones insensibles a las temperaturas
Acumulación de energía	Difícil y solo en cantidades reducidas mediante baterías.	Dentro de ciertos límites recurriendo a gases	Fácil
Transporte de energía	Limitado, aunque con pérdida de energía.	Hasta 100 m, velocidad de flujo $v=2$ hasta 6 m/s Velocidad de la transmisión de señales hasta 1000 m/s.	Hasta 100 m, velocidad de flujo $v=20$ hasta 40m/s. Velocidad de la transmisión de señales 20 hasta 40 m/s.
Velocidad de trabajo		$V=0.5$ m/s	$v=1.5$ m/s
Costes de la energía consumida	Bajos	Altos	Muy altos
	0.25	1	2.5
Movimiento lineal	Difícil y costoso Fuerzas pequeñas Complicada regulación de las velocidades.	Sencillo con cilindros Fácil regulación de la velocidad Fuerzas muy grandes.	Sencillo con cilindros Fuerzas limitadas Velocidades muy dependientes de las cargas
Movimiento rotativo	Sencillo y de gran rendimiento	Sencillo Par de giro elevado Revoluciones bajas	Sencillo Bajo rendimiento Revoluciones elevadas
Exactitud de posicionamiento	Exactitudes hasta ± 1 μm y superiores	Dependiendo de la sofisticación del sistema, es factible alcanzar exactitudes de ± 1 μm	Sin cambios de cargas, exactitud factible hasta 1/10 mm
Rigidez	Muy buenas si se utilizan interconexiones mecánicas.	Buena, puesto que el aceite prácticamente no se comprime: además, el nivel de presión es muy superior al de los sistemas neumáticos.	Deficiente, puesto que el aire se comprime.
Fuerzas	No es resistente a sobrecargas Grado deficiente de eficiencia por componentes mecánicos Pueden obtenerse fuerzas considerables	Resistente a sobrecargas Si el sistema tiene presiones elevadas de hasta 600 bar, es factible generar fuerzas muy grandes $F < 3000$ kN.	Resistente a sobrecargas Limitación de las fuerzas por la presión del aire y el diámetro de los cilindros $F < 30$ kN hasta 6 bar.

Tabla 2.1 Comparación de los diferentes sistemas

2.3 Principios de la Potencia Hidráulica

Al estudiar los principios de la hidráulica, nos ocuparemos de fuerzas, transferencias de energía, trabajo y potencia. Lo relacionaremos con las dos fundamentales condiciones ó fenómenos que encontramos en el sistema hidráulico.

2.3.1 Los Principios de Presión

La presión es la responsable de empujar ó ejercer la fuerza ó torsión en un sistema hidráulico.

Un dispositivo hidráulico que utiliza el impacto ó energía cinética del líquido para transmitir potencia, se le llama dispositivo hidrodinámico.

Cuando el dispositivo se opera mediante la fuerza aplicada a un líquido confinado, se le denomina dispositivo hidrostático. En este caso, la presión resulta ser la fuerza aplicada, distribuida en toda el área libre y se expresa como fuerza entre unidad de área.

La presión se origina siempre que siempre que existe una resistencia al flujo ó a una fuerza que trata de hacer fluir al fluido.

La presión atmosférica.-

Es la presión que ejerce el aire de nuestra atmósfera debido a su propio peso. Al nivel del mar, una columna de aire de una pulgada cuadrada en sección transversal y el peso completo de su atmósfera, pesa 14.7 lbs, por lo tanto, la presión es 14.7 psia.

Cualquier condición en donde se encuentra una presión inferior a la atmosférica se dice que existe un vacío ó vacío parcial. Un vacío perfecto es la ausencia total de la presión, es decir, cero psia.

El barómetro de mercurio.-

La presión atmosférica se mide también en pulgadas de mercurio, mediante un dispositivo denominado barómetro. El barómetro de mercurio, se considera generalmente como el punto de partida en los estudios de Pascal sobre la presión.

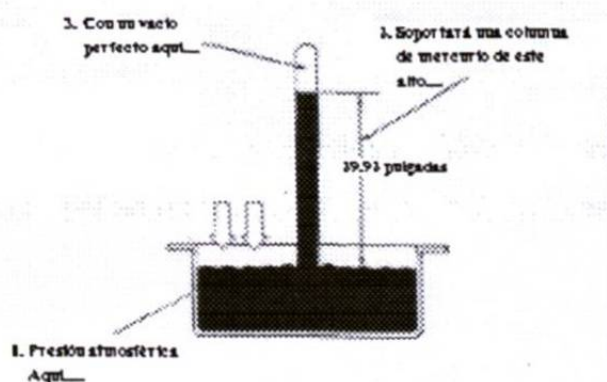


Figura 2.12 El Barómetro de mercurio mide la presión atmosférica

Medición de un vacío.-

Puesto que un vacío es una presión inferior a la atmosférica, se puede medir en las mismas unidades. Es decir, se puede expresar en psia ó en psi (con unidades negativas), así como en pulgadas de mercurio. Sin embargo, la mayor parte de los medidores de vacío están calibrados en pulgadas de mercurio. El vacío perfecto, que equilibra a una columna de mercurio de 29.92 pulgadas de altura, es 29.92 plg. de Hg. El vacío cero (Presión Atmosférica) marca cero en la escala del medidor de vacío.

Resumen de las escalas de presión y de vacío.

Puesto que se han tratado diversas formas de medir la presión y el vacío, resultaría conveniente colocarlas juntas a fin de establecer una comparación.

Haciendo referencia a la figura 2.13, podríamos resumir las formas de medición de la presión y del vacío.

1. Una **Atmósfera** es la unidad de presión que equivale a 14.7 psi, ó a 14.7 psia (el peso de una columna de aire de una pulgada cuadrada de sección, del aire que envuelve la tierra).
2. **psia** (libras por pulgadas cuadrada absolutas) hace referencia a la escala que comienza con el vacío perfecto (ó psia). En esta escala la presión atmosférica marca 14.7.
3. **psi** (libras por pulgada cuadrada manométricas) esta calibrada en las mismas unidades que psia, pero ignora a la presión atmosférica. La presión manométrica se puede abreviar también como **psig**.
4. Para pasar de psia a psig.
Presión Manométrica + 14.7 = Presión Absoluta
Presión Absoluta - 14.7 = Presión Manométrica
5. La presión atmosférica en la escala del barómetro es de 29.92 plg. de Hg. Al comparar este valor la escala psia , resulta que:
1Psi =2 Plg de Hg (aproximadamente)
1Plg Hg = ½ psi (aproximadamente)
6. Una atmósfera equivale aproximadamente a 34 pies de agua ó a 37 pies de aceite.

3 ATMOSFERAS A ABSOLUTAS 2 ATMOSFERAS MANOMETRICAS	44.1	29.4	(90)	111	102	
2 ATMOSFERAS A ABSOLUTAS 1 ATMOSFERAS MANOMETRICA	29.4	14.7	(60)	74	68	
1 ATMOSFERAS A ABSOLUTA (PRESION ATMOSFERICA)	14.7	0	29.92 (30)	37	34	
VACIO PERFECTO	0	-15	0	29.92	0	
	10	-5	20	10	22½	
	5	-10	10	20	11¼	
	0	-15	0	29.92	0	
	PSIA (LIBRAS X PULG ABSOLUTA)	PSI (LIBS X PULG2 MANOMETRICA) ESCALA MANOMETRICA	PULG HG ABS PULG MERCURIO ABSOLUTO ESCALA BAROMETRICA	PULG HG PULG MERCURIO ESCALA VACIO	PIE DE ACEITE ABSOLUTO	PIE DE AGUA ABSOLUTO

..... INDICA QUE ESTA ESCALA NO ES USADA EN ESTE RANGO. LOS VALORES SON MOSTRADOS SOLO PARA COMPARACION.

Figura 2.13 Comparación de las escalas de presión y de vacío

2.3.2. Los Principios De Flujo.

Existen dos formas de medir el flujo de un fluido.

La velocidad.- Es la rapidez promedio de las partículas de un fluido al pasar por un punto determinado ó la distancia promedio a la que viajan las partículas por unidad de tiempo. Se mide en pies sobre segundo (Pies/seg) Pies sobre minutos (Pies/min) ó en pulgadas sobre segundo (In/seg).

El flujo.- Es la medida ó el volumen de fluido que pasa por un punto en un tiempo determinado. Los volúmenes grandes se miden en galones por minutos (GPM) Los pequeños, se pueden expresar en pulgadas cúbicas por minutos.

En la Figura: 2.14 se ilustra la diferencia que existe entre la velocidad y el fluido.

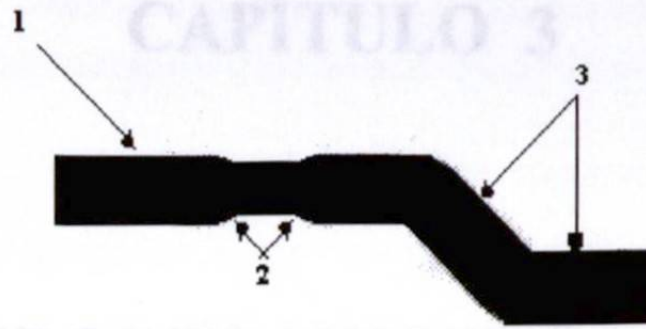


Figura 2.15 Hay flujo laminar en los pasos paralelos

1. Baja velocidad de flujo en una tubería recta es flujo laminar. Las partículas del fluido se mueven paralelas a la dirección del flujo.
2. Un cambio gradual en la sección transversal no afecta la corriente de flujo.
3. Tampoco un cambio gradual en la dirección.

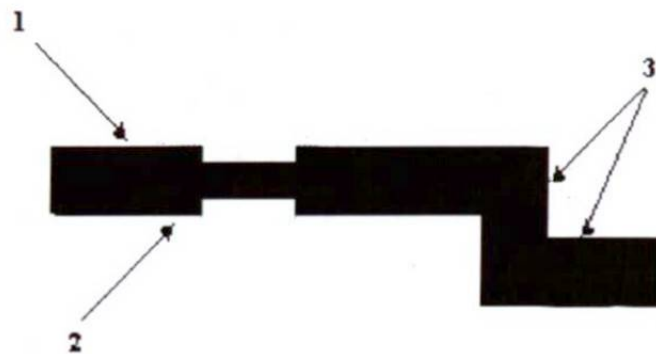


Figura 2.16 La turbulencia es resultado de la resistencia del flujo

1. El flujo puede empezar como flujo laminar
2. Un cambio repentino en la sección transversal hace la turbulencia.
3. Como también un cambio repentino de dirección
4. Los pasos no-paralelos de las partículas aumentan la resistencia para fluir. (fricción).

CAPÍTULO 3

FLUIDOS TRANSMISORES DE POTENCIA

Los fluidos transmisores de potencia nos sirven dentro de la "POTENCIA FLUIDA" para controlar y transmitir movimientos y cargas, tienen ciertas ventajas que son valiosas al considerar los problemas de control que surgen. Los sistemas de control por fluidos, proporcionan sistemas mecánicamente rígidos que pueden diseñarse para dar muy rápida operación y mover cargas enormes. Pueden emplearse más económicamente sobre mayores distancias que los tipos mecánicos, pero están restringidos a distancias más cortas que los sistemas eléctricos. Estos fluidos son utilizados en:

- a) Sistemas Hidráulicos
- b) Sistemas Neumáticos

3.1 Sistemas Hidráulicos

Dentro de estos sistemas el fluido transmisor de potencia más comúnmente utilizado es el ACEITE (derivado del petróleo) aunque se tienen también emulsiones AGUA-

ACEITE y AGUA; aunque este tipo de fluido se utiliza cada vez menos para evitar la corrosión, Falta de lubricación, etc. Y por último los FLUIDOS SINTÉTICOS.

3.2 Sistemas Neumáticos

En estos sistemas el fluido transmisor de potencia más utilizado es el aire.

Los fluidos neumáticos se utilizan mucho en la automatización de maquinaria de producción y en el campo de los controladores automáticos. Por ejemplo, los circuitos neumáticos que convierten la energía del aire comprimido en energía mecánica gozan de amplia utilización y en la industria se encuentran controladores neumáticos de diversos tipos.

Aunque en la actualidad ambos tipos de fluidos transmisores de potencia son utilizados, existen ventajas y desventajas en cada uno de ellos.

3.3 Ventajas y desventajas de los sistemas hidráulicos sobre los neumáticos

Ventajas de los sistemas hidráulicos

- 1. Permite que casi toda parte de la máquina pueda transmitir grandes fuerzas y pares.**
- 2. Proporcionan varios grados de amortiguamiento para cargas de choque.**
- 3. Ofrecen medios de control infinitamente variable de velocidad y carga que además es reversible.**
- 4. Son capaces de producir una operación completamente automática.**
- 5. Permiten posición precisa de control, tanto para elementos de movimiento lineal como rotativo.**

6. Proporcionan un eslabonamiento de potencia en aplicaciones donde el eslabonamiento cinemático es imposible.
7. Eliminan en mucho el desgaste en miembros actuantes, por la acción autolubrificante del fluido transmisor.
8. Proporcionan un sistema de potencia que ofrece seguridad tanto al operador como a la maquinaria.
9. Ofrece medidas simples y flexibles de operar las máquinas.
10. Da respuesta rápida a la demanda del operador.

Desventajas de Sistemas Hidráulicos

1. El sistema puede ser contaminado con polvos algunas partículas de materiales degradadores del fluido
2. Los sistemas hidráulicos no pueden ser completamente a prueba de fugas.

Ventajas de los sistemas Neumáticos

Puede que sea sorprendente que la neumática se haya difundido tan rápidamente y en tan poco tiempo. Este fenómeno se debe, entre otras cosas, a que en ciertos problemas de automatización es más sencillo y más económico utilizar el aire, que ningún otro fluido.

1. El aire esta disponible en cualquier parte y en cantidades prácticamente inagotables.
2. El aire comprimido puede transportarse por tuberías a distancias largas. No es necesario prever el retorno del aire.
3. Un compresor no tiene que funcionar constantemente. El aire comprimido puede almacenarse en un tanque, desde donde puede recurrirse a él. Además, también es posible transportar el aire comprimido en tanques móviles.
4. El aire comprimido es indiferente a las oscilaciones de la temperatura, de esta manera es factible trabajar de modo seguro incluso con temperaturas extremas.

5. El aire comprimido no ofrece peligro de explosión ó de incendio. En consecuencia, no es necesario adoptar costosas medidas de seguridad contra explosiones.
6. El aire comprimido es limpio, por lo que no se produce contaminación alguna en caso de fuga de aire en las tuberías, ó en las unidades de trabajo, precisamente esta característica es indispensable en la industria alimenticia, química, maderera, textil, etc.
7. Los elementos de trabajo son fáciles de montar, por lo que los sistemas neumáticos no son muy costosos.
8. El aire comprimido es un medio de trabajo sumamente veloz, por lo que es factible alcanzar altas velocidades de trabajo (la velocidad operativa de los cilindros neumáticos es de 1 hasta 2 metros por segundo).
9. La potencia y la velocidad de los elementos neumáticos puede ser regulada sin escalonamiento.
10. Las herramientas neumáticas y los elementos de trabajo pueden someterse a esfuerzos hasta quedar inmovilizados, por lo que son seguros frente a sobrecargas, para de limitar con precisión los posibles campos de aplicación de la neumática, es preciso conocer también sus desventajas.

Desventajas de Sistemas Neumáticos

1. El aire que se utilizará en un sistema neumático requiere de acondicionamiento previo puesto que no debe contener suciedad, humedad (ya que de lo contrario se ocasionaría desgaste de los elementos neumáticos).
2. El aire dado que es compresible no permite obtener velocidades homogéneas y constantes de los cilindros y motores neumáticos.
3. Los sistemas neumáticos solo son económicos hasta determinadas potencias dado el límite usual de la presión de trabajo ($700 \text{ Kpa} = 7 \text{ bar}$), el límite económico se ubica entre $200,000$ y $300,000 \text{ N}$ ($2,000$ hasta $3,000 \text{ Kp}$) según la distancia y la velocidad.
4. La evacuación del aire produce ruidos, sin embargo, dicho problema ha podido ser solucionado en buena parte mediante el uso de silenciadores.

5. El aire comprimido es un medio energético relativamente costoso, no obstante, buena parte de los elevados costos de los elementos son compensados por la economía de los elementos y por él redimiendo (número de ciclos)

Comparación entre sistemas hidráulicos y sistemas neumáticos

Las diferentes propiedades de los fluidos implicados es lo que caracteriza las diferencias entre ambos sistemas a continuación se enumeran esas diferencias:

1. El aire y los gases se pueden comprimir, en tanto el aceite y los líquidos no.
2. El aire carece de propiedades de lubricación y siempre contiene vapor de agua.
3. La presión de operación de los sistemas neumáticos es mucho menor que la de los sistemas hidráulicos.
4. La potencia de salida de los sistemas neumáticos es considerablemente inferior que la de los sistemas hidráulicos.
5. La precisión de los accionadores hidráulicos es satisfactoria a cualquier velocidad.
6. En los sistemas neumáticos se toleran ciertas pérdidas, pero las fugas internas se deben evitar, porque las diferencias de presión son bajas. En los sistemas hidráulicos se aceptan algunas pérdidas internas pero hay que evitar toda fuga al exterior del sistema.
7. En los sistemas neumáticos no se requieren tuberías de retorno de fluido, mientras que en los sistemas hidráulicos siempre son necesarias.
8. Las temperaturas normales de funcionamiento para los sistemas neumáticos, van desde 5° a 60°C sin embargo, el sistema neumático puede funcionar de 0° a 200°C. Los sistemas neumáticos son insensibles a variaciones de temperatura, en contraste con los sistemas hidráulicos, donde la fricción del fluido debido a la viscosidad depende mucho de la temperatura. Las temperaturas normales de funcionamiento para sistemas hidráulicos van de 20° a 70°C.
9. Los sistemas neumáticos son seguros ante riesgos de incendio ó explosión, en tanto que los hidráulicos no lo son.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS HIDRÁULICOS

Dentro de este tipo de sistemas, los fluidos utilizados se clasifican en tres grupos:

- a) Aceites derivados del petróleo
- b) Soluciones acuosas
- c) Aceites sintéticos
 - 1) Base Silicon
 - 2) Hidrocarburos fluorados

4.1 Fluidos Hidráulicos

La selección que se haga y el cuidado que se tenga del fluido hidráulico de una máquina, ejercerán un efecto importante sobre el rendimiento de esta, así como por lo que respecta a la duración de los elementos hidráulicos.

4.2 Propósitos del fluido

En un sistema hidráulico el aceite es utilizado como medio para transmitir la potencia; siendo esto, como una de las cuatro finalidades que debe tener un fluido hidráulico. Las restantes son Lubricación, Sellamiento y Enfriamiento.

Transmisión de potencia.- Como medio de transmisión de potencia, el líquido debe fluir con facilidad a través de las líneas y orificios de los elementos, la excesiva resistencia al flujo crea pérdidas de potencia considerables. El fluido debe ser también tan incomprensible como sea posible, a fin de cuando se arranque una bomba ó se cambie de posición una válvula, la acción sea instantánea.

Lubricación.- En la mayoría de los elementos hidráulicos, la lubricación interna la proporciona el fluido. Los elementos de la bomba y otras piezas sujetas a desgaste deslizan entre sí con una película de aceite de por medio. (figura 4-1) a fin de que el elemento tenga una larga duración, el aceite debe de contener los aditivos necesarios para garantizar buenas características contra el desgaste.

Sellamiento.- En la mayoría de los casos, el fluido es el único sello contra la presión en el interior de un componente hidráulico. En la figura (4-1), se ve que no hay ningún anillo sellador entre el carrete y cuerpo de la válvula, que reduzca la fuga de aceite desde el paso de alta presión hacia el paso de baja presión. Son el estrecho ajuste mecánico y la viscosidad del aceite los factores que determinan el porcentaje de fuga que existirá.

Enfriamiento.- La circulación del aceite a través de las líneas y alrededor de las paredes del depósito, hace que ceda el calor que se genera en el sistema (figura 4.2).

