



APUNTES DE TERMODINÁMICA

Clave (0068)

ING. JOSÉ ENRIQUE LARIOS CANALE
PROFESOR DE CARRERA
TITULAR “A”, TIEMPO COMPLETO
DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y QUÍMICA

PRÓLOGO

En el *currículum de las carreras* de Ingeniería en: Eléctrica Electrónica, Geofísica, Industrial, Mecánica, Mecatrónica y Sistemas Biomédicos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, la asignatura Termodinámica (2015) forma parte de los cursos básicos de Física que fortalecen la formación científica del estudiante de ingeniería.

De las asignaturas del área de Física que se imparten en la DCB, Termodinámica representa una asignatura de alto grado de dificultad para los alumnos.

Con la finalidad de mejorar el aprovechamiento académico de los alumnos que cursan la asignatura de Termodinámica (2015) y disminuir el índice de reprobación, he elaborado los presentes apuntes, para apoyarlos con material didáctico sobre la Termodinámica básica.

Estos apuntes contienen los conceptos fundamentales de la Termodinámica: el Postulado de Estado y las leyes Cero, Primera y Segunda de la Termodinámica con un riguroso desarrollo matemático y con ejercicios de aplicación en la ingeniería en la medida de los alcances del tema.

En los temas 1 y 3 se desarrollan los conceptos fundamentales de los sistemas termodinámicos y de las sustancias de trabajo, estableciendo los modelos matemáticos, tabulares y gráficos para determinar sus propiedades termodinámicas.

En el tema 2, a partir de los principios de la conservación de la masa y la energía, derivados del enfoque de la Termodinámica Clásica, se establece, en su forma más general, el modelo matemático de la Primera Ley de la Termodinámica.

En el tema 4 se aplican balances de energía a los gases ideales empleando los conceptos de-

sarrollados en los temas 1 y 3. Los balances de masa y energía para sistemas abiertos se desarrollan en el tema 5.

Con base en los concepto de procesos reversible e irreversible, en el tema 6 se define el concepto de entropía que caracteriza a la Segunda Ley de la Termodinámica. También en este tema se establece la complementariedad de la Primera y Segunda leyes de la Termodinámica en el análisis de cualquier proceso termodinámico.

El autor

TEMA 1

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

OBJETIVO DE LA ASIGNATURA:

El alumno analizará los principios básicos y fundamentales de la termodinámica clásica para aplicarlos en la solución de problemas físicos. Desarrollará sus capacidades de observación y razonamiento lógico para ejercer la toma de decisiones en la solución de problemas que requieran balances de masa, energía y entropía; manejará e identificará algunos equipos e instrumentos utilizados en procesos industriales.

OBJETIVO DEL CURSO:

«El alumno analizará los conceptos, principios y leyes fundamentales de la Termodinámica Clásica para aplicarlos en la solución de problemas físicos involucrados en procesos termodinámicos de ingeniería. Así mismo, modelará fenómenos termodinámicos aplicando el Método Científico Experimental para el desarrollo de sus capacidades de observación, análisis y síntesis, así como de sus habilidades psicomotrices en el manejo del instrumental y equipo del laboratorio»

I. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

OBJETIVO: El alumno calculará la variación de algunas propiedades termodinámicas realizando las conversiones de unidades necesarias, identificando las ventajas del Sistema Internacional de Unidades sobre otros sistemas, así mismo aplicará los conceptos de presión (manometría) y temperatura (termometría) que permitan establecer las condiciones de equilibrio de un sistema.

I. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

OBJETIVO:

«El alumno analizará los conceptos básicos que caracterizan a las propiedades físicas que definen el estado termodinámico de un sistema, identificando sus dimensiones y unidades en el Sistema Internacional de Unidades (SI), Así mismo, aplicará los conceptos de presión mecánica en fluidos estáticos y de temperatura empírica en condiciones de equilibrio en la solución de problemas de ingeniería.»

CONTENIDO

1.1 Campo de estudio de la termodinámica clásica.

1.2 Sistemas termodinámicos cerrados y abiertos. Fronteras.

1.3 Propiedades termodinámicas macroscópicas intensivas y extensivas, ejemplos y objetivo de esta clasificación de las propiedades.

1.4 Concepto de Presión (relativa, atmosférica, absoluta).

1.5 Equilibrios: térmico, mecánico y químico. Ley cero de la termodinámica, definición de temperatura, propiedades termométricas, escalas de temperatura y temperatura absoluta.

1.6 El postulado de estado. El diagrama (v , P). Definición de proceso termodinámico, Proceso cuasiestático, Proceso cuasiestático: isobárico, isométrico, isotérmico, adiabático y politrópico. El proceso cíclico.

1.1 CAMPO DE ESTUDIO DE LA TERMODINÁMICA CLÁSICA.

El campo de aplicación de la Termodinámica en la industria, el desarrollo tecnológico y científico está orientado al estudio de los fenómenos de transferencia o transformación de energía en forma de calor en los diferentes procesos que se llevan a cabo, principalmente, para la generación de potencia mecánica y eléctrica.

Los motores de combustión interna y externa como son los motores de gasolina y diésel, o bien las turbinas de gas de los

turbojets se fundamentan en ciclos termodinámicos cuyos conceptos, principios, y leyes se estudian en el presente curso.

De igual manera, la generación de potencia eléctrica por centrales termoeléctricas, plantas geo-térmicas, centrales nucleoeeléctricas y plantas carboeléctricas principalmente, el principio de funcionamiento de estas plantas tiene como base un ciclo termodinámico, su estudio se fundamenta en los contenidos de este programa, al igual que en el estudio de diversos procesos que se llevan a cabo en la industria química, textil, alimentaria, etc. que emplean máquinas generatrices o motrices, ya sean térmicas o hidráulicas.