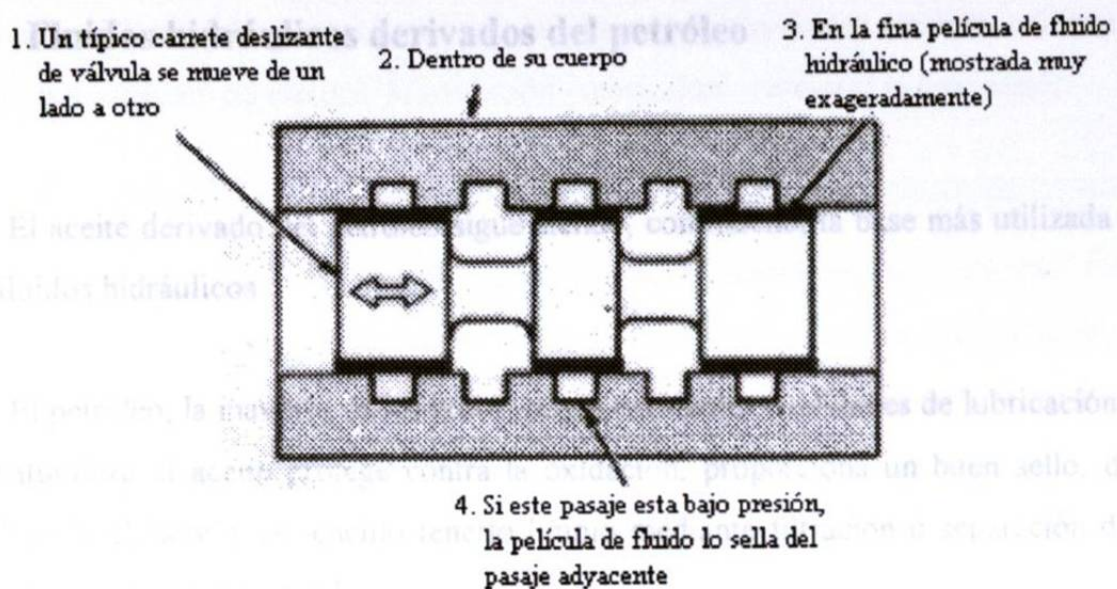


Figura 4.1 El fluido lubrica las partes en operación

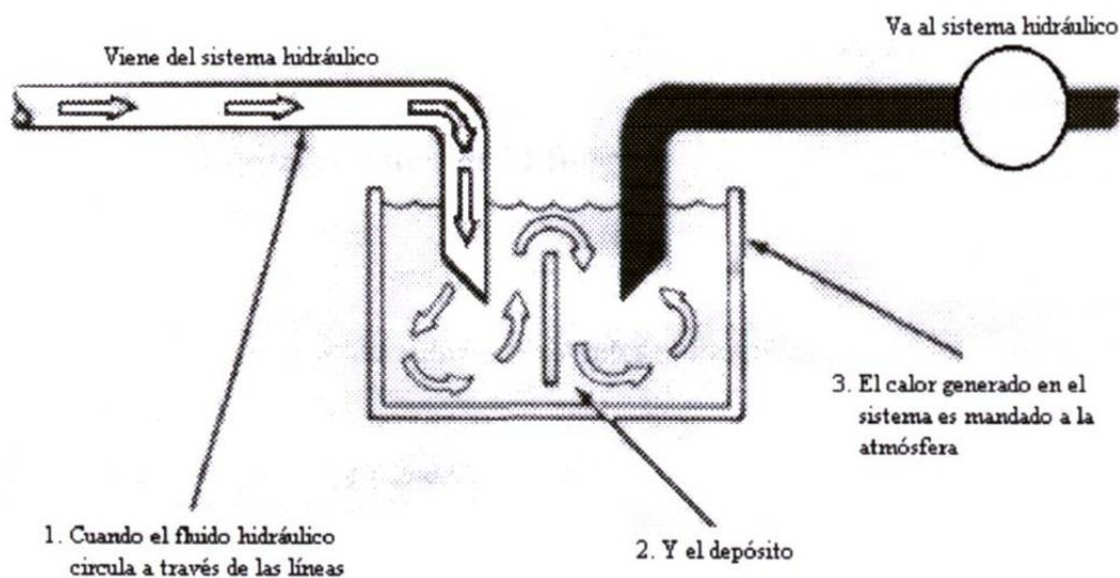


Figura 4.2 La circulación enfría al sistema

4.3 Fluidos hidráulicos derivados del petróleo

El aceite derivado del petróleo sigue siendo, con mucho, la base más utilizada para los fluidos hidráulicos.

El petróleo, la mayoría de los casos, posee excelentes cualidades de lubricación. Por su naturaleza el aceite protege contra la oxidación, proporciona un buen sello, disipa fácilmente el calor y es sencillo tenerlo limpio mediante filtración ó separación de los contaminantes por gravedad.

Una de las principales desventajas del aceite derivado del petróleo es que es combustible. Para aplicaciones en las que pueda haber riesgo de incendio, tales como tratamientos térmicos, soldadura hidroeléctrica, forjado a presión, etc.

4.4 Tipos de fluidos resistentes al fuego

Existen tres tipos de fluidos hidráulicos resistentes al fuego:

- a) Glicol – Agua
- b) Emulsiones de agua y aceite
- c) Aceites sintéticos

4.4.1 Fluidos del tipo Glicol – Agua

Este tipo de fluidos esta compuesto de 35 a 40 % de agua que proporciona resistencia a la combustión, y un glicol (sustancia química sintética de la misma familia que los anticongelantes permanentes, como el etileno u otros glicoles) y además, un

espesador soluble en agua para mejorar la viscosidad. Contienen también aditivos que evitan la formación de espuma, la oxidación y corrosión, y mejorar la lubricación.

Características.- Los fluidos de agua y glicol generalmente presentan buenas características de resistencia al desgaste, siempre y cuando se eviten altas velocidades y grandes cargas. El fluido posee una alta gravedad (es más pesado que el aceite) que puede crear un vacío más alto en las entradas de las bombas.

La mayor parte de los más recientes materiales sintéticos de selladura son compatibles con el fluido de agua y glicol. Los asbestos, el cuero y los materiales a base de corcho se deben evitar en los sellos rotatorios, puesto que tienden a absorber agua.

Algunas de las desventajas de estos fluidos son:

- a) Resulta necesario medir continuamente el contenido de agua y compensar la evaporación de ésta a fin de tener la viscosidad requerida.
- b) La evaporación puede originar también la pérdida de ciertos aditivos, reduciéndose con ello la duración del fluido y la de los elementos hidráulicos.
- c) Las temperaturas de operación deben de mantenerse bajas.
- d) El costo (actualmente) es mayor que el de los aceites convencionales.

4.4.2 Emulsiones de agua y aceite

Los fluidos del tipo de emulsión son menos costosos, entre aquellos resistentes a la combustión. Al igual que con el agua y glicol, también estos dependen del contenido de agua, para lograr las propiedades de resistencia a la combustión. Además del agua y del aceite, estas mezclas contienen emulsificadores estabilizadores y otros aditivos que mantienen unidos a los dos líquidos.

Aceite en agua.- Las emulsiones de aceite en agua, contienen diminutas gotas de un aceite especial refinado, disperso en el agua. Es altamente resistente a la combustión. Se le pueden agregar aditivos que mejoren su poca capacidad de lubricación, así como para que proteja contra la corrosión. Este fluido ha sido utilizado principalmente en bombas de baja velocidad.

Agua en aceite.- Las emulsiones de agua en aceite son las de uso más común. En estas, son pequeñas gotas de agua las que se encuentran dispersas en una fase continua de aceite. Al igual que el aceite, estos fluidos poseen una excelente capacidad de lubricación.

Además, el agua dispersa proporciona al fluido una mejor capacidad de enfriamiento. Se agregan inhibidores de la oxidación tanto para la fase de aceite como para la de agua. También se usan sin dificultad aditivos contra la formación de espuma.

Con cualquier emulsión de agua y aceite, las temperaturas de operación se deben de mantener bajas a fin de evitar la evaporación y la oxidación.

Los fluidos en emulsión son generalmente compatibles con todos los metales y sellamientos que se encuentran en los sistemas hidráulicos a base de aceites derivados del petróleo.

4.4.3. Fluidos sintéticos resistentes a la combustión

Los fluidos sintéticos son producto de reacción química de componentes de bajo peso molecular para formar moléculas más grandes con sobresalientes propiedades de comportamiento y con viscosidades adecuadas para ser utilizados como lubricantes.

Características.- Puesto que los fluidos sintéticos no contienen ni agua ni otra materia volátil, funcionan bien a altas temperaturas sin perder ninguno de sus elementos esenciales. Se usan también para sistemas de alta presión.

Los fluidos sintéticos resistentes a la combustión no son los que mejor funcionan en sistemas de baja temperatura. En ambientes fríos puede ser necesario un calentamiento auxiliar.

Además, estos fluidos poseen mayor gravedad específica que los de cualquier otro tipo y las condiciones de entrada de la boca de la bomba requieren de un cuidado especial.

Algunas bombas de paletas se construyen con cuerpos especiales que proporcionan el mejoramiento requerido en las condiciones de entrada, para evitar que la bomba cavite al utilizarse un fluido sintético.

El índice de viscosidad de los fluidos sintéticos es bajo; varía desde 80 hasta la cantidad de menos 400.

Los fluidos sintéticos son probablemente los más caros que se utilicen en la actualidad.

Los fluidos sintéticos no son compatibles con los sellos comúnmente usados, de nitrilo y neopreno. Por lo tanto cuando se ha estado utilizando aceite, agua y glicol ó agua y aceite y se desea pasar a fluido sintético, se hace necesario desmontar todos los elementos y cambiar los sellos.

La tabla 4-1 muestra los tipos de materiales que son compatibles con los diversos fluidos hidráulicos. Y además se muestra en la tabla. 4-2 donde se detallan algunos datos importantes sobre los diferentes fluidos hidráulicos.

		FLUIDOS BASADOS EN AGUA		FLUIDOS NO BASADOS EN AGUA		
MATERIALES BAJO CONSIDERACION	ACEBITES DE PETROLBO	EMULSION DE AGUA Y ACEITE	MIXTURA DE AGUA - GLYCOL	MATERIALES CLORINADOS	MEZCLAS DE	ESTERS DE FOSFATO
SELLO ACEPTABLE Y MATERIAL DE EMPAQUE	NEOPRENO, BUNA N	NEOPRENO, BUNA N (NO CORCHO)	NEOPRENO, BUNA N (NO CORCHO)	SILICON, VITON, VYRAM, TEFLON, FBA BUTILO (CON PRECAUCION)	SILICON, VITON, VYRAM, TEFLON, FBA BUTILO (CON PRECAUCION)	BUTILO, VITON, VYRAM, SILICON, TEFLON, FBA
PINTURAS ACEPTABLES	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL	COMO LO RECOMIENDA EL DISTRIBUIDOR	CURADO DE AIRE EPOXY COMO SE RECOMIENDA	CURADO DE AIRE EPOXY COMO SE RECOMIENDA	CURADO DE AIRE EPOXY COMO SE RECOMIENDA
COMPUESTOS DE TUBERIA ACEPTABLES	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL	COMPUESTOS DE CAÑERIA SON RECOMENDADOS. TIPO TEFLON			
COLADORES DE ADMISION ACEPTABLES	MALLA DE ALAMBRE DE 100 MESH, Y 1 ½ VECES LA CAPACIDAD DE LA BOMBA	MALLA DE ALAMBRE DE 40 MESH 4 VECES LA CAPACIDAD DE LA BOMBA	MALLA DE ALAMBRE DE 50 MESH 4 VECES LA CAPACIDAD DE LA BOMBA			
FILTROS ACEPTABLES	FIBRA CELULOSA, 200 - 300 MESH MALLA DE ALAMBRE, ORILLA DE CUCHILLO Ó TIPO DE PLACA	FIBRA DE VIDRIO, 200 - 300 ALAMBRE, ORILLA DE CUCHILLO Ó PLACA	FIBRA CELULOSA, 200 - 300 MALLA DE ALAMBRE, ORILLA DE CUCHILLO Ó PLACA	FIBRA DE CELULOSA, MALLA DE ALAMBRE DE 200 - 300 MESH, ORILLA DE CUCHILLO Ó TIPO DE PLACA (TIPO MICRONICO Ó DE TIERRA DE FULLER SE PUEDEN USAR EN FLUIDOS QUE NO SEAN ADITIVOS)		
METALES DE CONSTRUCCION ACEPTABLES	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL	EVITE METALES GALVANIZADOS Y CADMIADO	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL

Tabla 4.1 Compatibilidad de los fluidos hidráulicos y Materiales de Sello

TIPOS DE FLUIDOS HIDRÁULICOS				
	RESISTENTES AL FUEGO			
	ACEITE DE PETROLEO	EMULSIONES (AGUA EN ACEITE)	AGUA - GLICOL	SINTETICO (FOSFATO - ETER)
COSTO	X	2 a 3X	3 a 4X	5 a 6X
SERVICIO DE ALTA TEMPERATURA	Vida corta a temperaturas arriba de los 70°C A 80°C	Excesiva evaporación de agua arriba de 65°C	Excesiva evaporación de agua a temperaturas elevadas	Estable a temperaturas relativamente altas
SERVICIO DE ALTA TEMPERATURA	Regular a buena	Pobre	Buena	Pobre a mediana
ESTABILIDAD DE OXIDACION	Buena	Buena	Buena	Excelente
PROTECCION DE HERRUMBRE OXIDO	Buena a excelente	Buena	Mediana a buena	Mediana a buena
FORMACION DE ESPUMA	Excelente	Excelente	Buena	Buena
INDICE DE VISCOSIDAD	Buena	Excelente	Excelente	Pobre
EFFECTO SOBRE SELLOS Y EMPAQUES	Se requieren materiales resistentes al aceite	Compatible con sellos usados para aceites de petróleo, materiales hechos de papel, fibra y cuero no son satisfactorios	No compatible con algunos tipos de corchos, papel, cueros y materiales de fibra sintética	No son compatibles con sellos usados para aceites de petróleo, deben ser usados materiales resistentes a éstos fluidos
EFFECTO DE PINTURAS AISLAMIENTO	Se requieren pinturas resistentes al aceite, ningún problema específico con el aislamiento	Igual al aceite de petróleo	No compatible con algunas pinturas	Alta solvencia para muchas pinturas y aislamientos
LUBRICIDAD	Excelente	Buena	Buena	Excelente
CALOR TRANSFERIDO	Buena	Excelente	Excelente	Buena
COMPRESIBILIDAD	Moderada	Moderada	Moderada	Baja

Tabla 4.2 Comparación de las propiedades de los fluidos

CAPÍTULO 5

FUNDAMENTOS DE LA HIDRÁULICA

En la actualidad la hidráulica se le atribuye al significado de transmisión de fuerzas y movimientos por medio de fluidos, es decir, utilizan líquidos para la transmisión de energía, a continuación detallaremos los fundamentos principales que se presentan en la hidráulica.

5.1. Ley de la hidrostática.

Por definición, un fluido debe deformarse continuamente cuando se le aplica un esfuerzo de corte de cualquier magnitud. La ausencia de movimiento relativo (y, en consecuencia, de deformación angular) implica la ausencia de esfuerzos de corte. Por tanto, los fluidos ya sea en reposo ó en movimiento de un “cuerpo rígido”, sólo son capaces de soportar esfuerzos normales. El análisis de los casos hidrostáticos es, por tanto, mucho más simple que el de fluidos sujetos a deformación angular.

La mera simplicidad no justifica nuestro estudio de un tema. Las fuerzas normales transmitidas por fluidos son importantes en muchas situaciones prácticas. Empleando

los principios de la hidrostática, podemos calcular las fuerzas sobre objetos sumergidos, desarrollar instrumentos para medir presiones y deducir propiedades de la atmósfera y de los océanos. Es posible también, usar los principios de la hidrostática para determinar fuerzas generadas por sistemas hidráulicos en aplicaciones tales como las prensas industriales ó los frenos de automóvil.

En un fluido estático y homogéneo, ó en un fluido sometido al movimiento de un cuerpo rígido, una partícula de fluido mantiene su identidad todo el tiempo. Puesto que no hay movimiento relativo dentro del fluido, un elemento de fluido no se deforma. Podemos aplicar la segunda ley de movimiento de Newton para evaluar la reacción de la partícula ante las fuerzas aplicadas.

La Ecuación Básica de la Hidrostática

Para obtener una ecuación que permita determinar el campo de la presión dentro de un fluido estático, aplicamos la segunda ley de Newton a un elemento de fluido diferencial de masa $dm = \rho dV$, con lados dx , dy y dz , como se muestra en la figura. El elemento de fluido es fijo respecto al sistema de coordenadas rectangulares fijo que se muestra.

Recuerde que pueden aplicarse a un fluido dos tipos generales de fuerza: másicas y de superficie. La única fuerza másica que debe considerarse en la mayor parte de los problemas de ingeniería, se debe a la gravedad. En algunas situaciones pueden estar presentes las fuerzas másicas que son producto de campos eléctricos ó magnéticos, éstas no se considerarán en este caso.

En un elemento de fluido diferencial, la fuerza másica, $d\vec{F}_B$, es

$$d\vec{F}_B = \vec{g} dm = \vec{g} \rho dV$$

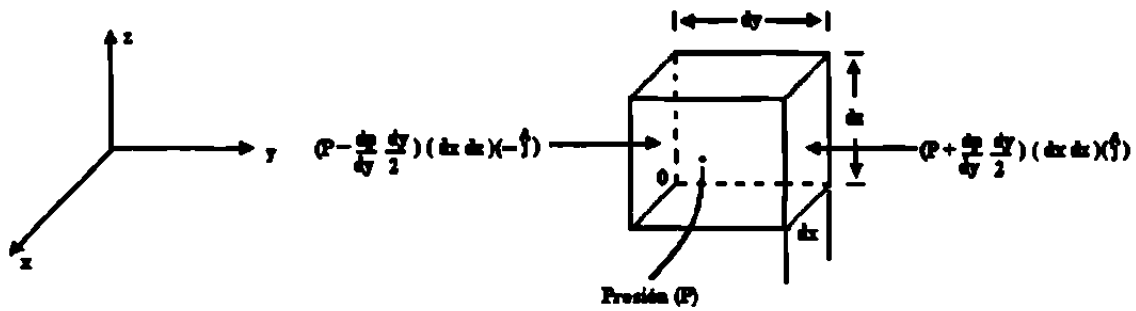


Figura 5.1 Elemento diferencial de fluido y fuerzas de presión en la dirección y .

Donde \vec{g} es el vector de gravedad local, ρ es la densidad y $d\mathcal{V}$ es el volumen del elemento. En coordenadas cartesianas $d\mathcal{V} = dx\,dy\,dz$, así que

$$d\vec{F}_B = \vec{\rho}g\,dx\,dy\,dz$$

En un fluido estático no pueden presentarse esfuerzos de corte. Por consiguiente, la única fuerza de superficie es la de la presión, siendo ésta, una cantidad de campo, $p = p(x, y, z)$; la presión varía con la posición dentro del fluido. La fuerza de presión neta que resulta de esta variación, puede evaluarse mediante la suma de las fuerzas que actúan sobre las seis caras del elemento de fluido.

Sea p la presión en el centro, 0 , del elemento. Para determinar la presión en cada una de las seis caras del elemento, utilizaremos una expansión, de la serie de Taylor, de la presión en torno al punto 0 . La presión en la cara izquierda del elemento diferencial es

$$P_L = p + \frac{dp}{dy} \left(-\frac{dy}{2}\right) = p - \frac{dp}{dy} \frac{dy}{2}$$

(Los términos de orden mayor se omiten porque se vuelven cero en el proceso de límite subsecuente). La presión sobre la cara derecha del elemento diferencial es

$$P_R = p + \frac{dp}{dy} (y_R - y) = p + \frac{dp}{dy} \frac{dy}{2}$$

Las fuerzas que actúan en las dos superficies y del elemento diferencial se muestran en la figura. Cada fuerza de presión es un producto de tres términos. La magnitud de la presión es el primero. La magnitud se multiplica por el área de la cara para obtener la fuerza de presión, mientras que un vector unitario se introduce para indicar la dirección. Observe también, en la figura, que la fuerza de presión en cada cara actúan en contra de la misma. Una presión positiva corresponde a un esfuerzo normal compresivo.

Las fuerzas de la presión sobre las otras caras del elemento se obtienen de la misma manera. La combinación de todas estas fuerzas produce la fuerza superficial neta que actúa sobre el elemento. Por tanto

$$\begin{aligned} d\vec{F}_s = & \left(p - \frac{dp}{dx} \frac{dx}{2} \right) (dydz)(\hat{i}) + \left(p + \frac{dp}{dx} \frac{dx}{2} \right) (dydz)(-\hat{i}) \\ & + \left(p - \frac{dp}{dy} \frac{dy}{2} \right) (dxdz)(\hat{j}) + \left(p + \frac{dp}{dy} \frac{dy}{2} \right) (dxdz)(-\hat{j}) \\ & + \left(p - \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} \right) (dxdy)(\hat{k}) + \left(p + \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} \right) (dxdy)(-\hat{k}) \end{aligned}$$

Agrupando y cancelando términos, obtenemos

$$\begin{aligned} d\vec{F}_s = & \left(-\frac{dp}{dx}(\hat{i}) - \frac{dp}{dy}(\hat{j}) + \frac{dp}{dz}(\hat{k}) \right) (dxdydz) \\ d\vec{F}_s = & -\left(\frac{dp}{dx}(\hat{i}) + \frac{dp}{dy}(\hat{j}) + \frac{dp}{dz}(\hat{k}) \right) (dxdydz) \end{aligned} \quad (5.1)$$

El término entre paréntesis se llama gradiente de la presión ó simplemente, gradiente de presión, y puede escribirse como $\text{grad } p$ ó ∇p . En coordenadas rectangulares

$$\begin{aligned} d\vec{F}_s = & -\text{grad } p (dxdydz) = -\nabla p dxdydz \\ \text{grad } p = \nabla p = & \left(\hat{i} \frac{dp}{dx} + \hat{j} \frac{dp}{dy} + \hat{k} \frac{dp}{dz} \right) = \left(\hat{i} \frac{d}{dx} + \hat{j} \frac{d}{dy} + \hat{k} \frac{d}{dz} \right) p \end{aligned}$$

El gradiente puede considerarse como un operador vectorial; al tomar el gradiente de un campo escalar se obtiene un campo vectorial. Empleando la designación de gradientes, la ecuación (5.4) puede escribirse como

$$\vec{dF}_s = -\text{grad } p(dx dy dz) = \nabla p dx dy dz \quad (5.2)$$

Físicamente, el gradiente de presión es el negativo de la fuerza de superficie por unidad de volumen, debido a la presión. Notamos que el nivel de presión no es importante al evaluar la fuerza neta de presión. En vez de ello, lo que importa es la relación a la cual los cambios de presión ocurren con la distancia, es decir, el *gradiente de presión*.

A continuación, combinaremos las formulaciones para las fuerzas de superficie y másicas que hemos desarrollado para obtener la fuerza total actuante sobre un elemento de fluido. De tal modo

$$\vec{dF} = \vec{dF}_s + \vec{dF}_b = (-\text{grad } p + \vec{p}g) dx dy dz = (-\text{grad } p + \vec{p}g) dV$$

ó sobre la base de un volumen unitario

$$\frac{\vec{dF}}{dV} = -\text{grad } p + \vec{p}g \quad (5.3)$$

Para una partícula de fluido, la segunda ley de Newton produce $\vec{dF} = \vec{a} dm = \vec{a} \rho dV$. En el caso de un fluido estático, $\vec{a} = 0$. De tal modo

$$\frac{\vec{dF}}{dV} = \vec{p}a = 0$$

Sustituyendo para $\overline{dF/dV}$ de la ecuación (5.3), obtenemos

$$-\text{grad } p + \vec{p}g = 0 \quad (5.4)$$

Vamos a revisar brevemente nuestra deducción de esta ecuación. El significado físico de cada término es

$$\begin{array}{rcccl}
 -\text{grad} & + & \vec{p}g & = & 0 \\
 \text{fuerza de presión} & & \text{fuerza másica por} & & \\
 \text{neta por unidad} & & \text{unidad de} & & \\
 \text{de volumen en} & + & \text{volumen en} & = & 0 \\
 \text{un punto} & & \text{un punto} & &
 \end{array}$$

Esta es una ecuación vectorial, lo que significa que consta de tres ecuaciones componentes que deben satisfacerse individualmente. Las componentes son

$$\begin{array}{rcl}
 \frac{dp}{dx} + pg_x = 0 & \text{dirección } x & \\
 \frac{dp}{dy} + pg_y = 0 & \text{dirección } y & (5.5) \\
 \frac{dp}{dz} + pg_z = 0 & \text{dirección } z &
 \end{array}$$

En las ecuaciones anteriores (5.5) se describen la variación de presión en cada una de las tres direcciones de coordenadas en un fluido estático. Para simplificar aún más, es lógico elegir un sistema de coordenadas tal que el vector de la gravedad se alinee con uno de los ejes coordenados. Si el sistema de coordenadas se elige tal que el eje z esté dirigido verticalmente, entonces $g_x = 0$, $g_y = 0$ y $g_z = -g$. bajo estas condiciones, las

ecuaciones componentes se convierte en

$$\frac{dp}{dx} = 0 \qquad \frac{dp}{dy} = 0 \qquad \frac{dp}{dz} = 0 \qquad (5.6)$$

Las ecuaciones anteriores (5.6) indican que de acuerdo con las suposiciones hechas, la presión es independiente de las coordenadas x y y , es decir, depende sólo de z . Puesto que p es una función de una sola variable, es posible usar una derivada total en lugar de una derivada parcial. Con estas simplificaciones, estas ecuaciones (5.6) finalmente se reducen a

$$\frac{dp}{dz} = \rho g \equiv -\gamma$$

La ecuación de la hidrostática no solo se cumple solo en el fluido en reposo, sino también en todo plano transversal a la dirección del movimiento, si éste es uniforme.

- Restricciones:
- 1) Fluido estático
 - 2) La gravedad es la única fuerza de cuerpo
 - 3) El eje z es vertical

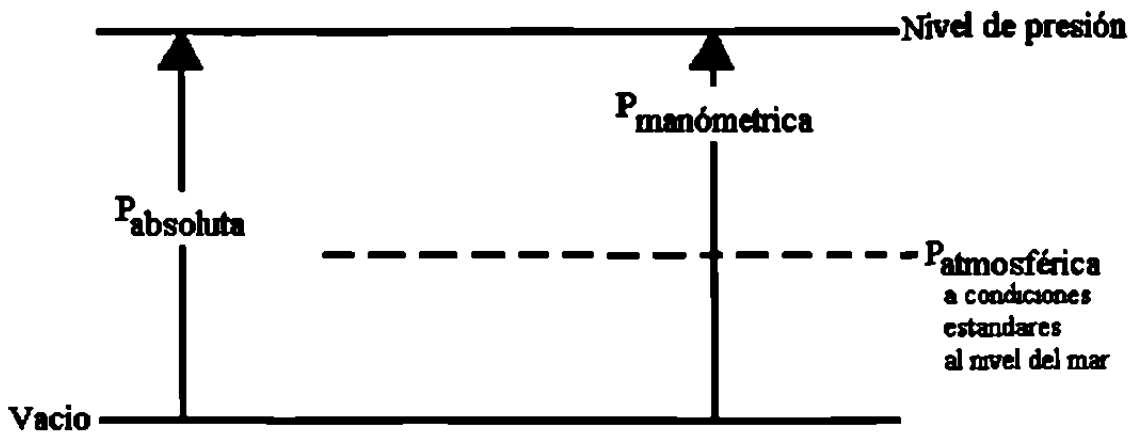
Esta ecuación es la reacción básica de presión-altura de la estática de fluidos, sujeta a las restricciones indicadas. Por ello, debe aplicarse sólo donde estas restricciones sean razonables para la situación física.

Es importante notar que los valores de presión deben establecerse respecto a un nivel de referencia. Si dicho nivel es el vacío, las presiones se denominan *absolutas*, como se indica en la figura de abajo.

La mayor parte de los medidores de presión leen una *diferencia* de presión - la

diferencia entre la presión medida y el nivel del medio ambiente (usualmente la presión atmosférica). Los niveles de presión medidos con respecto a la presión atmosférica se llaman presiones manométricas. De tal modo,

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{manométrica}} + P_{\text{atmosférica}}$$



Las presiones absolutas deben utilizarse en todos los cálculos con gas ideal u otras ecuaciones de estado.

Variaciones de Presión en un Fluido Estático

La variación de presión en un fluido estático se describe mediante la relación básica de presión-altura

$$\frac{dp}{dz} = -pg$$

A pesar de que pg puede definirse como el *peso específico*, γ , se ha escrito como pg en la ecuación para subrayar que *ambas*, p y g , deben considerarse variables. Con el fin de integrar la ecuación para encontrar la distribución de presión, deben hacerse suposiciones acerca de las variaciones tanto de p como de g .

Para la mayor parte de las situaciones prácticas de ingeniería, la variación en g es despreciable. Sólo para una situación tal como el cálculo muy preciso del cambio de la presión en una diferencia grande de altitud, sería necesario incluir la variación de gravedad. a menos que se establezca de otro modo, asumiremos que gravedad será constante con respecto a la altitud en cualquier posición dada.

En muchos problemas prácticos de ingeniería, la variación en p es apreciable y se requieren resultados precisos que lo conformen.

Para un fluido incompresible, $\rho = \text{constante}$. Entonces para gravedad constante,

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g = \text{constante}$$

Para determinar la variación de presión, debemos integrar y aplicar condiciones de frontera apropiadas. Si la presión en el nivel de referencia, Z_0 , se designa como p_0 , entonces la presión, p , en la posición z , se encuentra mediante integración

$$\int_{p_0}^p dp = - \int_{z_0}^z \rho g dz$$

$$p - p_0 = \rho g (z - z_0) = \rho g (z_0 - z)$$

Para líquidos, a menudo es conveniente tomar el origen del sistema de coordenadas en la superficie libre (nivel de referencia) y medir las distancias como positivas hacia abajo, a partir de la superficie libre. Con h , medida positiva hacia abajo, entonces

$$\begin{aligned} z_0 - z &= h \\ p - p_0 &= \rho g h \end{aligned} \quad (5.7)$$

La ecuación (5.7) indica que la diferencia de presión entre dos puntos en un fluido estático, puede determinarse midiendo la diferencia de altura entre los dos puntos. Los dispositivos utilizados para este propósito reciben el nombre de manómetros.

La presión atmosférica puede obtenerse de un barómetro, en el cual se mide la altura de una columna de mercurio.

Entonces de acuerdo a lo visto en las variaciones de presión la ecuación fundamental de la hidrostática para un fluido incompresible es:

$$\frac{P}{\rho} + zg = c$$

Válida para todo fluido ideal y real con tal que sea incompresible.

Dividiendo todos los términos por (ρg) se obtiene

$$\frac{P}{\rho g} + z = c$$

Aquí la constante c se llama altura piezométrica y se designa con la letra (h).

En todo fluido en reposo la altura piezométrica es constante.

De esta segunda forma siendo densidad (ρ)= cte se deduce la tercera forma.

$$P + \rho gz = c$$

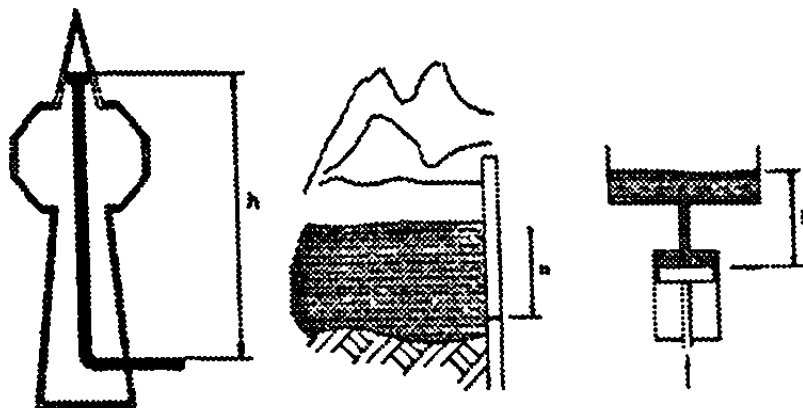
Fuerza Hidrostática Sobre Superficies Sumergidas

Con el fin de determinar por completo la fuerza que actúa sobre la superficie sumergida, debemos especificar:

1. La magnitud de la fuerza.
2. La dirección de la fuerza.
3. La línea de acción de la fuerza resultante.

Debemos considerar superficies sumergidas tanto planas como curvas.

La presión hidrostática, ó simplemente la presión, es independiente de la forma del recipiente y solo depende de la altura y la densidad de la columna del líquido.



Torre

$$h = 300\text{m}$$

$$\rho = 1000\text{kg/m}^3$$

$$g = 9.81\text{m/s}^2 = 10\text{m/s}^2$$

$$p_s = h \cdot \rho \cdot g$$

$$= 300\text{m} \cdot 1000\text{kg/m}^3 \cdot 10\text{m/s}^2$$

$$= 3,000,000 \frac{\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

$$= 3,000,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\underline{P_s = 3,000,000\text{Pa}(30\text{bar})}$$

Embalse

$$h = 15\text{m}$$

$$\rho = 1000\text{kg/m}^3$$

$$g = 9.81\text{m/s}^2 = 10\text{m/s}^2$$

$$p_s = h \cdot \rho \cdot g$$

$$= 15\text{m} \cdot 1000\text{kg/m}^3 \cdot 10\text{m/s}^2$$

$$= 150,000 \frac{\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

$$= 150,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\underline{P_s = 150,000\text{Pa}(1.5\text{bar})}$$

Depósito elevado

$$h = 5\text{m}$$

$$\rho = 1000\text{kg/m}^3$$

$$g = 9.81\text{m/s}^2 = 10\text{m/s}^2$$

$$p_s = h \cdot \rho \cdot g$$

$$= 5\text{m} \cdot 1000\text{kg/m}^3 \cdot 10\text{m/s}^2$$

$$= 50,000 \frac{\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}$$

$$= 50,000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\underline{P_s = 50,000\text{Pa}(0.5\text{bar})}$$

5.2. Ecuación de Continuidad

Las soluciones de las formas diferenciales de las leyes básicas no sólo nos permiten determinar cantidades integrales de interés, sino que a menudo contienen información en sí mismas.

Se emplean dos métodos primarios para deducir las formas diferenciales de las leyes fundamentales. Un método implica aplicar el teorema de Gauss, que permite transformar las integrales de área en integrales de volumen. La otra estrategia consiste en identificar un elemento infinitesimal en el espacio y aplicar las leyes básicas directamente a ese elemento.

En este caso, en el cuál se analizó la ecuación diferencial de continuidad.

La conservación de la masa, aplicada a un elemento infinitesimal, da lugar a la ecuación de la continuidad y relaciona campos de densidad y de velocidad.

- Al hablar de campo significa que una variable depende de otra.

Para un flujo permanente, la masa de fluido que atraviesa cualquier sección de una corriente de fluido, por unidad de tiempo, es constante.

Esta puede calcularse como sigue:

$$\begin{aligned}\rho_1 A_1 V_1 &= \rho_2 A_2 V_2 = cte \\ w_1 A_1 V_1 &= w_2 A_2 V_2 = cte \quad \text{en kg/seg}\end{aligned}$$

Para fluidos incomprensibles y para todos los casos prácticos en que $w_1=w_2$, la ecuación se transforma en:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = cte \quad \text{en m}^3 / \text{seg}$$

donde A_1 y V_1 son, respectivamente, el área de sección recta en m^2 y la velocidad media de la corriente en m/s en la sección 1, con significado análogo a la sección 2.

$$\begin{aligned}
& \left[pu - \frac{d(pu)}{dx} \frac{dx}{2} \right] dydz - \left[pu + \frac{d(pu)}{dx} \frac{dx}{2} \right] dydz \\
& + \left[pv - \frac{d(pv)}{dy} \frac{dy}{2} \right] dx dz - \left[pv + \frac{d(pv)}{dy} \frac{dy}{2} \right] dx dz \\
& + \left[pw - \frac{d(pw)}{dz} \frac{dz}{2} \right] dx dy - \left[pw + \frac{d(pw)}{dz} \frac{dz}{2} \right] dx dy \\
& = \frac{d}{dt} [p dx dy dz]
\end{aligned}$$

Restando los términos apropiados y dividiendo entre $dx dy dz$ obtenemos

$$\frac{d}{dx}(pu) + \frac{d}{dy}(pv) + \frac{d}{dz}(pw) = -\frac{dp}{dt} \quad (5.9)$$

Puesto que la densidad se considera variable, diferenciamos los productos y escribimos la ecuación (5.9) en la forma

$$\frac{dp}{dt} + u \frac{dp}{dx} + v \frac{dp}{dy} + w \frac{dp}{dz} + \rho \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) = 0$$

ó bien, en términos de la derivada sustancial,

$$\frac{Dp}{Dt} + \rho \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) = 0$$

Esta es la forma preferida de la ecuación diferencial de continuidad.

Podemos introducir el operador gradiente, llamado “nabla” ó “del”, que, en coordenadas rectangulares es

$$\nabla = \frac{d}{dx} \hat{i} + \frac{d}{dy} \hat{j} + \frac{d}{dz} \hat{k}$$

La ecuación de continuidad puede escribirse entonces en la forma

$$\frac{Dp}{Dt} + \rho \nabla \cdot V = 0 \quad (5.10)$$

donde $V = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ y $\nabla \cdot V$ es la divergencia de la velocidad. Esta forma de la ecuación de continuidad no hace referencia a ningún sistema de coordenadas específico;

es la forma empleada para expresar la ecuación de continuidad empleando diversos sistemas de coordenadas.

En el caso de un flujo incompresible, en la que la densidad de una partícula de fluido no cambia durante su trayecto, vemos que

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{d\rho}{dt} + u \frac{d\rho}{dx} + v \frac{d\rho}{dy} + w \frac{d\rho}{dz} = 0 \quad (5.11)$$

Observe que esto es menos restrictivo que el supuesto de densidad constante, que requeriría que todos los términos de la ecuación (5.11) fueran cero. Los flujos incompresibles que tienen gradientes de densidad a veces se denominan flujos estratificados; los flujos atmosféricos y oceánicos son ejemplos de flujos estratificados. Empleando la ecuación (5.11), la ecuación de continuidad para un flujo incompresible adopta la forma

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad (5.12)$$

ó, en forma vectorial,

$$\nabla \cdot V = 0$$

La divergencia del vector de velocidad es cero para un flujo incompresible.

Ecuación de Continuidad

Ecuación de continuidad para un hilo de corriente

En un hilo de corriente

- No entra ni sale fluido lateralmente porque la velocidad es tangencial al hilo de corriente;
- En régimen permanente el hilo de corriente es estacionario;
- No se crea ni destruye masa, ni puede haber concentración ó dilución de masa en ninguna sección del mismo, porque ello supondría aumento ó disminución de densidad del fluido en dicha sección, lo que es imposible en régimen permanente;

luego la masa que entra en el tubo infinitesimal es igual a la masa que sale. Por tanto

$$\rho_1 c_1 = d = p_2 c_2 dA_2 = p_3 c_3 dA_3 = c$$

donde c_1 , c_2 y c_3 componentes normales de las velocidades en las secciones 1, 2 y 3.

ó también, siendo $v = \frac{1}{\rho}$. Donde v - volumen específico:

Ecuación de Continuidad para Fluido Compresible e Incompresible y un Hilo de Corriente (1ª Forma)

$$\frac{c_1 dA_1}{v_1} = \frac{c_2 dA_2}{v_2} = \frac{c_3 dA_3}{v_3} = c$$

Si el fluido es incompresible, p y v serán constantes, y por tanto

Ecuación de Continuidad para un Fluido Incompresible Solamente y un Hilo de Corriente (1ª Forma)

$$c_1 dA_1 = c_2 dA_2 = c_3 dA_3 = c$$

En la mecánica del fluido compresible (termodinámica) se utiliza la variable G , llamada caudal másico.