Definición de Termodinámica

“Es una ciencia, parte de la Física, que estudia la energía y la entropía, así como las propiedades termodinámicas relacionadas con ellas, cuando se llevan a cabo procesos de transformación o transferencia de energía, y cambios de entropía en un sistema termodinámico.”

Una propiedad termodinámica define un aspecto del estado energético del sistema termodinámico, en un espacio y tiempo dado en que se ubica, de manera que, en general, las propiedades termodinámicas definen la energía térmica, o sea el estado del sistema termodinámico.

La Termodinámica se puede considerar que incluye los conceptos fundamentales de la Física, ya que la energía y sus transformaciones se presentan en todos los fenómenos físicos, por lo tanto, en todas las áreas de la Física.

Las propiedades físicas que se estudian en Termodinámica se delimitan a procesos en los cuales no hay fenómenos debido a la carga eléctrica, efectos luminosos, sonoros, ni cambios en la estructura molecular y atómica de la materia, es decir, no se estudian los fenómenos electromagnéticos, acústicos, ópticos, químicos, o nucleares.

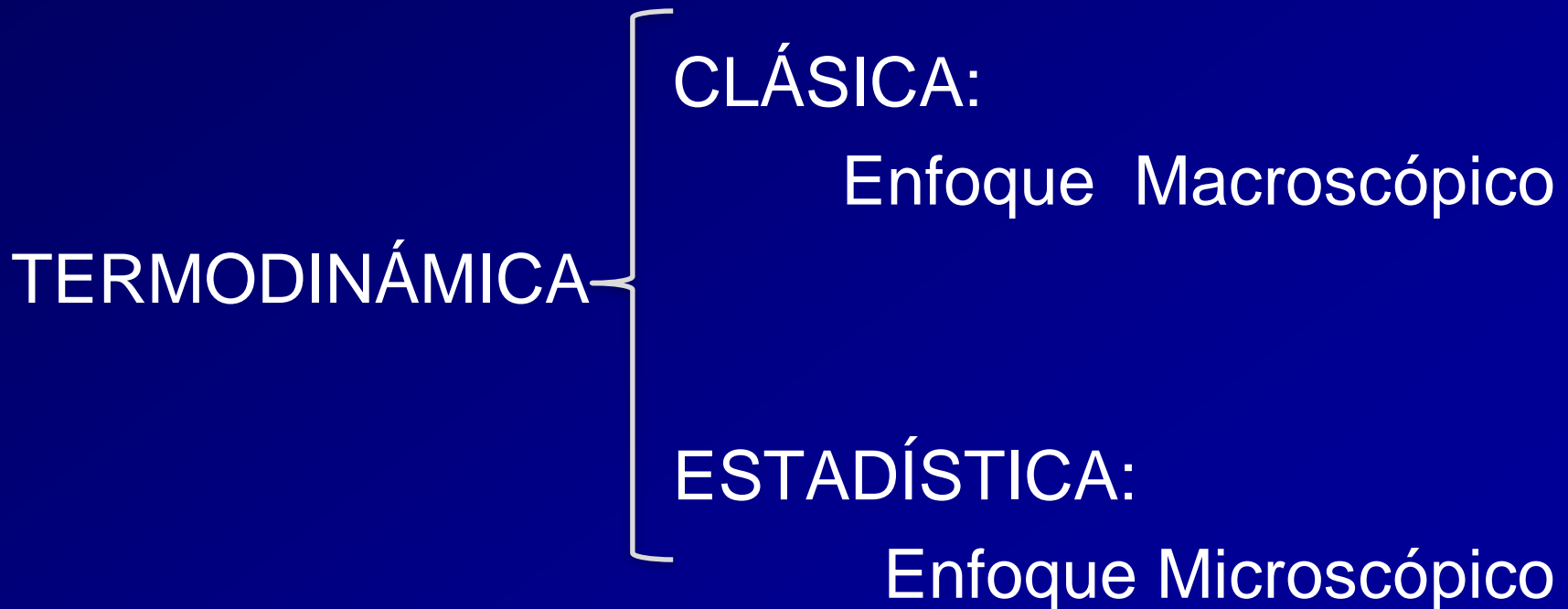
Definición de Física

“La Física es la ciencia que estudia las transformaciones y transferencias de energía que se presentan en los fenómenos de la naturaleza.”

Una transformación o transferencia de energía se cuantifica a través de la variación o cambio de sus propiedades físicas, las cuales definen el nivel energético del cuerpo u objeto en estudio, es decir, el estado físico del sistema. La propiedad física hace referencia al nivel energético de un cuerpo físico que en estos apuntes se denomina sistema termodinámico, para un es-

Clasificación de la Termodinámica

Según sea el nivel de estudio y análisis del sistema termodinámico:



Estructura conceptual de la Termodinámica Clásica

Ley Cero de la Termodinámica. Define los conceptos de: calor, energía interna, temperatura empírica, termómetro, escalas de temperatura empírica absoluta y relativa.

Postulado de Estado. Define el número de propiedades termodinámicas independientes que establecen el estado energético (termodinámico) de un sistema.

Primera Ley de la Termodinámica. Establece los modelos matemáticos de los principios de la conservación de la masa y de la energía para sistemas termodinámicos aislados, cerrados y abiertos.

Segunda Ley de la Termodinámica. Establece los modelos matemáticos de la direccionalidad de los procesos, cuantificándolos con el concepto de entropía para sistemas termodinámicos aislados, cerrados y abiertos; validando el proceso con el Principio del Incremento de Entropía.

1.2 SISTEMAS TERMODINÁMICOS CERRADOS Y ABIERTOS. FRONTERAS.

Medio Físico. En termodinámica, a los medios físicos se les denomina sustancia de trabajo, que para fines de estudio se conceptualiza como sistema termodinámico. Un medio físico es la cantidad de masa o materia de la naturaleza en la cual se llevan a cabo transferencias y/o transformaciones de energía, a lo que denominamos fenómenos físicos o procesos. Por ejemplo: el aire es el medio físico en el que se propagan las ondas sonoras; el aceite es el medio físico que transfiere la presión de una superficie a otra, como es el caso del gato hidráulico, etc.

SISTEMA TERMODINÁMICO

Un sistema termodinámico es la porción del universo en el que se desarrolla un fenómeno físico, al que se le efectúa un balance de energía y entropía. Para sistematizar el análisis anterior se le aísla del resto del universo delimitándolo con una envolvente imaginaria llamada frontera, a través de la cual puede cruzar masa y/o energía que intercambia con el medio ambiente, con lo que se caracteriza al proceso termodinámico en estudio, como se muestra en la Fig. 1.2.1. Dependiendo de los flujos de masa y transferencias de energía, los sistemas termodinámicos se clasifican en: abiertos, cerrados o aislados.

UNIVERSO:

FRONTERA



Flujos de masa y/o
transferencias
de energía



Flujos de masa y/o
transferencias
de energía



MEDIO AMBIENTE

Fig. 1.2.1. Sistema termodinámico,
frontera y medio ambiente.

La caja blanca de la Fig. 1.2.1. representa a la sustancia de trabajo (aire, agua, gases quemados, algún refrigerante, etc.), de una máquina térmica o hidráulica, ya sea motriz o generatriz (motor de combustión interna, bomba centrífuga, turbina de gas, caldera, etc.).

A la sustancia de trabajo se le delimita con una envolvente imaginaria, representada por la línea punteada en rojo denominada frontera, con el fin de aislarla del resto del universo y efectuar el análisis de las transferencias de masa y/o energía con el medio ambiente, que es lo que se encuentra en el exterior de la frontera.

SISTEMA TERMODINÁMICO. Es aquella porción del universo que se aísla con el fin de efectuar balances de energía y entropía.

FRONTERA. Es la superficie o envolvente imaginaria que rodea a un sistema termodinámico para aislarlo del resto del universo.

MEDIO AMBIENTE. Es la parte del universo que queda hacia el exterior de la frontera del sistema termodinámico.

SISTEMA TERMODINÁMICO ABIERTO O VOLUMEN DE CONTROL. En estos sistemas termodinámicos se presenta flujo de masa y energía a través de la frontera del sistema, como en el caso de las turbomáquinas motrices y generatrices, tanto térmicas como hidráulicas.

En la Fig.1.2.2. se representa a una bomba centrífuga (sistema termodinámico abierto) que le transfiere energía en forma de trabajo de eje al agua incrementando su energía cinética, potencial y/o bórica. La frontera del sistema abierto define al volumen de control cuya superficie imaginaria se delimita con el impulsor y la carcasa de la bomba.

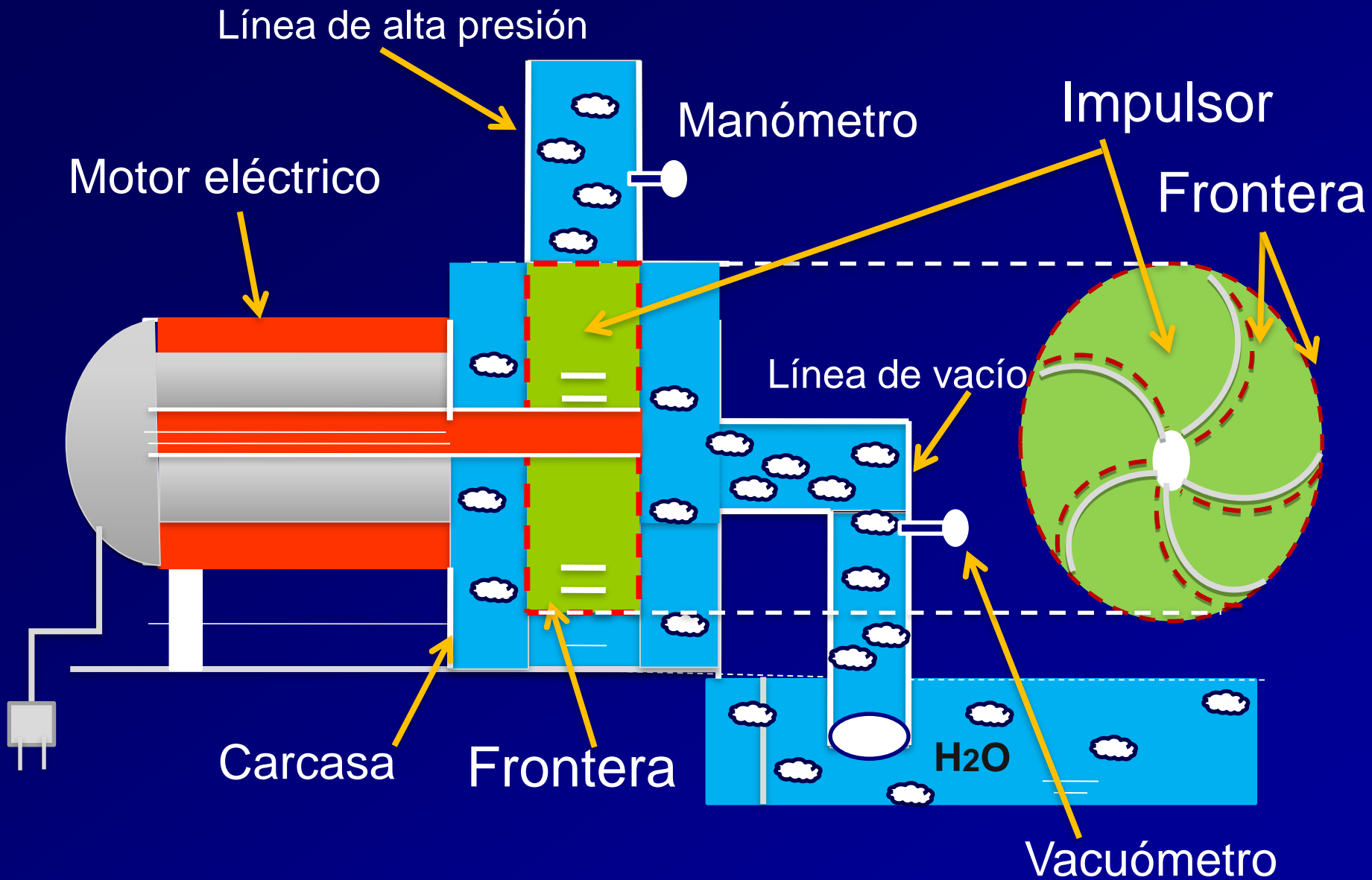
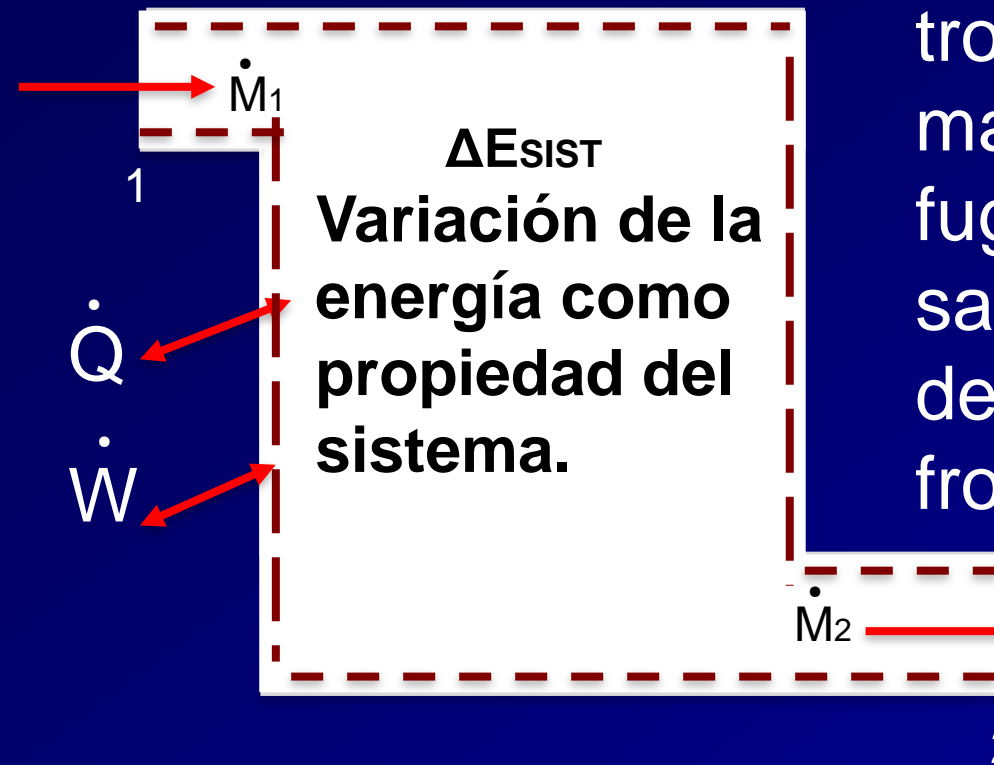