Ecuación de dimensiones

$$[G] = [m [T]^{-1}]$$

Unidad:

$$1G = 1 \frac{kg}{s} SI$$

En un filamento de corriente

$$dG = p dQ = p c dA = \frac{c dA}{v}$$

Ecuación de Continuidad para Fluido Compresible e Incompresible y un Hilo de Corriente (2ª Forma)

$$dG = \frac{cdA}{v} = c$$

Ecuación de Continuidad para un Fluido Incompresible y un Hilo de Corriente (2ª Forma)

$$dQ = cdA = c$$

Sólo en fluido incompresible el caudal volumétrico que atraviesa una sección transversal cualquiera de un filamento de corriente es constante; pero en todo fluido tanto compresible como incompresible el caudal másico es constante.

Ecuación de continuidad del fluido incompresible para un tubo de corriente.

La ecuación de continuidad para un tubo de corriente y un fluido incompresible, se obtiene integrando

$$Q = \int dQ = \int cdA = c$$

Donde c - componente normal de la velocidad en cada elemento dA , que coincide con la Ecuación (5-1) antes aducida.

Formula Practica de la Ecuación de Continuidad

$$Q = A\bar{c} = c$$

donde Q - caudal volumétrico

A - área de una sección transversal del tubo

c - velocidad media normal a la sección considerada.

5.3. Ecuación de Bernoulli

En 1738 Daniel Bernoulli, demostró un teorema general en conexión con el movimiento de los fluidos, la importancia de la cual no se puede dejar de enfatizar demasiado. Con este teorema, como base fundamental, puede, erigirse toda una

estructura sobre el movimiento de los fluidos, y con ella puede resolverse completamente la mayor parte de los problemas que se presentan.

Conservación de la Energía – Ecuación de Bernoulli

En física aprendimos que la energía no puede ser creada ni destruida, sino que puede ser transformada de un tipo a otro. Este es el enunciado de la ley de conservación de la energía.

Cuando se analizan problemas de flujo en conductos, existen tres formas de energía que siempre hay que tomar en consideración. Tome un elemento de fluido, que puede estar dentro de un conducto de un sistema de flujo. Puede estar localizado a una cierta elevación z , tener una cierta velocidad v y una presión p . El elemento de fluido tendrá las siguientes formas de energía:

1. **Energía potencial**. Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es:

$$PE = wz \quad (5.13)$$

En la que w es el peso del elemento.

2. **Energía cinética**. Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es:

$$KE = wv^2 / 2g \quad (5.14)$$

3. **Energía de flujo**. En ocasiones conocida como *energía de presión ó trabajo de flujo*, está representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión p . La energía de flujo se abrevia (Flow Energy) y se calcula a partir de la ecuación:

$$FE = wp / \gamma \quad (5.15)$$

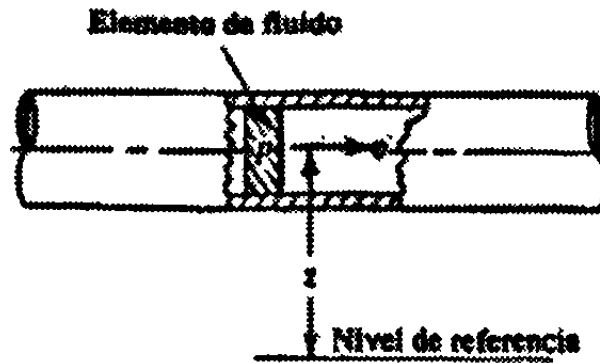


Figura 5.2 Elemento de fluido en el conducto que se traslada

La ecuación (5.15) puede ser derivada de la manera siguiente. En la figura (5.3) se muestra el elemento de fluido en el conducto que se traslada a través de una sección. La fuerza que actúa sobre el elemento es pA , en la que p es la presión en la sección y A es su área. Al trasladar el elemento a través de la sección, la fuerza se mueve una distancia L igual a la longitud del elemento. En consecuencia, el trabajo hecho es:

$$\text{Trabajo} = pAL = pV$$

En donde V es el volumen del elemento. El peso del elemento, w , es:

$$w = \gamma V$$

en la que γ es el peso específico del fluido. Entonces, el volumen del elemento es:

$$V = w/\gamma$$

y tenemos:

$$\text{Trabajo} = pV = pw/\gamma.$$

Al cual se le llama energía de flujo en la ecuación (5.15).

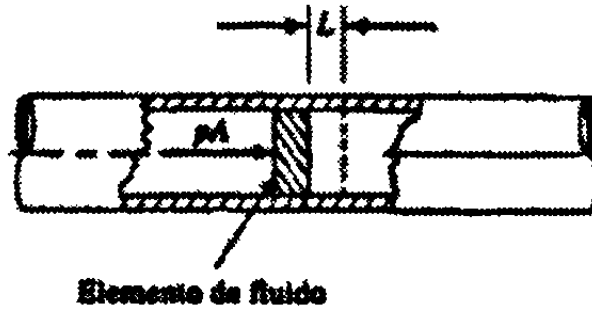


Figura 5.3 Elemento de fluido en el conducto que se traslada a través de una sección

La cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido será la suma, representada con E :

$$\begin{aligned} E &= FE + PE + KE \\ &= wp/\gamma + wz + wv^2/2g \end{aligned}$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía, newton-metro (Nm) en el Sistema Internacional ó en pies-libra (pie/lb) en el Sistema Británico de Unidades.

Considere ahora el elemento de fluido de la figura (5.4), que se mueve de la sección 1 a la sección 2. Los valores de p , z y v son diferentes en las dos secciones.

En la sección 1, la energía total es:

$$E_1 = wp_1/\gamma + wz_1 + wv_1^2/2g$$

En la sección 2, la energía total es:

$$E_2 = wp_2/\gamma + wz_2 + wv_2^2/2g$$

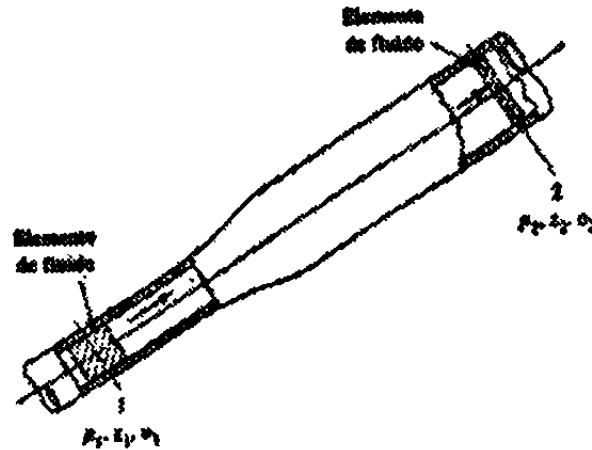


Figura 5.4 Elemento de fluido en el conducto que se traslada de la sección 1 a la sección 2

Si no se agrega energía al fluido ó se pierde entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía requiere que:

$$E_1 = E_2$$

$$wp_1/\gamma + wz_1 + wv_1^2/2g = wp_2/\gamma + wz_2 + wv_2^2/2g$$

El peso del elemento, w , es común a todos los términos y se la puede cancelar. La ecuación, entonces, se convierte en:

$$P_1/\gamma + z_1 + v_1^2/2g = P_2/\gamma + z_2 + v_2^2/2g \quad (5.16)$$

A ésta se le conoce como *ecuación de Bernoulli*.

Interpretación de la Ecuación de Bernoulli.

Cada término de la ecuación de Bernoulli (5.16) es el resultado de dividir una expresión de la energía entre el peso de un elemento del fluido. Por consiguiente, es apropiado referirse a las formas resultantes como la energía poseída por el fluido por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema. Las unidades de cada término pueden

ser newton-metro por newton (Nm/N) en el Sistema Internacional y libras-pies por libra (lb.pie/lb) en el Sistema Británico de Unidades.

Pero la unidad de peso, el newton (N) ó la libra (lb), pueden cancelarse, dejando solamente una unidad de longitud, el metro (m) ó el pie. Por tanto, los términos de la ecuación de Bernoulli se conocen, a menudo, como “cabezas”, refiriéndose a una altura por encima de un nivel de referencia. El término p/γ se conoce como cabeza de presión; a z se le llama cabeza de elevación; y al término $v^2/2g$ se le conoce como cabeza de velocidad. La suma de las tres se conoce como cabeza total. Debido a que cada término representa una altura, un diagrama parecido al que se presenta en la figura (5.5) es de utilidad para visualizar la relación entre los tres tipos de energía. Observe que, debido a la suposición de que no se pierde ó se agrega energía, la cabeza total permanece a un nivel constante. Entonces, la altura relativa de cada término de cabeza varía según lo establecido por la ecuación de Bernoulli.

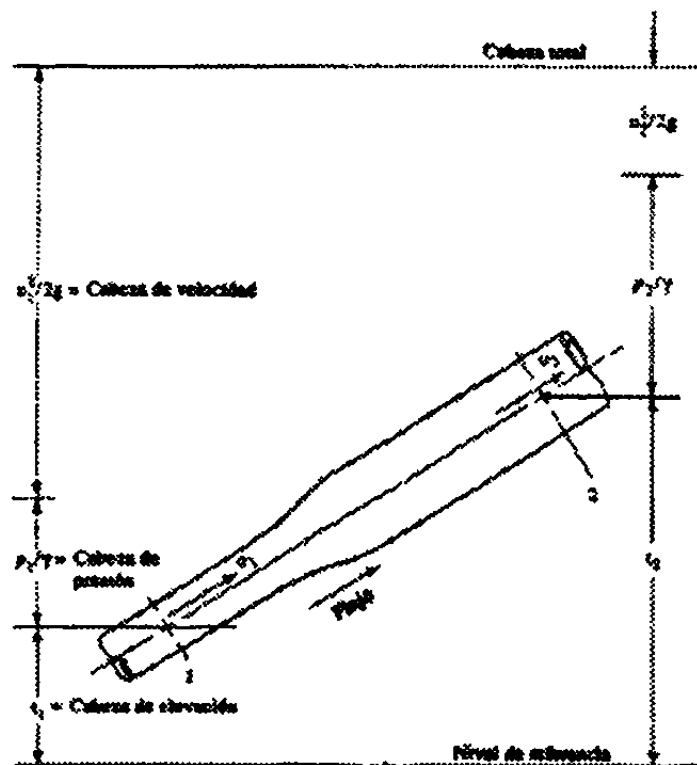


Figura 5.5 Relación entre los tres tipos de energía

En la figura (5.5) usted verá que la cabeza de velocidad en la sección 2 será menor que en la sección 1. Esto se puede mostrar mediante la ecuación de continuidad,

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = v_1 (A_1/A_2)$$

Puesto que $A_1 < A_2$, v_2 debe ser menor que v_1 . Y como la velocidad está al cuadrado en el término correspondiente a la cabeza de velocidad, $v_2^2/2g$ es mucho menor que $v_1^2/2g$.

Típicamente, cuando el tamaño de la sección se expande como lo hace en la figura (5.5), la cabeza de presión aumenta debido a que disminuye la cabeza de velocidad. Esta es la forma en que se construyó la figura (5.5). Sin embargo, el cambio real también se ve afectado por el cambio en la cabeza de elevación.

En suma, la ecuación de Bernoulli explica el cambio en las cabezas de elevación, de presión y de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido. Se supone que no existen pérdidas ó ganancias de energía entre los dos puntos, de modo que la cabeza total permanece constante.

Cuando se escribe la ecuación de Bernoulli, es esencial que la presión en los dos puntos de referencia se expresen ambas como presiones absolutas ó como presiones manométricas. Es decir, deben tener las dos la misma presión de referencia. En la mayoría de los problemas será conveniente utilizar la presión manométrica, pues partes del sistema de fluido expuestas a la atmósfera tendrán entonces presión cero. Se tiene también que la mayoría de las presiones son medidas con un manómetro con respecto a la presión atmosférica local.

Restricciones de la Ecuación de Bernoulli.

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de problemas prácticos, existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta con el fin de aplicar la ecuación de manera correcta.

- Es válida solamente para fluidos incompresibles, puesto que el peso específico del fluido se tomó como el mismo en las dos secciones de interés.
- No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que pudieran agregar ó eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante.
- No puede haber transferencias de calor hacia dentro ó fuera del fluido.
- No puede haber pérdidas de energía debido a la fricción.

En realidad, ningún sistema satisface todas estas restricciones. Sin embargo, existen muchos sistemas para los cuales solamente se tendrá un error despreciable cuando se les aplica la ecuación de Bernoulli. Por otro lado, el uso de tal ecuación puede permitir una rápida estimación de un resultado, cuando eso es todo lo que se necesita.

Aplicaciones de la Ecuación de Bernoulli.

Procedimiento para la aplicación de la ecuación de Bernoulli.

- A. Determine qué elementos son conocidos y qué se va a encontrar.
- B. Decida cuáles dos secciones del sistema se utilizarán cuando se escriba la ecuación de Bernoulli. Se escoge una sección de la cual se conocen muchos datos. La segunda es, por lo general, la sección en la cual se debe calcular algo.

- C. Escriba la ecuación de Bernoulli para las dos secciones elegidas en el sistema. Es importante que la ecuación se escriba en la dirección del flujo. Es decir, el flujo debe ir de la sección de la parte izquierda de la ecuación a la de la parte derecha.
- D. Simplifique la ecuación, si es posible, mediante la cancelación de los términos cuyo valor es cero ó de aquellos que son los mismos en ambos lados de la ecuación.
- E. Resuelva la ecuación algebraicamente para el término deseado.
- F. Sustituya las cantidades conocidas y calcule el resultado, tome la precaución de asegurar el uso de unidades consistentes a lo largo del cálculo.

5.4 Ecuación de Torricelli

Torricelli, Evangelista (Biografía)

Físico y matemático de origen italiano nacido en Francia (1608-1647); discípulo de Castelli y sucesor de Galileo. Demostró los efectos de la presión atmosférica e inventó el barómetro en el año de 1643.

El barómetro mide la presión del aire. Descubrió que la presión del aire hace que el mercurio, en un tubo, suba hasta una cierta altura. Esta altura mide la presión del aire.

Torricelli llenó de mercurio un largo tubo de vidrio, cerrado por su parte superior; luego lo puso boca abajo en una cubeta del mismo líquido. La presión que ejerce el aire en la superficie de mercurio del plato, sostenía el mercurio contenido en el tubo. Este científico se dió cuenta de que la altura de la columna variaba de un día a otro, según la presión atmosférica que actuaba sobre la cubeta. Midiendo la altura de la columna de mercurio, pudo medir la presión del aire. Se formaba un vacío en el tubo, encima del mercurio, era el primer vacío que se producía. En matemáticas fue precursor del cálculo infinitesimal.

El Barómetro de Mercurio.

Un barómetro es un aparato para medir la presión atmosférica. Hoy en día hay dos clases de barómetros de uso común: el barómetro de mercurio y el barómetro aneroide. El barómetro de mercurio fue inventado por el físico italiano Evangelista Torricelli, hace 300 años. El experimento de Torricelli está ilustrado en la figura de abajo. Un tubo largo de vidrio se llena con mercurio y se pone el dedo sobre uno de los extremos, como se muestra en el diagrama (a). Entonces se invierte este tubo con el extremo abierto dentro de una vasija llena de mercurio, se quita el dedo como el diagrama (b). En el instante en que se quita el dedo, el nivel del mercurio desciende en el tubo a una altura h , como se indica. El mercurio baja hasta que la presión debida a su propio peso dentro del tubo (al nivel P) es igual a la presión atmosférica en el exterior.

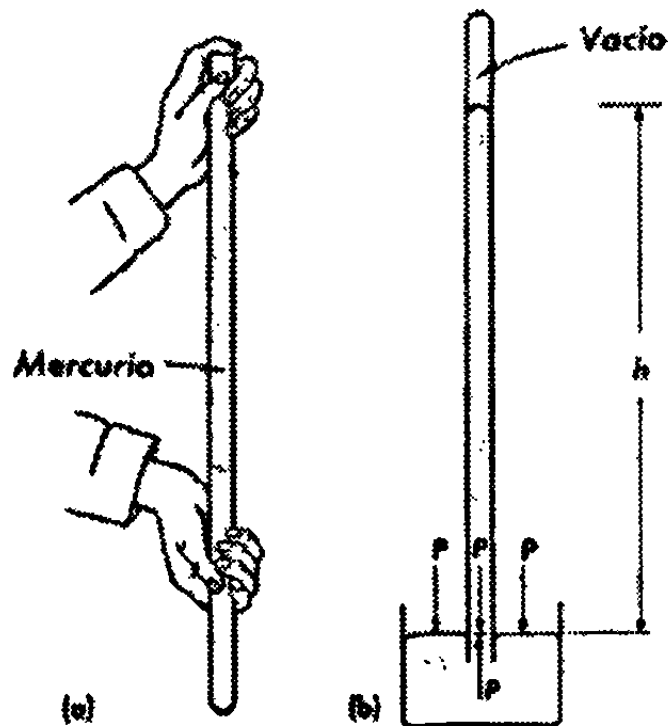


Figura 5.6 Experimento de Torricelli

Al nivel del mar, la altura a la cual la columna de mercurio se detiene, es de unos 76 cm ó 30 in. Esta altura será la misma sin importar el diámetro del tubo ó la longitud del espacio vacío en la parte superior.

El experimento de Torricelli demuestra que una columna de aire de sección transversal de 1 cm^2 y que llega a la parte más elevada de la atmósfera, es igual al peso de una columna de mercurio de la misma sección transversal y de 76 cm de altura.

Fue el filósofo e insigne matemático francés Blas Pascal, el primero en demostrar que cuando se lleva un barómetro a una gran elevación, como la cima de una montaña, la altura de la columna de mercurio desciende considerablemente. Este descenso se debe a que hay menos aire encima de ese punto y, por lo tanto, menor presión hacia abajo sobre la superficie libre del mercurio.

Velocidad a Través de un Orificio.

Muchos sistemas urbanos de abastecimiento de agua, almacenan ésta en depósitos sobre una colina ó en una torre cercana y desde esas fuentes, el líquido corre a través de tuberías hasta los hogares, tiendas y fábricas, dentro y alrededor de la ciudad. A tal disposición se le llama “sistema por gravedad”.

Cuando se abre un agujero en uno de los dos lados de un recipiente que contiene un líquido, la velocidad del flujo a través del orificio aumenta con la profundidad. Aquí, la fuerza no equilibrada que pone al líquido en movimiento, es la gravedad, que actúa por conducto del líquido como presión.

Ya hemos visto como la presión a cualquier profundidad está expresada por $P = h\rho g$ y es la misma en todas las direcciones. A una profundidad h_1 , el líquido ejerce

una presión P_1 contra las paredes, y las paredes ejercen una presión igual, pero opuesta, contra el líquido.

En el instante que se hace una abertura en uno de los lados del recipiente, se destruye la presión de la pared en ese punto y la presión del líquido interior le empuja directamente frente al agujero, dándole una aceleración hacia fuera y normal al plano del orificio. Para encontrar la velocidad de escape, consideremos la energía potencial del líquido en el recipiente, primero cuando se abre el agujero, y luego, un poco tiempo después, cuando ha escapado una pequeña cantidad de líquido, bajando el nivel de la superficie una distancia t .

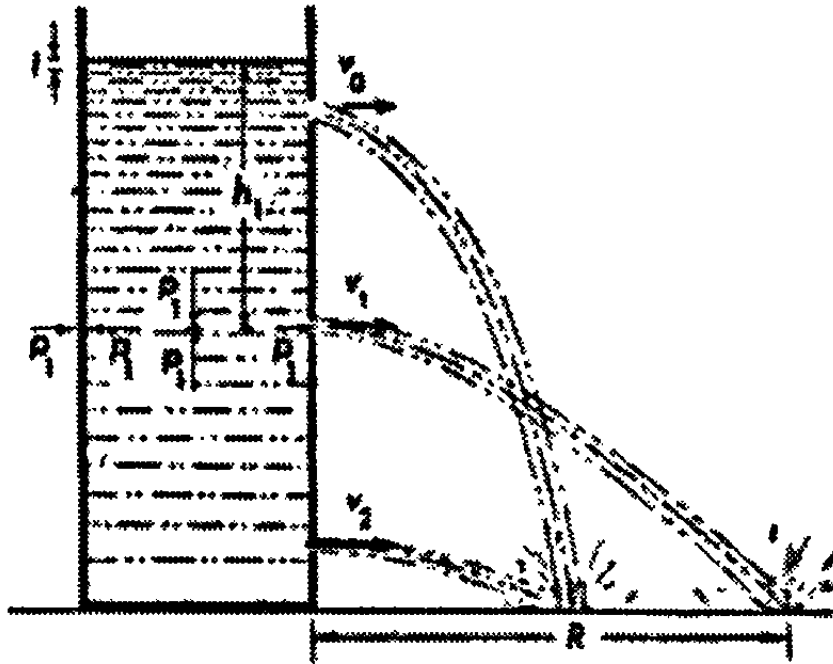


Figura 5.7 Velocidad a través de un orificio

Por lo que respecta a la energía, el cambio es el mismo como si la capa superior del agua hubiera descendido a una distancia h_1 y su energía potencial mgh_1 convertida en energía cinética $\frac{1}{2}mv_1^2$ al convertirse en corriente emergente.