Fig. 1.2.2. Bomba centrífuga.

Flujo de masa
que entra



Sistema Termodinámico Abierto o Volumen de Control que representa esquemática a la bomba centrífuga con una entrada y una salida y con transferencia de energía a través de la frontera.

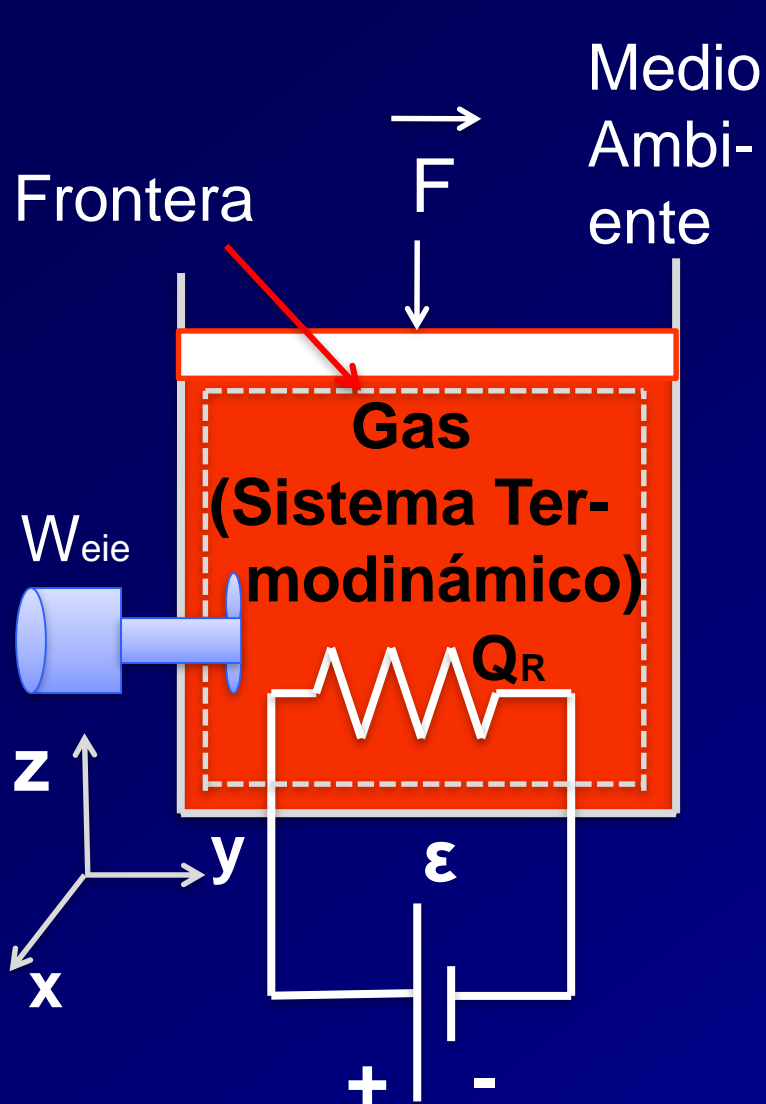
Flujo de masa que sale

\dot{Q} y \dot{W} son el calor y el trabajo transferidos por unidad de tiempo a través de la frontera del sistema.