Por la ley de la conservación de la energía,

$$mgh_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (5.17)$$

Puesto que m es la misma en ambos miembros, se pueden dividir por m y obtener

$$v_1 = \sqrt{2gh_1} \quad (5.18)$$

la misma de la ley de la caída de los cuerpos. En otras palabras, la velocidad de flujo a cualquier profundidad h es equivalente a la velocidad que se adquiere por la caída libre desde la misma altura.

Esta relación fue descubierta por Torricelli, y se conoce como el *teorema de Torricelli*.

Es interesante señalar que la trayectoria parabólica seguida por una corriente emergente es tal, que la de mayor alcance horizontal, R (véase el dibujo), se obtiene desde un orificio a la mitad de altura entre el nivel de la base del recipiente y la superficie superior del líquido, y las de los agujeros equidistantes arriba y abajo de ese punto tienen alcances menores, pero iguales entre sí.

Medición de la Velocidad de una Corriente.

Un método para medir la velocidad del agua en un canal ó cauce de un río, es usar un tubo en forma de L llamado "*tubo de pilot*". Si el agua estuviera en reposo, subiría por el brazo vertical hasta la altura de la superficie exterior.

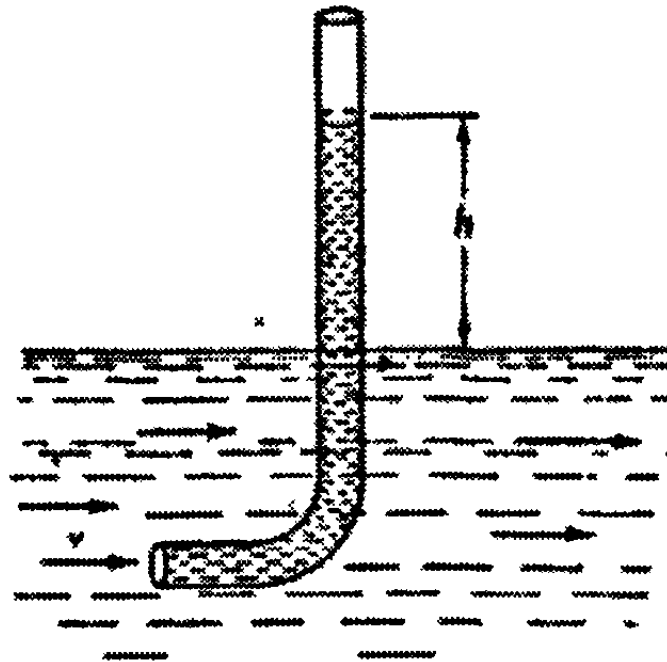


Figura 5.8 Tubo de Pilot

La presión ejercida al moverse la corriente, sin embargo, eleva el agua hasta una altura h , arriba de la superficie. Esto se puede reconocer como la *inversa del teorema de Torricelli*, la altura h mide la velocidad del movimiento de la corriente por la ecuación (5.17).

Obtenemos:

$$h = v^2/2g \quad (5.19)$$

El término de la derecha $v^2/2g$ se llama *carga de velocidad* (potencial de caída) de la corriente móvil.

El método más simple para medir la velocidad de un chorro de agua es voltearla hacia arriba y, por la altura a que se eleva, calcular la velocidad según la ley de la caída de los cuerpos, ecuación (5.18).

5.5 Principio de Arquímedes

La figura (5.9a) muestra cierto volumen de agua contenida en una bolsa de plástico delgado situado bajo el agua. El agua de la bolsa está en equilibrio estático. Por lo tanto, su peso debe estar equilibrado por una fuerza hacia arriba de igual magnitud. Esta fuerza hacia arriba es la suma vectorial de todas las fuerzas hacia adentro ejercidas por el fluido que rodea a la bolsa. Las flechas de la figura (5.9a) representan a las fuerzas ejercidas sobre el volumen de líquido como resultado de la presión del fluido que lo rodea. Nótese que las fuerzas hacia arriba sobre el fondo de la bolsa son más grandes que las fuerzas hacia abajo sobre la parte superior, debido a que la presión aumenta con la profundidad. La fuerza neta hacia arriba que resulta de esta diferencia de presiones se denomina fuerza de flotación ó empuje.

La presión ejercida sobre un objeto sumergido por el líquido que lo rodea ciertamente no depende del material del cuál está hecho el objeto. Por lo tanto, podríamos sustituir la bolsa de agua por un trozo de madera del mismo tamaño y forma exactas, y la fuerza de flotación no cambiaría. La fuerza hacia arriba sigue siendo igual al peso del volumen original de agua. Esto nos conduce al principio de Arquímedes:

Todo cuerpo total ó parcialmente sumergido en un fluido sufre un empuje de abajo arriba por una fuerza de magnitud igual al del peso del fluido que desaloja.

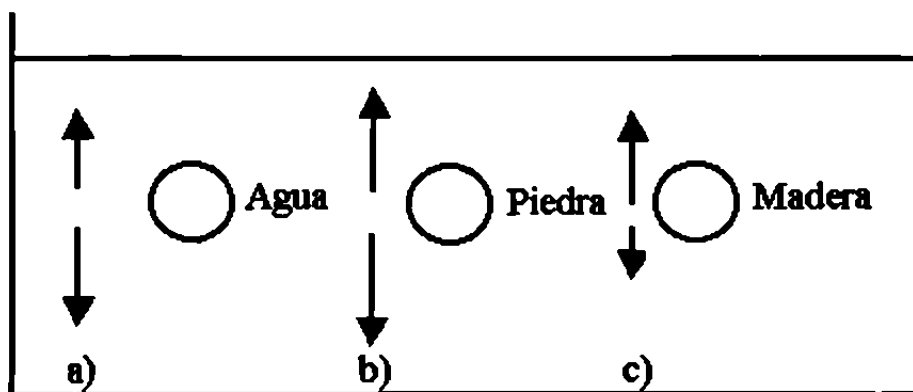


Figura 5.9 Principio de Arquímedes

a) una bolsa de plástico delgado lleno de agua en equilibrio bajo el agua. El agua que rodea a la bolsa ejerce fuerzas de presión sobre su superficie, siendo la resultante una fuerza de rotación ó empuje hacia arriba F_b que actúa sobre la bolsa. b) Para una piedra del mismo volumen, la fuerza de flotación es la misma, pero el peso excede a la fuerza de flotación, y así, la piedra no está en equilibrio. c) En el caso de una pieza de madera del mismo volumen, el peso es menor que la fuerza de flotación.

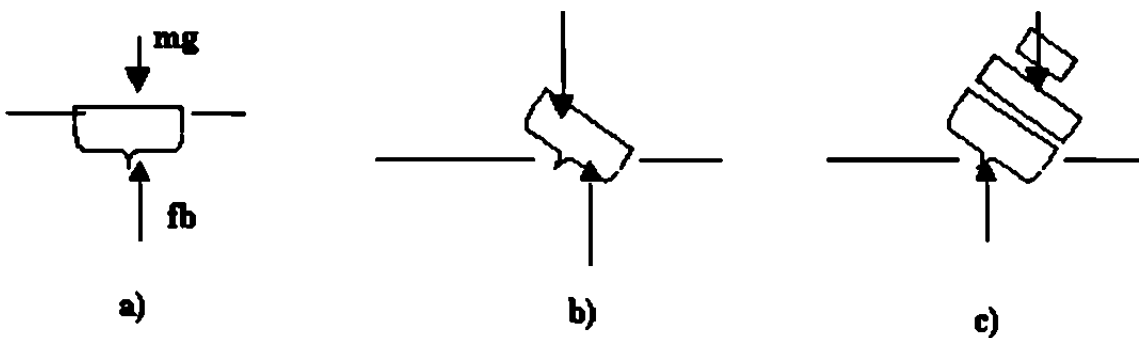


Figura 5.10 Principio de flotación y centro de gravedad

(a) una sección transversal de un barco que flota en posición normal. La fuerza de flotación F_b actúa en el centro de flotación, y el peso actúa en el centro de gravedad. El barco está en equilibrio bajo la acción de las fuerzas. (b) Cuando el barco se ladea, el centro de flotación puede ya no estar situado en la misma línea vertical que el centro de gravedad, y puede actuar una torca neta sobre el barco. Aquí, la torca con respecto al centro de gravedad actúa para regresar al barco a la posición normal. (c) Aquí, el centro de gravedad está situado más arriba de modo que la torca respecto a este debido a la fuerza de flotación tiende a ladear al barco aún más.

Un objeto de mayor densidad que el agua (figura 5.9b) desaloja un volumen de agua cuyo peso es menor que el peso del objeto. Por lo tanto, el objeto se hunde en el agua, porque la fuerza del empuje es menor que el peso del objeto. Si tratamos de elevar el

objeto mientras esté bajo el agua, encontramos que exige menos fuerza que el peso normal del objeto, siendo la diferencia la fuerza del empuje. Los objetos sumergidos parecen pesar menos de lo que pesan normalmente. Los astronautas se preparan para sus viajes practicando tareas en grandes tanques bajo el agua, para simular un tanto la condición de ingravidez en el espacio.

Un objeto de densidad menor que el agua (figura 5.9c) experimenta una fuerza neta hacia arriba cuando está completamente sumergido, porque el peso del agua desalojada es mayor que el peso del objeto. Por lo tanto, el objeto se eleva hasta subir a la superficie, y continúa elevándose hasta que la parte de él que quede sumergida sea del volumen necesario para desalojar el agua cuyo peso es igual al peso total del objeto. En esta situación el objeto flota en equilibrio.

La fuerza de flotación puede verse como si actuase en el centro de gravedad del fluido desalojado por la parte sumergida de un objeto flotante. Este punto se conoce como centro de flotación. El peso actúa en el centro de gravedad de todo el objeto. Estos dos puntos no son en general los mismos (figura 5.10a). Si los dos puntos están situados en la misma línea vertical, entonces el objeto puede flotar en equilibrio: tanto la fuerza neta como la torca neta son nulos. Si el objeto flotante se ladea ligeramente sacándolo de su posición de equilibrio, entonces la forma total del fluido desalojado cambia, y el centro de flotación cambia su posición con respecto al centro de gravedad del objeto flotante. Así pues, sobre el objeto flotante actúa una torca que podría inclinar al objeto nuevamente hacia su posición de equilibrio (figura 5.10b), ó podría actuar en la otra dirección para volcarlo completamente (figura 5.10c).

Un principio fundamental de la hidrostática es el principio de Arquímedes, que nos permite explicar el hecho de que los cuerpos floten en los fluidos.

El principio de Arquímedes es también una consecuencia de la dependencia de la presión, dentro del fluido, con la profundidad. Por ello vamos a comenzar el análisis a partir de la expresión de la presión con la profundidad, en el fluido:

$$P - P_0 = \rho g h$$

Supongamos que tenemos un cuerpo, en forma de cubo de lado H. Lo sumergimos totalmente en un líquido, de forma que su superficie superior esté a una profundidad h de la superficie del líquido. Sobre la superficie superior del cuerpo actúa una presión de $\rho g h$ y por lo tanto la fuerza sobre esa superficie será de.

$$F_1 = \rho g h A \quad \text{dirigida hacia abajo. } A \text{ es el área de la superficie superior del cuerpo.}$$

Sobre la superficie inferior del cuerpo actúa una presión de $\rho g (h + H)$, pues recordemos que ésta superficie está a diferente profundidad, que la superficie superior. La fuerza total sobre la superficie inferior del cuerpo será de:

$$F_2 = \rho g (H + h) A$$

y dirigida hacia arriba. De estas ecuaciones vemos que sobre el cuerpo actúa una fuerza resultante, dirigida hacia arriba y que podemos calcular restando las fuerzas F_2 y F_1 lo que nos daría:

$$E = F_2 - F_1 = \rho g (h + H) A - \rho g h A$$

ó sea:

$$E = \rho g h A \quad \text{que es la llamada fuerza de empuje ó fuerza de flotación (E)}$$

Analizando la expresión de la fuerza de empuje obtenida, vemos que el producto de H por A (altura del cuerpo por el área de su superficie), no es más que el volumen del cuerpo V. $E = \rho g V$. El volumen del cuerpo por la densidad del líquido nos da la masa del líquido desplazada por el cuerpo sumergido. Esta masa multiplicada por la aceleración

de la gravedad nos da el peso del volumen del líquido desplazado por el cuerpo sumergido.

O sea que la fuerza de empuje que recibe el cuerpo, es numéricamente igual al peso del líquido desplazado por el cuerpo.

Ejemplo 1

Determinar la fuerza de empuje que actúa sobre una piedra de 1.6 m^3 de volumen, sumergida en una alberca de agua dulce ($\rho_{\text{agua}}=1000 \text{ kg/m}^3$).

Datos:

$$V=1.6 \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}}=1000 \text{ kg/m}^3$$

$$G=9.8 \text{ m/s}^2$$

Solución:

$$E=g\rho V$$

$$E=9.8 \text{ m/s}^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1.6 \text{ m}^3=15680 \text{ N}$$

Observe que la magnitud de la fuerza de empuje está directamente relacionada con el volumen del cuerpo, y por tanto con el peso del volumen de líquido desplazado por el cuerpo. Si un cuerpo está totalmente sumergido en el líquido desplaza un volumen de líquido igual a su propio volumen. Si está parcialmente sumergido desplaza un volumen de líquido menor que su propio volumen, pero igual al volumen del cuerpo que esté sumergido.

Note que la fuerza de empuje no está relacionada con el peso del cuerpo. Cuerpos de igual volumen, pero diferentes pesos, totalmente sumergidos en un fluido, sufren iguales fuerzas de empuje.

A partir del principio de Arquímedes podemos analizar la flotación de los cuerpos. ¿De qué depende que un cuerpo flote en el agua y otro no? ¿Por qué un cuerpo de madera maciza flota en el agua, pero uno, de igual volumen, de hierro macizo se hunde?.

Para responder estas preguntas debemos partir de que la fuerza que tiende a que el cuerpo flote es la fuerza de empuje (E) y la que tiende a que el cuerpo se hunda es el peso del cuerpo (P). En dependencia de la relación entre estas dos fuerzas se pueden tener tres situaciones:

1. La fuerza de empuje es menor que el peso del cuerpo ($E < P$). En este caso el cuerpo se hundirá.
2. La fuerza de empuje es igual al peso del cuerpo ($E = P$). El cuerpo puede flotar en cualquier posición dentro del fluido.
3. La fuerza de empuje es mayor que el peso del cuerpo ($E > P$). El cuerpo se moverá hacia la superficie del fluido y comenzará a salirse del fluido. Al disminuir el volumen del fluido desplazado disminuirá la fuerza de empuje y cuando sea igual al peso, el cuerpo quedará flotando. En este caso el peso del volumen de fluido desplazado será igual al peso del cuerpo.

Ejemplo 2

Si la densidad de la piedra es de 2800 kg/m^3 , ¿podría flotar la piedra en la alberca?

Datos:

$$V = 1.6 \text{ m}^3$$

$$\rho_s = 2800 \text{ kg/m}^3$$

$$G = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$E = 15680 \text{ N}$$

Solución:

$$W = mg$$

$$W = \rho V g$$

$$W = 2800 \text{ kg/m}^3 \times 1.6 \text{ m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 43904 \text{ N}$$

Como se observa el peso es mayor que el empuje, por lo que la piedra se hundirá en el agua.

$$W > E$$

$$43904 > 15608 \text{ N}$$

Podemos analizar éstas relaciones a partir del concepto de densidad. La densidad del cuerpo es la masa del cuerpo dividida por el volumen del mismo. Observe que no es lo mismo la densidad del cuerpo, que la densidad del material del que esté hecho el cuerpo. Un barco de hierro tiene una densidad menor que la densidad del hierro, ya que no es un cuerpo compacto.

El peso del cuerpo es igual a su densidad (ρ_c), multiplicada por el volumen del cuerpo y por la aceleración de la gravedad (g). La fuerza de empuje es igual a la densidad del fluido (ρ), multiplicada por el volumen (V) del cuerpo y por la aceleración de la gravedad (g).

Por ello comparando ambas fuerzas:

$$P = \rho_c V g$$

$$E = \rho V g$$

De donde puede verse que si la densidad del cuerpo es mayor que la densidad del fluido, el peso del cuerpo será mayor que el empuje ($P > E$) y el cuerpo se hundirá. Si por otra parte la densidad del cuerpo es menor que la del fluido, el peso será menor que el empuje ($P < E$) y el cuerpo flotará.

Ejemplo 3

Un tronco de árbol, con forma de cilindro de 0.25 metros de diámetro y 4 metros de largo, cae al río. Si la densidad de la madera del tronco es de 610 kg/m^3 , determine si el tronco flotará en el agua del río.

Datos:

$$D=0.25 \text{ m}$$

$$L=4 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{madera}}=610 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}}=1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g=9.8 \text{ m/s}^2$$

$$P=mg$$

Peso del tronco.

$$m=\rho_{\text{madera}} V$$

La masa del tronco es igual a la densidad por el volumen.

$$V= \pi r^2 L= \pi d^2 L g/4$$

$$V=3.14 \times (0.25)^2 \times 4\text{m}/4 = 0.1962\text{m}^3$$

El volumen del tronco se calcula por la fórmula del volumen de un cilindro.

$$P=\rho_{\text{madera}} \pi d^2 Lg/4$$

$$P=610 \text{ kg/m}^3 \times 3.14 \times (0.25 \text{ m})^2 \times 4 \text{ m} \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$P=1173.18 \text{ N}$$

La fuerza de empuje, cuando el tronco está completamente sumergido, es igual al peso del volumen del líquido desplazado por todo el tronco:

$$E = \rho_{\text{agua}} Vg$$

$$E = \rho_{\text{agua}} \pi d^2 L g/4$$

$$E = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 3.14 \times (0.25\text{m})^2 \times 4\text{m} \times 9.8\text{m/s}^2/4$$

$$E = 1923.25 \text{ N}$$

Como se ve la fuerza de empuje es mayor que el peso, por lo que el tronco flotará. Observe que se asumió que el volumen del agua desplazada por el tronco es igual al volumen del tronco, considerando que el tronco estaba completamente sumergido. Así el tronco comienza a moverse hacia la superficie del agua y parte de él saldrá del río, quedando una parte dentro del agua y una parte fuera. ¿Qué parte del tronco quedará dentro del agua?

Para responder debemos recordar que la ascensión del tronco se detiene cuando el empuje sea igual al peso del tronco. Por ello:

$$E = \rho_{\text{agua}} V_{\text{sumergido}} g \quad P = \rho_{\text{madera}} Vg$$

Observe que aquí se considera diferente el volumen sumergido ($V_{\text{sumergido}}$) al volumen del tronco completo (V)

$$\rho_{\text{agua}} V_{\text{sumergido}} = \rho_{\text{madera}} V$$

De donde podemos obtener el volumen sumergido:

$$V_{\text{sumergido}} = 610 \text{ kg/m}^3 \times 0.1962\text{m}^3 / 1000 \text{ kg/m}^3 = 0.1197 \text{ m}^3$$

Cada barco, submarino ó dirigible debe diseñarse de tal forma que desplace un volumen de fluido, cuyo peso sea igual al peso propio. Así un barco de 10000 toneladas se construye lo bastante amplio para que desplace 10000 toneladas de agua antes de que

se hunda demasiado. En el caso de los submarinos se varía su peso haciendo entrar agua ó aire en sus tanques interiores; la fuerza de empuje depende de su volumen, que es constante, mientras esté sumergido totalmente. Cuando el submarino debe sumergirse se hace entrar agua en los tanques, aumenta el peso y se sumerge; para mantenerlo a una profundidad constante debe lograrse que el peso sea igual a la fuerza de empuje y para salir a la superficie hay que disminuir el peso, para lo cual expulsan agua de los tanques, mediante aire comprimido. Esto es independiente de los timones, que le permiten variar la profundidad cuando se mueven en el agua.