Fig. 1.2.3. Sistema termodinámico abierto.

SISTEMA TERMODINÁMICO CERRADO. En este sistema no hay flujo de masa, sólo se presenta transferencia de energía a través de la frontera del sistema, y la masa del sistema permanece constante.

Por ejemplo, en la Fig. 1.2.4. se muestra un sistema cilindro-émbolo que contiene un gas al que se le transfiere calor con una resistencia eléctrica, se le transfiere trabajo al aplicar una fuerza sobre el émbolo y se le suministra trabajo de flecha, lo que incrementa la presión y temperatura del gas. Por tanto, en este sistema sólo se presenta transferencia de energía al gas, sin que varíe su masa.



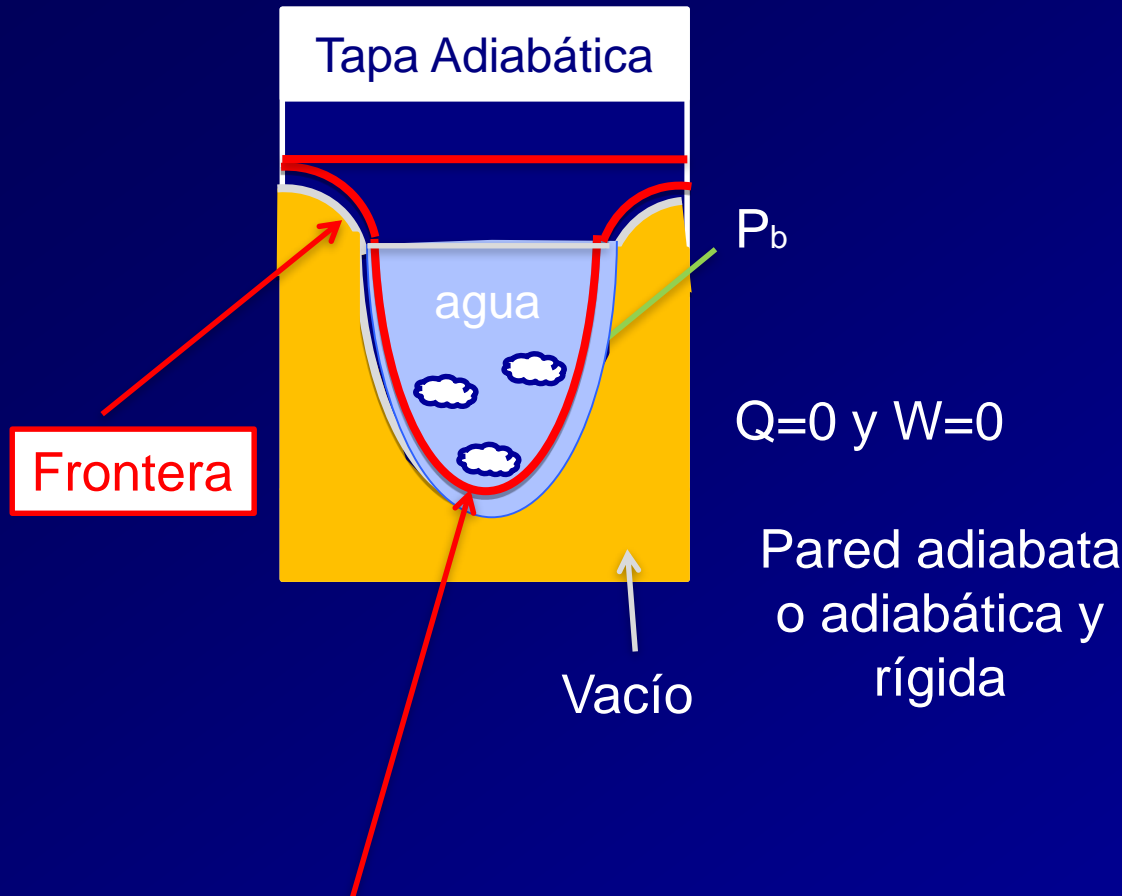
SISTEMA TERMODINÁMICO CERRADO. Con transferencias de trabajo de compresión, trabajo de flecha y transferencia de energía en forma de calor debido a una corriente eléctrica que circula por una resistencia eléctrica. En este sistema, en general, no hay variaciones de energías cinética y potencial, ya que se le fija a un sistema de referencia.

Fig. 1.2.4. Sistema termodinámico cerrado.

SISTEMA TERMODINÁMICO AISLADO. En este sistema no hay flujo de masa ni transferencia de energía a través de la frontera del sistema, por lo cual, la masa y la energía como propiedad del sistema permanecen constantes.

En la Fig. 1.2.5. se muestra esquemáticamente un calorímetro de vacío, que se emplea en procesos termodinámicos cuyas características corresponden a las de un sistema aislado. Este dispositivo generalmente se emplea para determinar la capacidad térmica específica de una sustancia.

Calorímetro de vacío



$$\delta Q = 0$$

$$\delta W = 0$$

$$dE)_{\text{SIST.}} = 0$$

Fig. 1.2.5. Sistema termodinámico aislado.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS TERMODINÁMICOS (MEDIOS FÍSICOS)

HOMOGENEIDAD. Se considera que un sistema termodinámico o medio físico es homogéneo con respecto a una propiedad física, si ésta posee el mismo valor en todos los puntos del sistema. Por ejemplo, el agua de una alberca es homogénea con respecto a la densidad.

LINEALIDAD. Un medio físico es lineal con respecto a una propiedad física, si al variar su masa la propiedad física varía linealmente.

Por ejemplo, el volumen del agua de una alberca es una propiedad lineal para este sistema, ya que si varía la masa del agua, el volumen varía de manera proporcional, con un factor de proporcionalidad igual a la densidad del agua, como se verá posteriormente, al definir la densidad.

ISOTROPISMO O ISOTROPÍA. Un medio físico es isótropo o isotrópico con respecto a una propiedad física, si el valor de la propiedad física en cualquier punto del sistema no depende de la masa ni de la dirección o sentido en que se lleve a cabo la medición de dicha propiedad física, es

decir, no depende de la cantidad de agua en la alberca ni de ningún sistema de referencia.

Por ejemplo, el agua de una alberca es un medio isotrópico con respecto a la temperatura, ya que el termómetro puede tener cualquier posición dentro del agua y la lectura de la temperatura no cambia, independientemente de las dimensiones de la alberca.

A continuación se analizan otras características de las propiedades termodinámicas que facilitan su identificación en los balances de energía y entropía.

1.3 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS MACROSCÓPICAS INTENSIVAS Y EXTENSIVAS, EJEMPLOS Y OBJETIVO DE ESTA CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES.

Las propiedades termodinámicas, se clasifican como extensivas o intensivas dependiendo de la masa del sistema. Algunas propiedades se cuantifican para toda la cantidad de materia en el sistema, como es el caso del volumen total que ocupa el sistema, o bien, la energía cinética, potencial o interna total del sistema, incluso la can-

tividad de sustancia (mol). Estas propiedades que cambian de valor al cambiar la masa o extensión del sistema son denominadas propiedades extensivas.

PROPIEDAD EXTENSIVA. Es aquella cuyo valor o magnitud cambia si la masa varía. Por lo tanto, las propiedades extensivas dependen de la masa del sistema.

Otras propiedades termodinámicas no dependen de la cantidad total de masa del sistema, no cambia el valor de la propiedad al variar su masa, son independientes de la cantidad de masa del

sistema. Estas son llamadas propiedades termodinámicas intensivas y entre ellas está la presión, la temperatura y todas las propiedades por unidad de masa o propiedades específicas. Debido a que estas propiedades intensivas son invariantes con la masa o extensión del sistema, se utilizan para establecer relaciones termodinámicas de estado del sistema.

PROPIEDAD INTENSIVA. Es aquella cuyo valor o magnitud no cambia cuando varía la masa, las propiedades intensivas son independientes de la masa del sistema. Por ejemplo: la densidad, la capacidad térmica específica, etc.

CANTIDADES VECTORIALES Y ESCALARES

Hay propiedades físicas y en consecuencia termodinámicas que requieren ser ubicadas en el espacio, establecer sus coordenadas con respecto a un sistema de referencia, y gráficamente representarlas con un segmento dirigido, o bien, analíticamente por sus componentes escalares o su expresión trinómica, para conocer su magnitud, dirección y sentido con respecto a ese sistema de referencia. A estas propiedades se les denomina vectoriales y a continuación se define una cantidad vectorial.

CANTIDAD VECTORIAL. Es aquella que, además de su valor o magnitud, se tiene que especificar una dirección y un sentido con respecto a un sistema de referencia; se representa gráficamente con un segmento dirigido y analíticamente por sus componentes escalares o su expresión trinómica. Por ejemplo: el desplazamiento, la velocidad, la aceleración, la fuerza, el campo magnético, etc.

Otras propiedades físicas son invariantes con respecto a su ubicación en el espacio y no dependen de ningún sistema de referencia ya que no tienen dirección o sentido, se definen únicamente por su valor o magnitud.

CANTIDAD ESCALAR. Es toda cantidad física que queda completamente determinada con el valor de su magnitud y por tanto no depende de ningún sistema de referencia. Por ejemplo: presión, temperatura, energía interna específica, capacidad térmica específica, etc.

El conjunto de propiedades termodinámicas de un sistema hacen referencia al nivel energético del sistema termodinámico, es decir, a mayor velocidad mayor energía cinética, a mayor presión y temperatura mayor actividad molecular, etc. Formas de energía que se definen mediante los modelos matemáticos de las diferentes formas de manifestación de la energía que hay en

1.4 CONCEPTO DE PRESIÓN (RELATIVA, ATMOSFÉRICA, ABSOLUTA).

La presión es un concepto que se emplea para el estudio mecánico de los fluidos, ya sean gases o líquidos. Su utilización y aplicación se presenta tanto en la mecánica de fluidos como en la Termodinámica, esencialmente, el concepto de presión y su cuantificación son iguales.

El desarrollo del concepto de presión requiere del desarrollo de conceptos y principios que nos permiten comprender el significado físico de los modelos matemáticos que se desarrollan en el programa de esta asignatura enfocado en la estática de fluidos y que a continuación se presenta.

Propiedades físicas empleadas en la Mecánica de Fluidos y en la Termodinámica.

MASA (m). Desde el punto de vista de la **mecánica**, se define que la masa que tiene un cuerpo es la oposición o resistencia que tiene éste a cambiar su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme.

Para cuantificar la masa, Newton se apoyó en los experimentos de Galileo, los cuales lo llevaron a atribuir a todos los cuerpos una propiedad llamada **inercia (masa)**, entendida como la

oposición que presenta un cuerpo a cambiar su estado inicial de reposo o movimiento rectilíneo uniforme, con respecto a un sistema de referencia, al aplicársele una fuerza. A continuación se define la unidad de fuerza en el SI.

FUERZA (\vec{F}). Con base en la Primera Ley de Newton, la **fuerza** se concibe como la medida del poder o acción de un agente externo que causa un cambio en el estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo, con respecto a un sistema de referencia.

El vector fuerza (\vec{F}) es una cantidad física que representa la acción mecánica de un potencial energético sobre un sistema, generalmente un cuerpo rígido sobre el cual se actúa, como ya se expresó anteriormente.