Las personas que no pueden flotar se debe a que tienen una densidad media de sus cuerpos grande, comparada con la del agua; generalmente son personas musculosas y por ello tienen mayor densidad. Por otra parte en el mar es más fácil flotar que en una alberca, pues el agua de mar tiene mayor densidad que el agua dulce.

Con frecuencia podemos observar a las hojas y a los insectos flotar sobre la superficie de un cuerpo de agua. No se hallan parcialmente sumergidos y por lo tanto no reciben el empuje según enuncia el principio de Arquímedes. En este caso el objeto está en la superficie por completo y nada de él se halla sumergido.

El objeto se mantiene a flote a causa de la tensión superficial del líquido. Podemos demostrar la tensión superficial del agua haciendo flotar con cuidado una aguja de acero ó una hoja de afeitar. Por supuesto, no existe manera de que el acero flote según el principio de Arquímedes, puesto que su densidad es mayor que la del agua, si sumergimos a la aguja ó a la hoja de afeitar, éstas quedarán hundidas tal como lo enuncia el principio de Arquímedes. Solamente podrán flotar cuando estén enteramente en la superficie. Si añadimos al agua un producto químico, llamado agente tenso activo ó surfactante, éste reduce la tensión superficial (al reducir la fuerza de cohesión entre las moléculas), impidiendo así que el objeto flote.

5.6 Ley de Pascal

Cuando oprimimos un tubo de pasta dental, la pasta fluye hacia fuera por la abertura del tubo. Esto demuestra la acción del principio de Pascal. Cuando se aplica presión en cualquier lugar del tubo, ésta se resiste en cualquier lugar del tubo obligando a la pasta a salir de él. He aquí el postulado del principio de Pascal, quién lo presentó por primera vez en 1652:

La presión aplicada a un fluido confinado se transmite íntegramente a todas las partes del fluido y a las paredes del recipiente que lo contiene.

Es decir, si aumentamos en un lugar la presión sobre un fluido en una cantidad Δp cualquier otra parte del fluido experimenta el mismo aumento de presión. El principio de Pascal es la base de la operación de todos los mecanismos transmisores de fuerza hidráulica, tales como los que podrían encontrarse en la maquinaria para el movimiento de tierras ó en el sistema de frenos de un automóvil. Ello nos permite amplificar una fuerza aplicada relativamente pequeña para elevar un peso mucho más grande (como en la plataforma de elevación de automóviles ó en la silla del dentista) y para transmitir fuerzas a grandes distancias hasta lugares relativamente inaccesibles (como en los mecanismos de control de los alerones que se usan en los aeroplanos).

Probaremos el principio de Pascal para un líquido incompresible. La figura (5.11) muestra al líquido dentro del cilindro que ésta equipado con un émbolo. Se aplica al émbolo una fuerza externa, por ejemplo, por medio del peso de algunos objetos apilados sobre él. La fuerza externa da por resultado una presión externa p_{ext} aplicada al líquido que se halla inmediatamente debajo del émbolo. Si el líquido tiene una densidad ρ , entonces según la ecuación (9), podemos escribir la presión en un punto arbitrario P a una distancia h bajo la superficie:

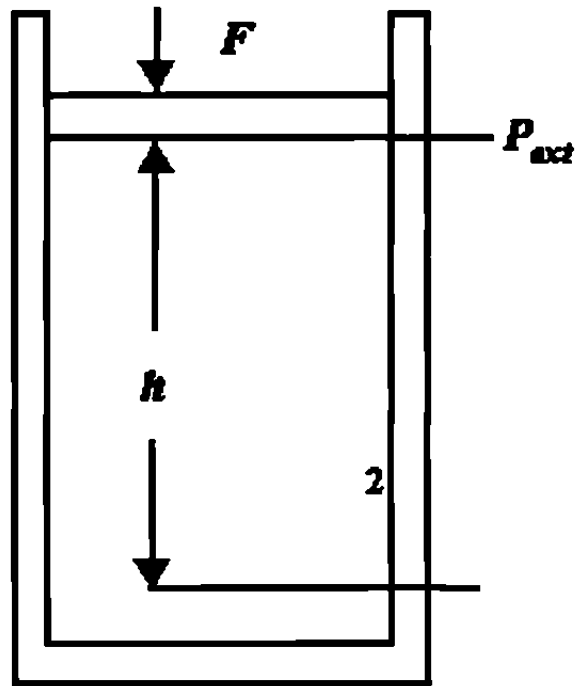


Figura 5.11 Principio de Pascal

$$p = p_{ext} + \rho gh \quad (5.20)$$

Supongamos ahora que la presión externa aumenta en una cantidad Δp_{ext} , quizá por haber añadido algo de más peso sobre el émbolo. ¿Cómo cambia la presión p en el fluido como resultado de este cambio en la presión externa? Suponemos que el líquido es incompresible, de modo que la densidad ρ permanece constante. El cambio en la presión externa da por resultado un cambio en la presión del fluido que se deduce de la ecuación (5.20):

$$\Delta P = \Delta p_{ext} + \Delta(\rho gh) \quad (5.21)$$

Puesto que el líquido es incompresible, la densidad es constante, y el segundo término a la derecha en la ecuación (5.21) es igual a cero. En este caso, obtenemos

$$\Delta p = \Delta p_{ext} \quad (5.22)$$

El cambio de presión en cualquier punto del fluido es sencillamente igual al cambio de la presión externa aplicada. Este resultado confirma el principio de Pascal y demuestra que se deduce directamente de nuestra consideración previa de presión estática en un fluido. Por lo tanto no es un principio independiente sino una consecuencia directa de nuestra formulación de la estática de los fluidos.

Si bien hemos derivado el resultado anterior para los líquidos incompresibles, el principio de Pascal se cumple en todos los casos de fluidos reales (compresibles), ya sean gases ó líquidos. El cambio en la presión externa causa un cambio en la densidad que se propaga en el fluido como una onda a la velocidad del sonido, pero una vez que la perturbación termina y se establece el equilibrio, se encuentra que el principio de Pascal permanece válido.

La palanca hidráulica

La figura (5.13) muestra un dispositivo que se muestra a menudo para levantar un objeto pesado, como un automóvil. Sobre un pistón de área A_i se ejerce una fuerza externa F_i . El objeto que va a ser levantado ejerce una fuerza mg sobre el émbolo grande de área A_o . En equilibrio, la magnitud de la fuerza hacia arriba F_o ejercida por el fluido por el émbolo grande debe ser igual a la de la fuerza hacia abajo mg del peso del objeto (despreciando el peso del propio cuerpo). Deseamos hallar la relación entre la fuerza F_i aplicada y la “fuerza de salida” F_o que el sistema puede ofrecer sobre el émbolo grande.

La presión sobre el fluido en el émbolo pequeño, debido a nuestra fuerza externa aplicada, es $p_i = F_i / A_i$. De acuerdo con el principio de Pascal, esta presión de entrada debe ser igual a la presión de salida $p_o = F_o / A_o$, que el fluido ejerce sobre el émbolo grande. Entonces $p_i = p_o$, y entonces

$$\frac{F_i}{A_i} = \frac{F_o}{A_o}$$

O sea

$$F_i = F_o \frac{A_i}{A_o} = mg \frac{A_i}{A_o} \quad (5.23)$$

La razón A_i/A_o es generalmente mucho menor de 1 y entonces la fuerza aplicada puede ser mucho menor que el peso mg que está siendo levantado.

El movimiento hacia abajo del émbolo pequeño a lo largo de una distancia d_i desplaza un volumen de fluido $V = d_i A_i$. Si el fluido es incompresible, entonces este volumen debe ser igual al volumen desplazado por el movimiento hacia arriba del émbolo grande:

$$V = d_i A_i = d_o A_o$$

ó

$$d_o = d_i \frac{A_i}{A_o} \quad (5.24)$$

Si A_i/A_o es un número pequeño, entonces la distancia a la que se desplaza el émbolo grande es mucho más pequeña que la distancia a la que se desplaza el émbolo pequeño a causa de la fuerza aplicada. El precio que pagamos por la posibilidad de levantar una carga grande es el de perder la posibilidad de trasladarla muy lejos.

Al combinar las ecuaciones (5.23) y (5.24) vemos que $F_i d_i = F_o d_o$, lo cual demuestra que el trabajo efectuado por la fuerza externa sobre el émbolo pequeño es igual al trabajo efectuado por el fluido sobre el émbolo grande. Entonces, (despreciando la fricción y otras fuerzas disipativas) no existe una ganancia (ó pérdida) neta de energía al usar este sistema hidráulico.

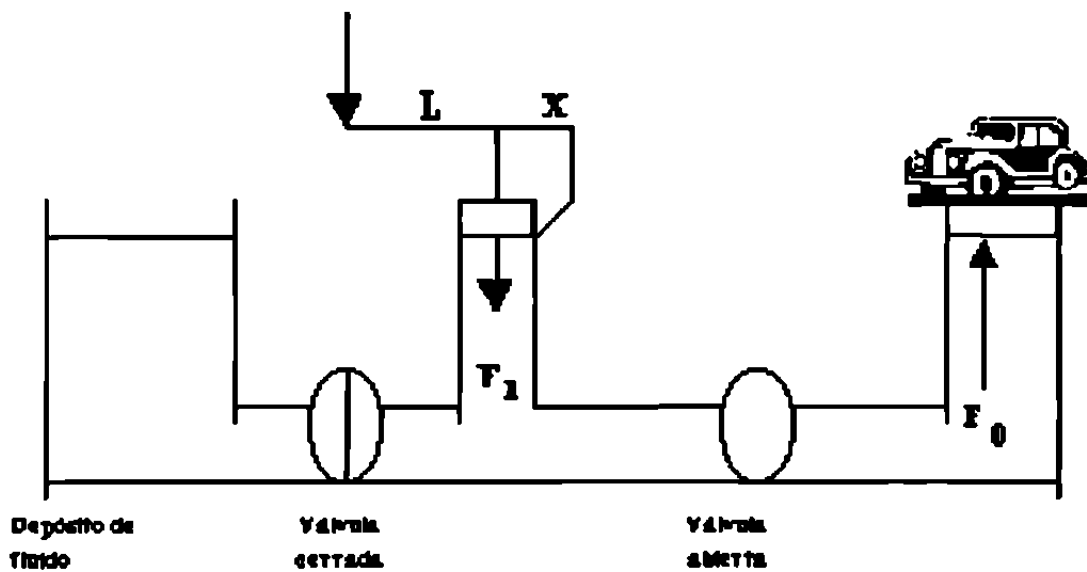


Figura 5.12 Gato hidráulico

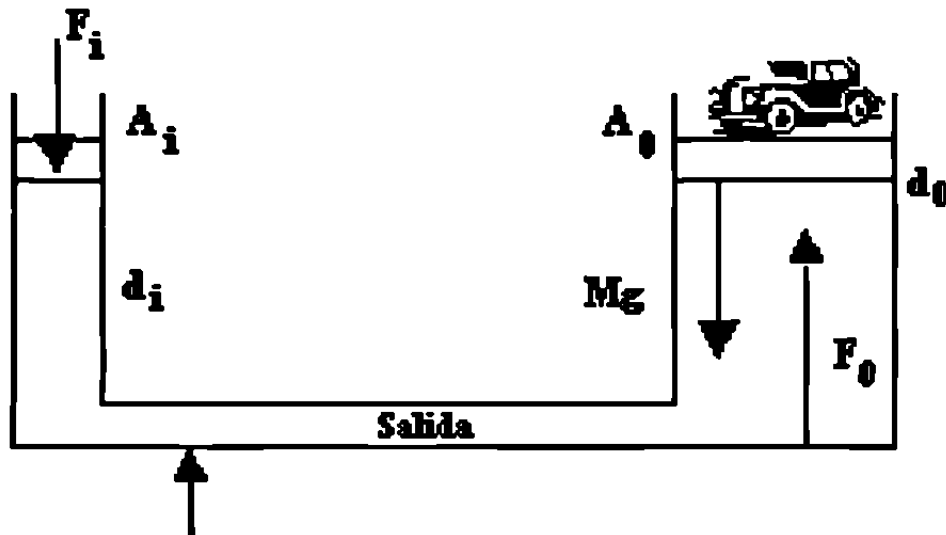


Figura 5.13 La palanca hidráulica.

Problema muestra 2 La figura (5.12) muestra una vista esquemática de un gato hidráulico empleado para elevar un automóvil. El fluido hidráulico es aceite (densidad $=812 \text{ kg/m}^3$). Se emplea una bomba de mano, con la cual se aplica una fuerza de magnitud F_i al émbolo menor (de 2.2 cm de diámetro) cuando la mano aplica una fuerza de magnitud F_h al extremo del mango de la bomba. La masa combinada del automóvil que va a ser elevado y la plataforma de elevación es de $m=1980 \text{ kg}$, y el émbolo grande tiene un diámetro de 16.4 cm. La longitud L del mango de la bomba es de 36 cm, y la distancia x desde el pivote hasta el émbolo es de 9.4 cm. (a) ¿Cuál es la fuerza aplicada F_i necesaria para elevar el automóvil? (b) por cada carrera hacia abajo de la bomba, en la que la mano se mueve una distancia vertical de 28 cm, ¿a qué altura se eleva el automóvil?

Solución (a) Partiendo de la ecuación (5.23),

$$F_i = Mg \frac{A_i}{A_0} (1980 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) \frac{\pi(1.1 \text{ cm})^2}{\pi(8.2 \text{ cm})^2} = 349 \text{ N}$$

Solución (b)

$$V_i = V_0$$

$$A_i X_i = A_0 X_0$$

$$X_0 = \frac{A_i}{A_0} X_i = \frac{\pi(1.1 \text{ cm})^2}{\pi(8.2 \text{ cm})^2} (28 \text{ cm}) = 0.503 \text{ cm}$$

5.7 Tensión Superficial

Proporcionalidad y Tensión Superficial de los Líquidos

Tensión superficial es la propiedad física que permite que una gota se sostenga colgando del grifo, que una vasija se llene de líquido un poco por encima del borde sin derramarse, ó que una aguja flote en la superficie de un líquido. Todos estos fenómenos se deben a la cohesión molecular en la superficie de separación del líquido con otro líquido ó gas inmisible. Es como si la superficie consistiese en una membrana elástica, uniformemente tensada, que tiende siempre a disminuir su área. Así encontramos que las burbujas de gas en un líquido y las gotas de humedad en la atmósfera tienen forma aproximadamente esférica.

La fuerza ejercida por la tensión superficial a través de cualquier línea imaginaria en la superficie libre, es proporcional a la longitud de esta línea y actúa en dirección perpendicular a ella. La tensión superficial por unidad de longitud, σ , se expresa en dinas/cm ó lb/ft, según el sistema de unidades. Su magnitud es muy pequeña, valiendo aproximadamente 0,005 lb/ft para el agua en contacto con el aire a la temperatura ambiente. La tensión superficial decrece, aunque una pequeña cuantía, con el aumento de la temperatura.

En la mayoría de las facetas de la hidráulica, la tensión superficial tiene poca importancia, ya que los esfuerzos que ocasiona son generalmente despreciables en comparación con las fuerzas hidrostáticas y dinámicas. La tensión superficial, que no tendrían consecuencias en el prototipo, puede influenciar el comportamiento del flujo en el modelo, por lo que hay que tener en cuenta esta posibilidad de error en el experimento al interpretar los resultados.

Los efectos de la tensión superficial son muy pronunciados en el caso de tubos de pequeño diámetro interior abiertos a la atmósfera, ya sean tubos manométricos de laboratorio ó las simples porosidades del suelo.

Una molécula en el interior de un líquido está sometida a la acción de fuerzas atractivas en todas las direcciones, siendo la resultante nula. Pero si la molécula está en la superficie del líquido, sufre la acción de un conjunto de fuerzas de cohesión, cuya resultante es perpendicular a la superficie venciendo la resistencia de estas fuerzas, por lo que las moléculas superficiales tienen más energía que las interiores.

La tensión superficial σ (sigma) de un líquido es el trabajo que debe realizarse para llevar moléculas en número suficiente desde el interior del líquido hasta la superficie para crear una nueva unidad de superficie (J/m cuadrada ó Kp/m). Este trabajo es numéricamente igual a la fuerza tangencial de contracción que actuase sobre una línea hipotética de longitud unidad situada en la superficie (Kp/m), y

$$\tau = \Delta F / \Delta L$$

donde ΔF es la fuerza elástica transversal al elemento de longitud ΔL sobre la superficie. La fórmula conduce a las unidades N/m ó Kp/m. El valor de la tensión superficial del agua en contacto con aire es 0,0756 N/m ó 0,0077 Kp/m a 0°C.

Los valores de la tensión superficial, τ , para la mayor parte de los el intervalo típico es de 25 a 40 Nm/m. El del agua es más alto, compuestos orgánicos son remarcablemente similares a temperatura ambiente, aproximadamente de 73 Nm/m a 20° C. Los metales líquidos tienen valores en el rango comprendido entre 300 y 600 Nm/m, el mercurio líquido tiene un valor cercano a 480 Nm/m, temperatura absoluta. La tensión superficial a la temperatura crítica es cero.

Suelen reportarse valores de τ para superficies en contacto con el vapor puro del líquido que se está estudiándose, ó con aire. A bajas presiones, ambos valores son casi los mismos.

Líquido	Tensión superficial T(Nm/m) ^a	Ángulo de contacto (grados)
(a) En contacto con aire		
Benceno	28.9	
Tetracloruro de carbono	27.0	
Glicerina	63.0	
Hexano	18.4	
Keroseno	26.8	
Aceite lubricante	25-35	
Mercurio	484	140
Metanol	22.6	
Octano	21.8	
Agua	72.8	0
(b) En contacto con agua		
Benceno	35.0	
Tetracloruro de carbono	45.0	
Hexano	51.1	
Mercurio	375	140
Metanol	22.7	
Octano	50.8	

^a 1 Nm/m = 10⁻³ N̄/m

Tabla 5.1 Tensión superficial de los líquidos comunes a 20° C

En la interfase entre un líquido ó gas, ó dos líquidos inmiscibles, parece formarse en el líquido una película ó capa especial, aparentemente debido a la atracción de moléculas del líquido bajo la superficie. Es un experimento sencillo el colocar una pequeña aguja en la superficie del agua en reposo y observar que es sostenida por la película.

La formación de esta película se puede visualizar con base en la energía superficial, ó trabajo por unidad de área, requerida para traer las moléculas a la superficie. La tensión superficial es, entonces, la fuerza de estiramiento requerida para formar la película, y se obtiene al dividir el término de energía superficial entre la unidad de longitud de la película en equilibrio. La tensión superficial del agua varía de alrededor de 0.074 N/m a 20° C a 0.059 N/m a 100° C. Las tensiones superficiales, junto con otras propiedades se dan para unos cuantos líquidos comunes.

La acción de la tensión superficial es el aumentar la presión dentro de una gota de líquido ó dentro de un pequeño chorro de líquido. Para una pequeña gota esférica de radio r , la presión interna p , necesaria para balancear la fuerza de tensión debida a la tensión superficial τ se calcula en términos de las fuerzas que actúan en un cuerpo libre hemisférico.

$$p \pi = 2 \pi r \tau \quad \text{ó} \quad p = 2\tau / r$$

Ambas ecuaciones muestran que la presión se hace mayor para un radio muy pequeño de gota ó cilindro.

La atracción capilar es causada por la tensión superficial y por el valor relativo de la adhesión entre líquido y sólido a la cohesión del líquido. Un líquido que moja el sólido tiene mayor adhesión que cohesión. La acción de la tensión superficial en este caso es causar que el líquido ascienda dentro de un pequeño tubo vertical que está parcialmente sumergido en él. Para líquidos que no mojan el sólido, la tensión superficial tiende a deprimir el menisco en un pequeño tubo vertical. Cuando se conoce el ángulo de

contacto entre líquido y sólido, el ascenso capilar se puede calcular para una forma supuesta del menisco.

Un líquido, al no ser capaz de expansionarse libremente, formará una interfase con un segundo líquido ó un gas. La fisico-química de estas superficies es muy compleja, y existe información dedicada a esta especialidad. Las moléculas inmersas en la masa líquida se repelen mutuamente debido a su proximidad, pero las moléculas de la superficie libre están en desequilibrio, y por ello la superficie está sometida a tensión. Estos efectos superficiales son los englobamos en el concepto de la tensión superficial.

Si en una interfase se hace un corte de longitud dL , aparecen fuerzas iguales y opuestas en ambos lados del corte, de valor $Y dL$, perpendiculares al corte y coplanarias con la interfase, a la magnitud Y se le denomina coeficiente de tensión superficial. Las dimensiones de Y son (F/L) , con unidades de newtones por metro en el SI y libras-fuerza por pie en el sistema británico. Un concepto alternativo procede de que para abrir el corte hasta un área dA se necesita un trabajo $Y dA$. Por ello, el coeficiente Y puede ser considerado también como una energía por unidad de área de la interfase, con las mismas unidades ya mencionadas.

Las dos interfaces más comunes son agua-aire y mercurio-aire. Con una superficie limpia a $20^\circ \text{C} = 68^\circ \text{F}$, las tensiones superficiales son:

$$Y = 0,0050 \text{ lbf/ft} = 0,073 \text{ N/m} \quad \text{aire-agua}$$

$$0,033 \text{ lbf/ft} = 0,48 \text{ N/m} \quad \text{aire-mercurio}$$

Estos valores pueden cambiar considerablemente si la superficie está contaminada. Generalmente, Y decrece con la temperatura y es cero en el punto crítico.

Si la interfase es una superficie curva, el equilibrio mecánico muestra que debe de haber una diferencia de presiones entre ambos lados, estando la presión alta en el lado

cóncavo que se observa en la figura. En la (a) se observa que el aumento de presión en el interior de un cilindro está equilibrado con las fuerzas en las dos generatrices

$$2RL \Delta p = aYL$$

$$\Delta P = Y/R$$

No estamos teniendo en cuenta el peso del líquido en estos cálculos. En la (b) se puede ver el aumento de presión en el interior de una gota esférica equilibra una fuerza distribuida anularmente de vida a la tensión superficial de

$$\begin{aligned} \pi R^2 \Delta p &= 2\pi R \gamma \\ \Delta p &= \frac{2\gamma}{R} \end{aligned}$$

podemos usar este resultado para predecir el aumento de presión existente en el interior de una pompa de jabón, que tiene dos interfaces con el aire, una interior y otra exterior, prácticamente con el mismo radio R

$$\Delta p_{pompa} = 2\Delta g_{gota} = \frac{4\gamma}{R}$$

La figura c muestra el caso general de una interfase de forma arbitraria, cuyos radios principales de curvatura son R_1 y R_2 . El equilibrio de fuerzas en dirección normal a la superficie indica que el aumento de presión en el lado cóncavo es

$$\Delta p = \gamma (R_1^{-1} + R_2^{-1})$$

Un segundo efecto importante es el ángulo de contacto y θ que aparece cuando la interfase llega hasta una pared sólida. En el equilibrio de fuerzas contarán tanto γ como θ . Si el ángulo de contacto es menor de 90° , se dice que el líquido moja al sólido. Si es mayor de 90° *no moja* al sólido. Por ejemplo el agua moja al jabón, pero no moja la cera. El agua moja muy bien el vidrio limpio, con $\theta=0^\circ$. En una interfase mercurio-aire-

vidrio, $\theta = 130^\circ$. Al igual que γ , el ángulo de contacto es muy sensible a las condiciones físico-químicas de la superficie.

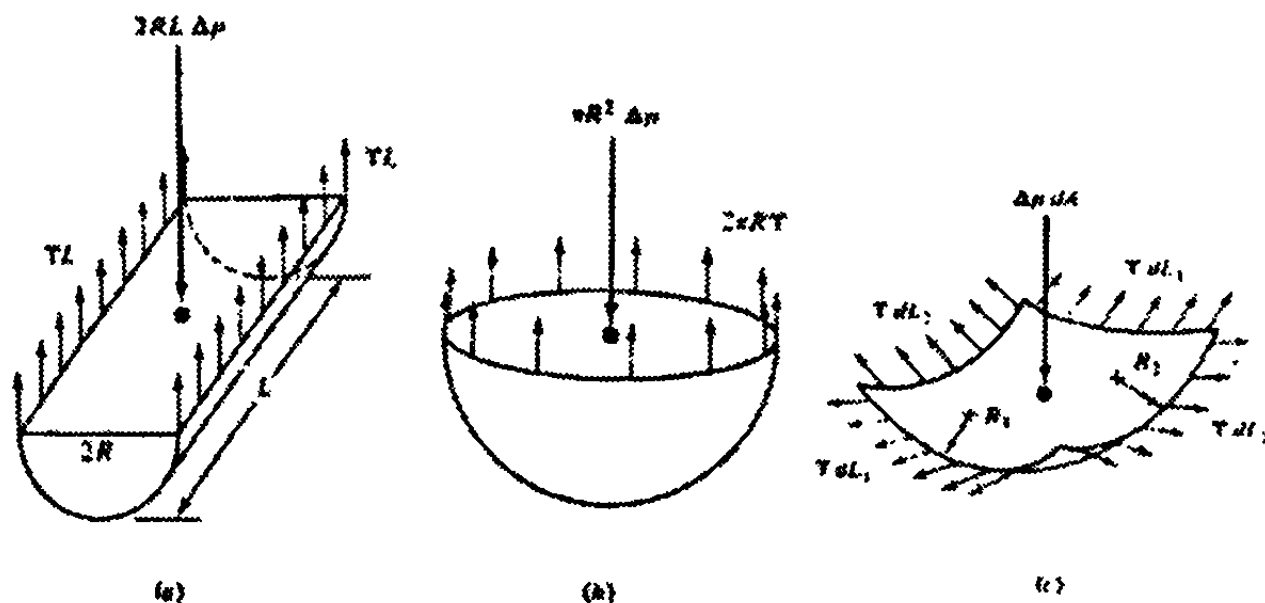


Figura 5.14 Tensión superficial

5.8 Cavitación

La cavitación puede ocurrir en cualquier máquina en que se manejen líquidos siempre que la presión estática local caiga por debajo de la presión de vapor de líquido. Cuando esto ocurre, el líquido puede evaporarse localmente, formando una cavidad de vapor y cambiando el patrón de flujo a partir de la condición de no cavitación. La cavidad del vapor cambia la forma efectiva del pasaje del flujo, alterando de ese modo el campo de presión local, el flujo puede volverse inestable. La falta de inestabilidad puede provocar que todo el flujo oscile y que la máquina vibre.

Cuando se inicia la cavitación, el efecto es reducir el funcionamiento de la bomba ó turbina rápidamente. Por ello, la cavitación debe evitarse para mantener la operación estable y eficiente.

En una bomba, la cavitación tiende a empezar en la succión donde el flujo se acelera hacia el impulsor.

La cavitación en una turbina comienza donde la presión es más baja.

El fenómeno de la Cavitación

Al diseñar una bomba, para carga y gasto determinado, debe escogerse la velocidad específica más alta, ya que ello redundaría en una reducción en tamaño, en peso y en costo. Sin embargo, como es lógico suponer, existe un límite inferior para el tamaño de la bomba; en este caso, el factor que se debe tener en cuenta es el incremento de la velocidad del líquido. Ya que los líquidos que se vaporizan, se presenta el fenómeno de la cavitación, el cual fija dichos límites.

La cavitación se define como la vaporización local de un líquido debido a las reducciones locales de presión, por la acción dinámica del fluido. Este fenómeno está caracterizado por la formación de burbujas de vapor en el interior ó en las proximidades de una vena fluida.

La condición física más general para que ocurra la cavitación es cuando la presión en ese punto baja al valor de la presión de vaporización. Recordaremos que la presión de vaporización de un líquido para cierta temperatura, es la presión a la cual un líquido se convierte en vapor cuando se le agrega calor.

Para los líquidos homogéneos, tales como el agua, la presión de vaporización de un líquido para cierta temperatura y tablas tales como las de vapor de Keenan dan estos valores. Sin embargo, ciertas mezclas de líquidos, están formadas por varios componentes, cada uno de los cuales tiene su propia presión de vaporización y puedan llegar a ocurrir vaporizaciones parciales a diferentes presiones y temperaturas.

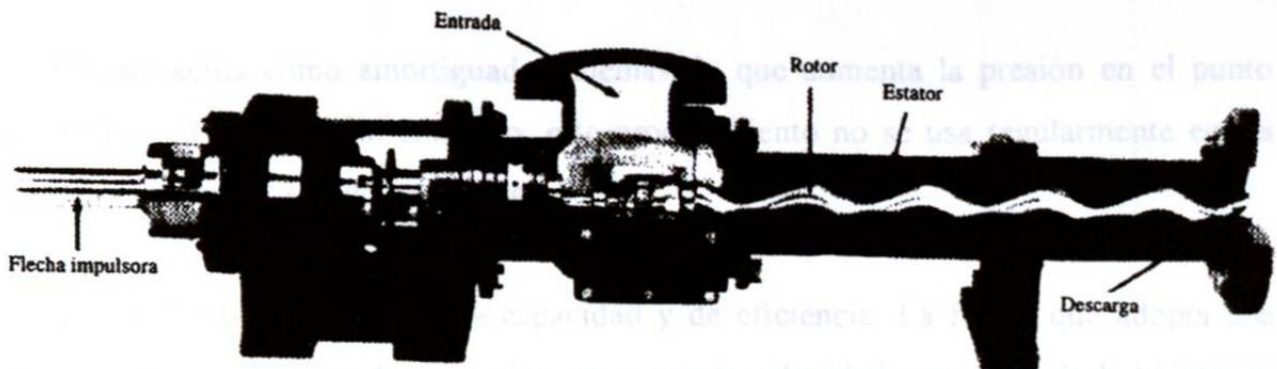


Figura 5.15 Bomba de cavidad progresiva Monyo (Fuente: Robbins & Myers, Inc. Fluids Handling Group, Springfield, OH).

* Signos de existencia de cavitación

La cavitación se manifiesta de diversas maneras, de las cuales las más importantes son:

- a) Ruidos y vibración;
- b) Una caída de las curvas de capacidad-carga y la de eficiencia;
- c) Desgaste de las aspas del impulsor;

Estudiaremos un poco más detenidamente cada uno de ellos.

- a) Ruido y vibración. El ruido se debe al choque brusco de las burbujas de vapor cuando estas llegan a las zonas de alta presión, y es más fuerte en bombas de mayor tamaño.**
- b) Cuando existe cavitación esta se puede remediar introduciendo pequeñas cantidades de aire en la succión de la bomba de una manera similar a los tubos de aireamiento usados en tuberías.**

El aire actúa como amortiguador además de que aumenta la presión en el punto donde hay cavitación. Sin embargo, este procedimiento no se usa regularmente en las bombas para evitar el “descecamiento”.

Caída de las curvas de carga-capacidad y de eficiencia. La forma que adopta una curva al llegar al punto de cavitación varía con la velocidad específica de la bomba en cuestión. Con bombas de baja velocidad específica las curvas de capacidad-carga, eficiencia y potencia se quiebran y caen bruscamente al llegar al punto de cavitación.

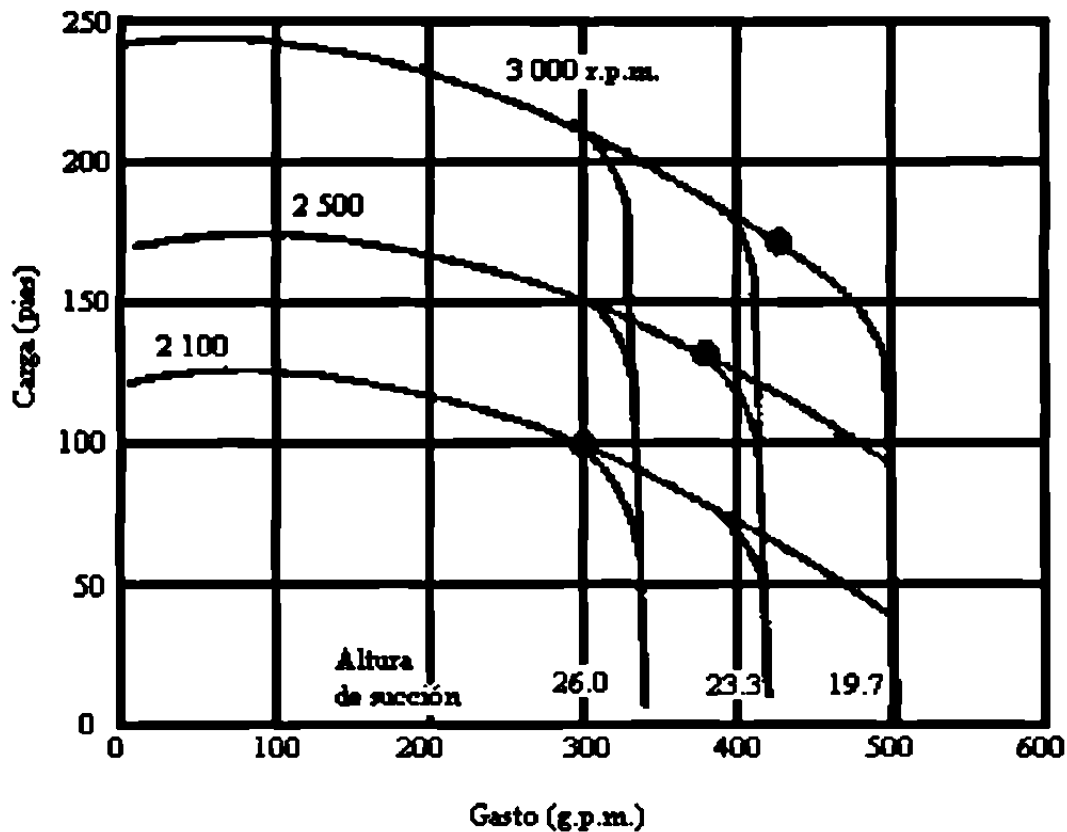


Figura 5.16 Muestra de curvas afectadas por la cavitación

La diferencia en el comportamiento de bombas de diferentes velocidades específicas, se debe a las diferencias en el diseño del impulsor. Además en las bombas de baja y media velocidad específica, se observa que al bajar la carga, el gasto disminuye en vez de aumentar. Este se debe debido a un incremento de la zona de baja presión a lo largo del canal del impulsor.

c) **Desgaste del impulsor.** Si un impulsor de una bomba que pesa antes y después de haberse sometido al fenómeno de la cavitación, se encuentra que ha habido una disminución de peso.

El desgaste por cavitación se debe distinguir del que producen la corrosión y la erosión. El de corrosión lo causa única y exclusivamente la acción química y electrolíquida de los líquidos bombeados. El segundo es causado por las partículas abrasivas tales como la arena, coke ó carbón.

Tipos de cavitación

1) Cavitación móvil

2) Cavitación fija

3) Cavitación de vórtices

4) Cavitación vibratoria

- Cavitación móvil, existe cuando se forman burbujas de vapor ó cavidades, que son transportadas corriente abajo, y se colapsan.
- Cavitación fija, ocurre cuando existe una cavidad de vapor fija como región separada. La región separada puede unirse otra vez al cuerpo ó puede englobar la parte de atrás del cuerpo y quedar encerrada por el flujo principal, en cuyo caso se denomina super cavitación.
- Cavitación de vórtices, se encuentra en el centro de alta velocidad (y por tanta baja presión) de un vórtice; es común observarla en la punta de un vórtice que se desprende de una hélice.
- Cavitación vibratoria, puede existir cuando una onda de presión se mueve en un líquido. Una onda de presión consiste en un pulso de presión que tiene una presión alta seguida de una presión baja

Resistencia de los materiales a la cavitación

Los distintos materiales resisten la cavitación en diferentes grados. La cantidad de material destruido por la cavitación esta controlada por la composición química de ellos, el tratamiento térmico y las condiciones de su superficie.

Schroeter ha hecho pruebas con diferentes materiales expuestos a cavitación y usando la velocidad de 197ft/seg. La figura que a continuación aparece muestra los resultados obtenidos. Las abscisas indican las horas que duro la prueba y las ordenadas, el peso en gramos del material perdido.

Se encontró también que las pérdidas aumentan con la temperatura, ya que a altas temperaturas es más escaso el aire disuelto en el agua por lo cual se reduce su efecto amortiguador.

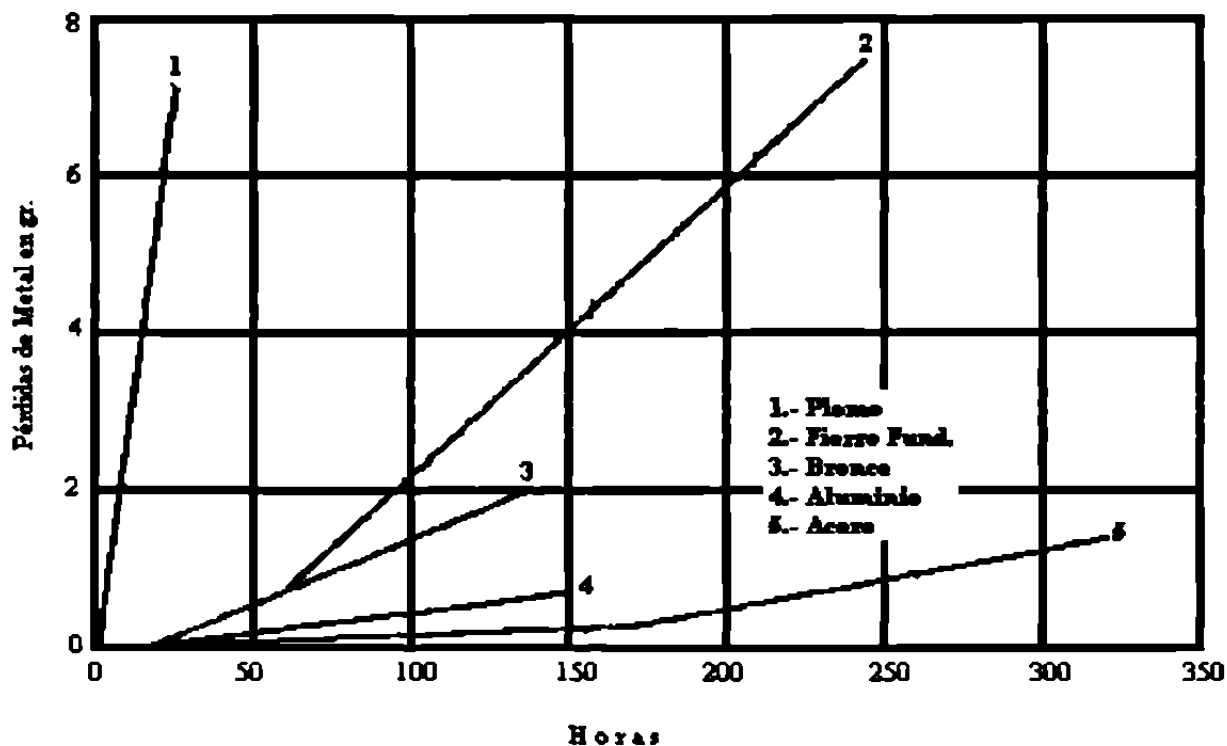


Figura 5.17 Pérdidas de metal por cavitación

Estudio teórico de la cavitación

El estudio teórico de este fenómeno resulta sumamente complejo y él solo basta para el desarrollo de un libro. Ya que este tema se trata en forma general en los libros sobre bombas centrifugas.