La unidad de medida de la fuerza es el Newton [N] y es una unidad derivada en el SI, que se obtiene a partir de la Segunda Ley de Newton:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$1\text{Newton}[N] = [1\text{kg}][1\text{m/s}^2]$$

A partir de esta ecuación, a continuación se desarrolla la expresión dimensional de esta cantidad física, como ya se mencionó, con base en la Segunda Ley de Newton.

En el Sistema Internacional de Unidades, la expresión dimensional para la cantidad física fuerza (\vec{F}) es:

$$\left\{ F = M^1 L^1 T^{-2} \right\} \text{ (expresión breve)}$$

En donde el número de dimensiones es $n=3$
con $a_1=1$, $a_2=1$ y $a_3=-2$

La expresión dimensional completa de la fuerza
es:

$$\left\{ F = M^1 L^1 T^{-2} \Theta^0 I_L^0 N^0 \right\}$$

En donde:

M = masa

L = longitud

T = tiempo

I = corriente eléctrica

Θ = temperatura termodinámica

I_L = intensidad luminosa

N = cantidad de sustancia

DENSIDAD (ρ). Es la masa por unidad de volumen que tiene un sistema termodinámico que se encuentre en la fase sólida, líquida o gaseosa, cuya masa se considera que es un medio homogéneo, lineal e isotrópico, y cuya definición matemática se presenta a continuación:

$$\text{Densidad: } \rho = \frac{dm \text{ (kg)}}{dV \text{ (m}^3\text{)}}$$

VOLUMEN ESPECÍFICO (v). Es el inverso de la densidad:

$$v = \frac{dV \text{ (m}^3\text{)}}{dm \text{ (kg)}}$$

Se considera que los sólidos y los fluidos son un medio homogéneo, lineal e isotrópico al que se le denomina un medio continuo, que gráficamente se esquematiza a continuación con la siguiente diferencial de masa “dm” que ocupa una diferencial de volumen “dV”.

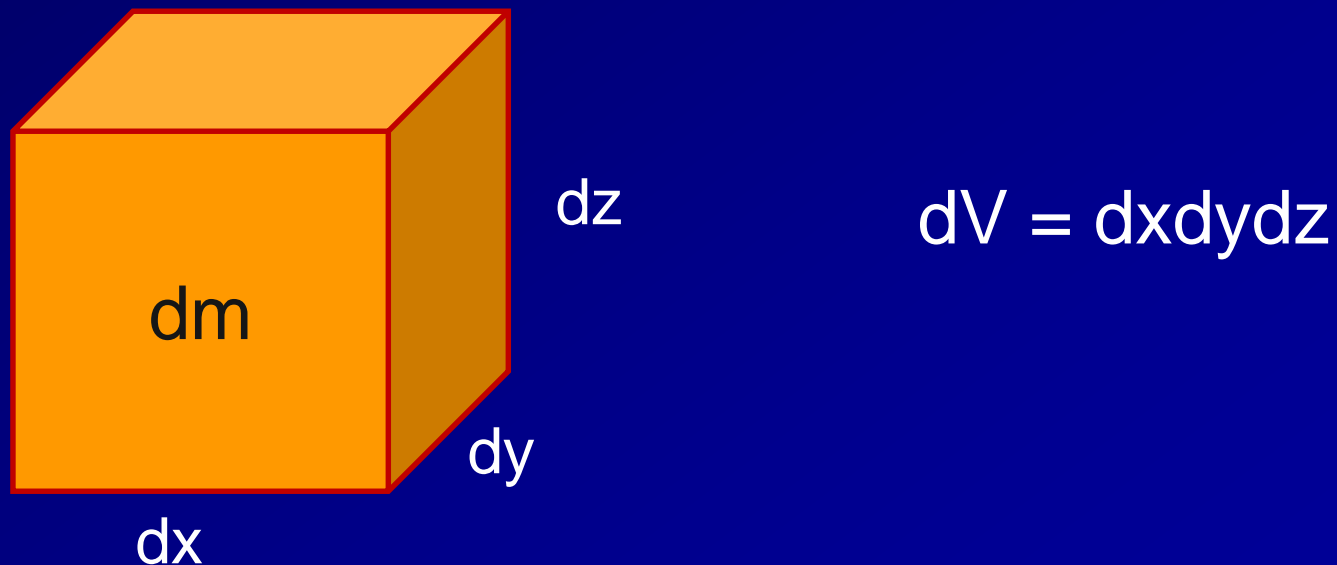


Fig. 1.4.1. Medio continuo.

DENSIDAD RELATIVA (δ). Es la densidad de una sustancia dividida entre la densidad estándar del agua ($\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,000.0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$), por lo tanto, la densidad relativa es adimensional.

$$\delta = \frac{\rho \text{ (sustancia)}}{\rho \text{ (H}_2\text{O)}} [1]$$

PESO ESPECÍFICO ($\vec{\gamma}$). Es el peso de un cuerpo o sistema termodinámico por unidad de volumen. Es una cantidad vectorial, cuya expresión matemática está dada por la siguiente ecuación:

$$\vec{\gamma} = \rho \vec{g} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right]$$

FLUIDO. Es el estado físico de la sustancia o materia cuya característica fundamental consiste en que adopta la forma del recipiente que lo contiene, debido a que sus moléculas no tienen una posición fija entre si, ya que la energía de enlace de las moléculas no es lo suficientemente grande y permite un movimiento relativo entre ellas.

Para llevar a cabo el estudio de la acción de las fuerzas de origen mecánico en los fluidos, es con-

veniente analizar las características de dos tipos de fluidos: líquidos y gases.