Medios de evitar ó reducir la cavitación

- 1) Tener un conocimiento completo de las características del fenómeno en nuestra bomba.
- 2) Conocimiento de las condiciones de succión existentes en el sistema.
- 3) Las condiciones de succión se pueden mejorar, eligiendo un tubo de succión de mayor diámetro, reduciendo su longitud y eliminando codos, así como todo aquello que pueda ocasionar pérdidas de carga.
- 4) Una revisión completa de todas las secciones de la cabeza de succión, impulsor y carcasa por donde va a pasar el líquido, cuidando de que no existan obstrucciones.
- 5) Elementos de guía que conduzcan el líquido conveniente.
- 6) Uso de materiales adecuados.
- 7) Introducción de pequeñas cantidades de aire para reducir el efecto.

CAPÍTULO 6

SIMBOLOGÍA

6.1. Antecedentes

Para la interpretación correcta de los diagramas ó planos hidráulicos, es muy importante conocer los diferentes tipos de símbolos utilizados en los mismos.

Símbolos pictóricos. Estos son muy usados para mostrar la interconexión de componentes. Estos son difíciles de estandarizar para el funcionamiento básico.

Símbolos recortados. Se enfocan en la construcción. Son símbolos complejos en su forma de dibujar y las funciones no son aparentes.

Símbolos gráficos. Se enfocan en la construcción y métodos de operación de los componentes. Son gráficos simples. Las funciones y los métodos de operación de los componentes son obvios. Los símbolos son capaces de atravesar barreras de lenguaje y contribuyen a un entendimiento universal de los sistemas de potencia fluida.

Los símbolos gráficos deberían ser usados en conjunto con los símbolos de otros sistemas. Todos los símbolos son aquellos que dan una representación simbólica de los

componentes y todos los detalles de un circuito. Los símbolos compuestos usualmente representan un componente complejo.

Alcance y propósito

Las formas elementales de símbolos son:

Círculos, triángulos, líneas, cuadrados, arcos, puntos, rectángulos, flechas, cruces.

Los símbolos utilizan palabras ó abreviaciones.

Principios y Bases

En la industria los símbolos más comunes son los símbolos gráficos en los diagramas hidráulicos, utilizándose formas geométricas sencillas que indican las funciones e interconexiones de las líneas y componentes hidráulicos.

Las tuberías, tubos y pasos hidráulicos se trazan como simples líneas dependiendo del tipo de tubería es el tipo de línea.

Línea de trabajo



Línea de pilotaje

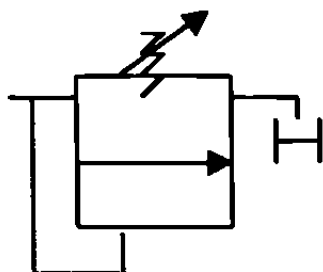


Línea de drenaje

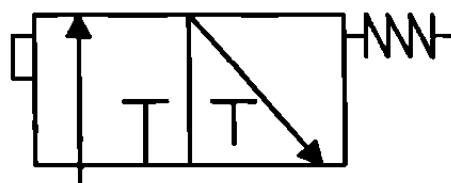


Válvulas

El símbolo fundamental es un cuadrado, se llama sobre, se indican en él con flechas la dirección y trayectoria del flujo así como las conexiones.



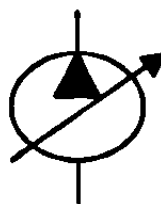
Válvula de alivio



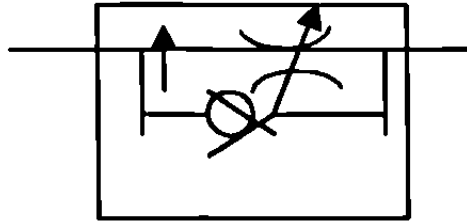
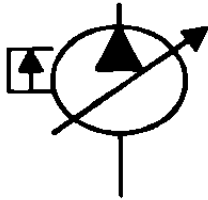
Válvula direccional 2posiciones, 3vias con operador manual y de resorte

Flechas

Una flecha atravesando un componente aproximadamente a 45° indica que el elemento puede ser ajustado.



Una flecha paralela al lado corto de un símbolo nos indica que el elemento puede ser compensado ó mantenido por presión.



6.2. Símbolos y Representaciones Gráficas



Línea de Trabajo



Línea de Pilotaje



Línea de Drenaje



Línea Hidráulica



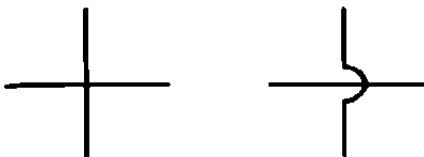
Línea Neumática



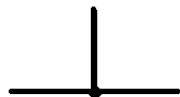
Línea Cerrada



Línea Flexible



Cruce de Líneas



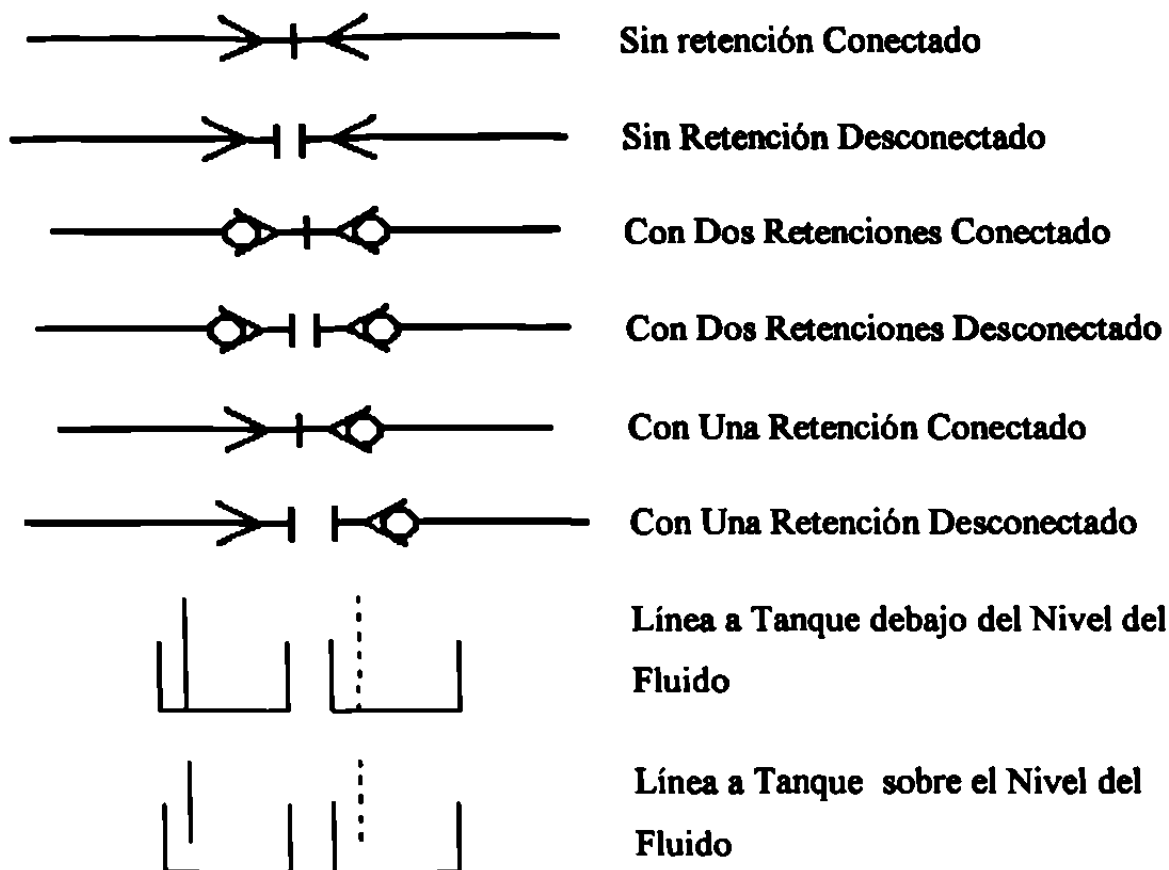
Conexión de Líneas



Tanque Abierto



Tanque Cerrado

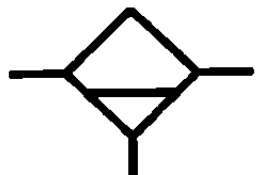
Desacolpe Rápido

La Línea de Retorno esta ilustrada terminando a la altura del sentido vertical de los extremos del símbolo del tanque.

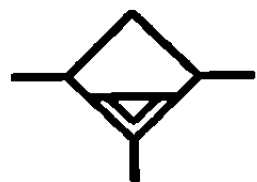




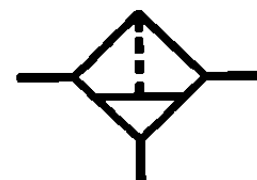
Filtro colador



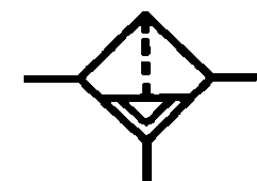
Separador con drenaje manual



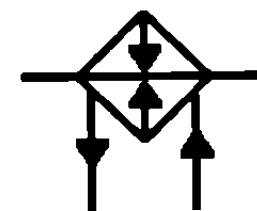
Separador con drenaje automático



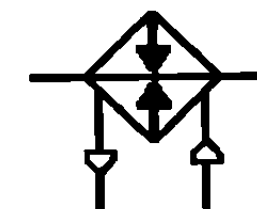
Filtro separador con drenaje manual



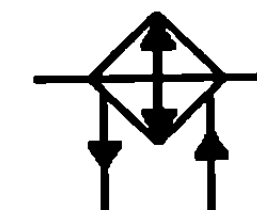
Filtro separador con drenaje automático



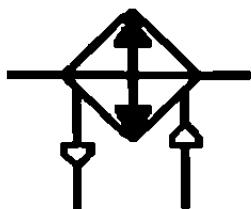
Calefactor y el medio de calefacción es líquido



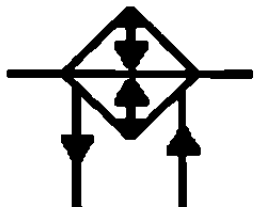
Calefactor y el medio de calefacción es gaseoso



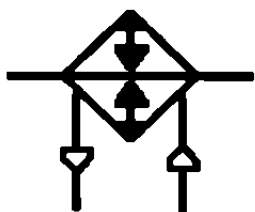
Enfriador y el medio refrigerante es líquido



Enfriador y el medio refrigerante es gas



Control de temperatura y se controla con líquidos



Control de temperatura y se controla con gas



Acumulador



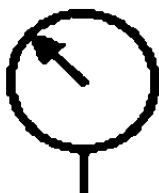
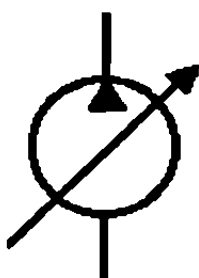
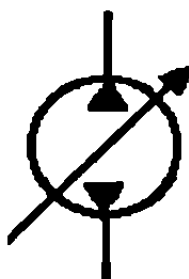
Acumulador con resorte

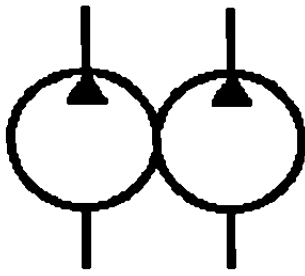


Acumulador de bolsa

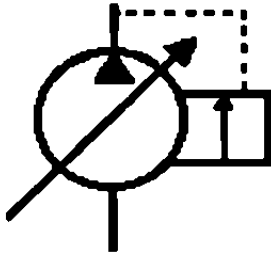


Acumulador de peso muerto

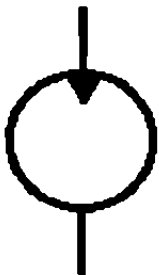
**Manómetro****Termómetro****Válvula de paso****Bomba unidireccional de desplazamiento fijo****Bomba unidireccional de desplazamiento variable****Bomba bidireccional de desplazamiento fijo****Bomba bidireccional de desplazamiento variable**



Bomba doble



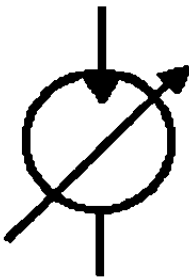
Bomba compensada



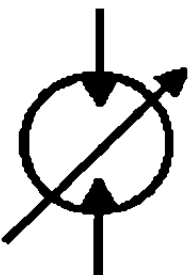
Actuador rotatorio unidireccional de desplazamiento fijo (motor hidráulico)



Motor hidráulico bidireccional de desplazamiento fijo



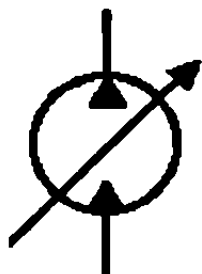
Motor hidráulico unidireccional de desplazamiento variable



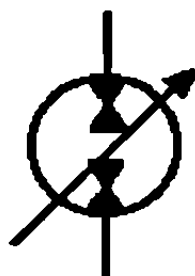
Motor hidráulico bidireccional de desplazamiento variable



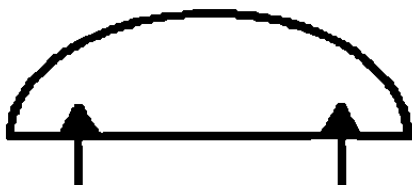
Bomba - motor hidráulico desplazamiento variable operando en una dirección como bomba y en la opuesta como motor



Bomba - motor hidráulico desplazamiento variable operando como motor y bomba en la misma dirección



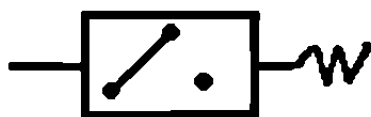
Bomba - motor hidráulico desplazamiento variable operando en ambas direcciones como bomba ó como motor



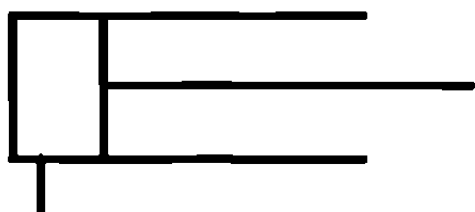
Motor oscilante



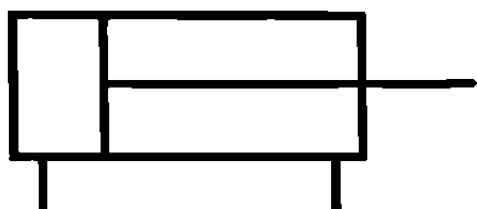
Medidor de flujo



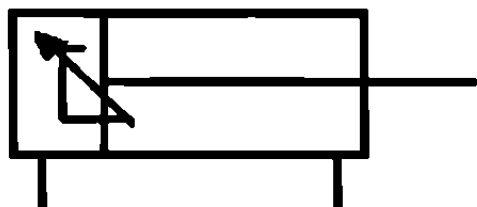
Interruptor de presión



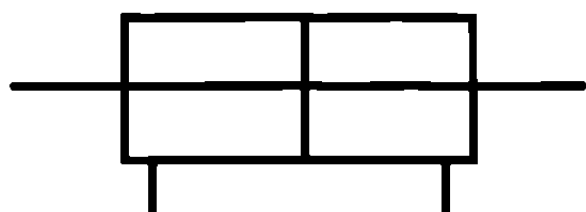
Actuador lineal de acción simple



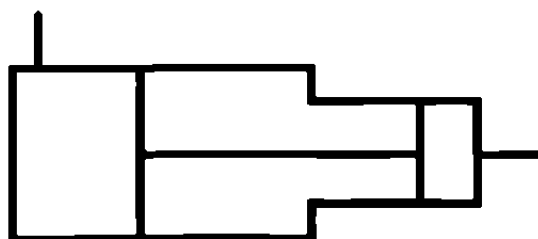
Actuador lineal de acción doble



Actuador lineal de acción doble con amortiguamiento en un extremo



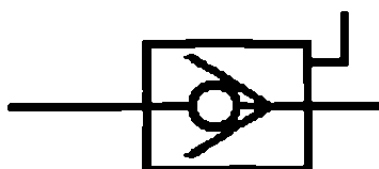
Actuador lineal de acción doble y con doble barra



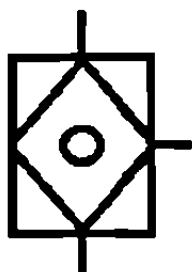
Intensificador de presión



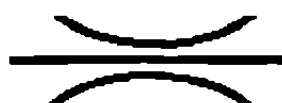
Válvula check simple



Válvula check pilotada



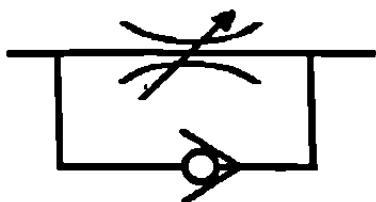
Válvula check doble



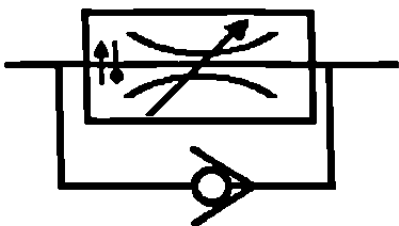
Restricción fija



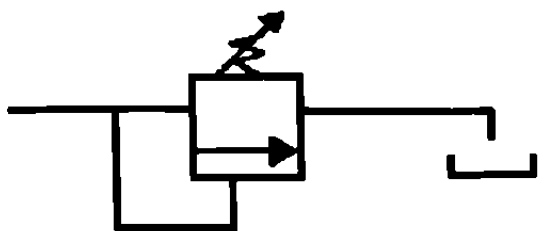
Restricción variable



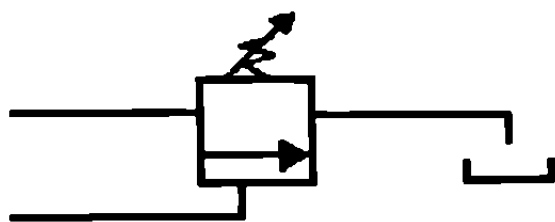
Válvula de control de flujo no compensada



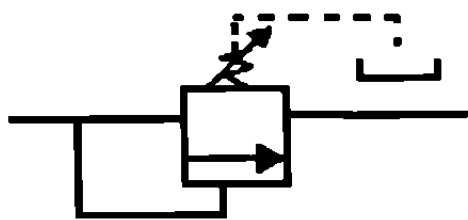
Válvula de control de flujo compensada por presión y temperatura



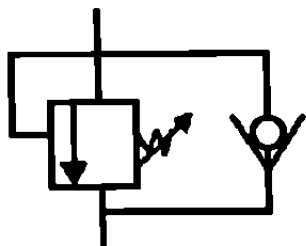
Válvula de alivio



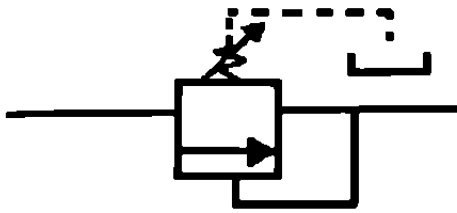
Válvula de descarga



Válvula de secuencia



Válvula de contrabalanceo



Válvula reductora de presión



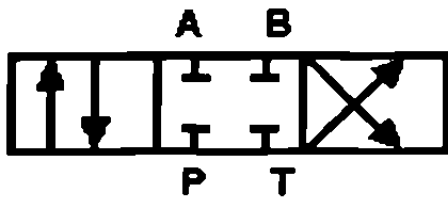
Válvula direccional dos posiciones, dos vías



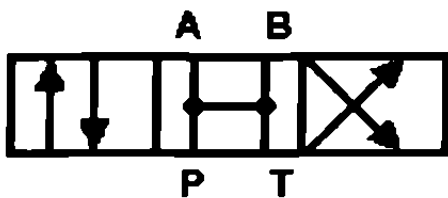
Válvula direccional dos posiciones, tres vías



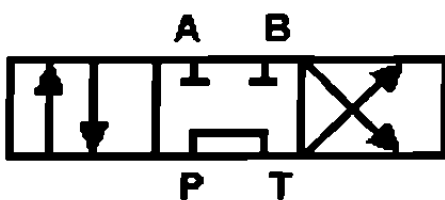
Válvula direccional dos posiciones, cuatro vías



Válvula direccional tres posiciones, cuatro vías, con centro cerrado



Válvula direccional tres posiciones, cuatro vías, con centro abierto



Válvula direccional tres posiciones, cuatro vías, con centro tandem