LÍQUIDO. En un líquido se considera que sus moléculas conservan, prácticamente, una distancia fija entre ellas, aunque la posición relativa de las moléculas sea variable, como en el caso de las moléculas del agua. Por lo anterior, la variación del volumen es despreciable en los líquidos aún cuando hay cambios de presión y temperatura, por lo cual se considera que su densidad es constante. En los líquidos consideramos que:

$$\rho = \text{constante} \quad (\text{incompresibles})$$

GAS. En un gas se considera que sus moléculas tienen una energía de enlace prácticamente nula, por lo cual la distancia entre ellas es variable, dependiendo de la temperatura y presión del gas. Para que el gas tenga la capacidad de variar su volumen, es necesario que el dispositivo que lo contiene tenga una superficie móvil, como es el caso de un sistema cilindro-émbolo.

Dado que en los gases la distancia molecular es variable:

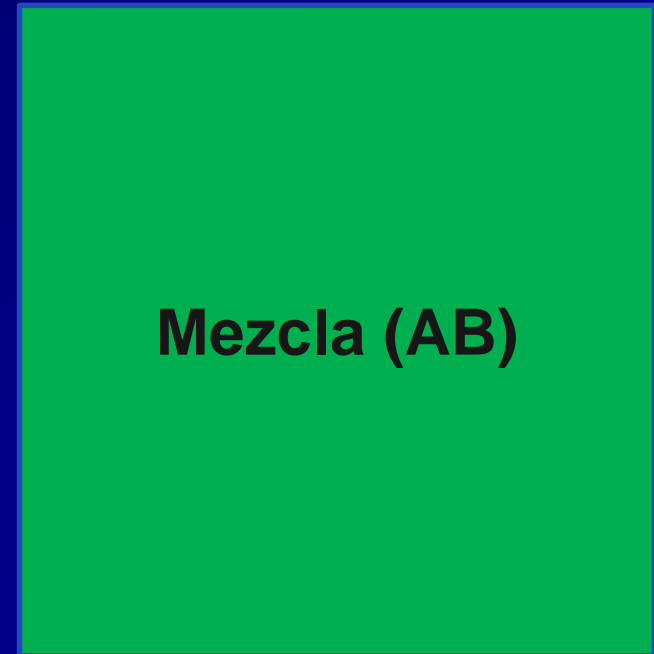
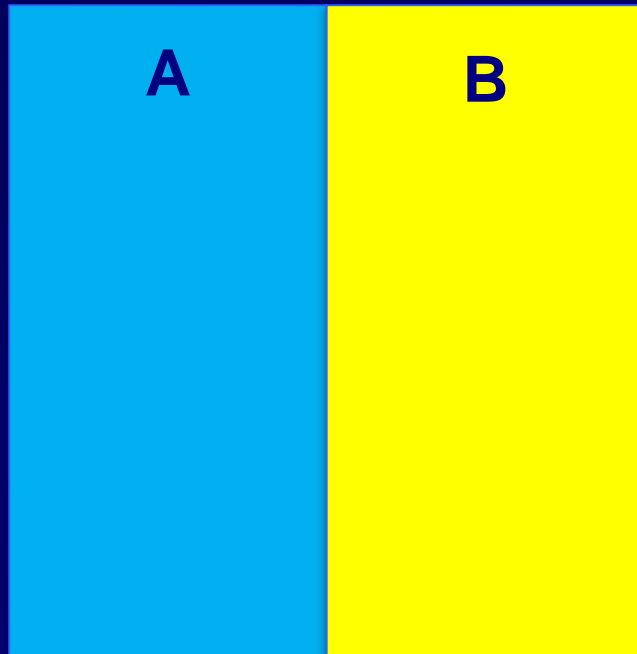
ρ = variable (compresibles)

EJERCICIO 1.4.1

Un depósito de $0.8 \text{ (m}^3\text{)}$ está dividido por una membrana; en una parte «A» hay un gas con un volumen específico de $0.7200 \text{ (m}^3\text{/kg)}$ y en la otra parte «B» otro gas con un volumen específico de $0.3557 \text{ (m}^3\text{/kg)}$. Al romperse la membrana la densidad resultante del fluido es $1.8 \text{ (kg/m}^3\text{)}$.

Determine la masa en (kg) del gas en el compartimiento «B».

RESOLUCIÓN



$$v_A = 0.7200 \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

$$v_B = 0.3557 \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

$$V_{\text{Total}} = 0.8 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\rho_{\text{mezcla}} = 1.8 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$m_B = ? \text{ (kg)}$$

$$\rho_{\text{mezcla}} = \frac{m_{\text{total}}}{V_{\text{total}}} = \frac{m_A + m_B}{V_{\text{total}}} \dots (1)$$

$$v_A = V_A/m_A; \text{ despejando } m_A = V_A/v_A$$

$$V_{\text{total}} = V_A + V_B; \text{ despejando } V_A = V_{\text{total}} - V_B$$

$$\text{Sutituyendo } V_A \text{ en } m_A = \frac{V_{\text{total}} - V_B}{v_A} \dots (2)$$

$$v_B = V_B/m_B; \text{ despejando } V_B = m_B v_B$$

Sustituyendo V_B en la Ec. (2)

$$m_A = \frac{V_{\text{total}} - m_B v_B}{v_A}$$

Sustituyendo m_A en la Ec. (1)

$$\rho_{\text{mezcla}} = \frac{[V_{\text{total}} - (m_B)(v_B)]/(v_A) + m_B}{V_{\text{total}}}$$

$$\rho_{\text{mezcla}} V_{\text{total}} = \frac{V_{\text{total}}}{v_A} - \frac{(m_B)(v_B)}{v_A} + m_B$$

$$\rho_{\text{mezcla}} V_{\text{total}} - \frac{V_{\text{total}}}{v_A} = m_B \left(1 - \frac{v_B}{v_A} \right)$$

Despejando m_B de la ecuación anterior:

$$m_B = \frac{V_{\text{total}} (\rho_{\text{mezcla}} - 1/v_A)}{\left(1 - \frac{v_B}{v_A} \right)}$$

Sustituyendo datos:

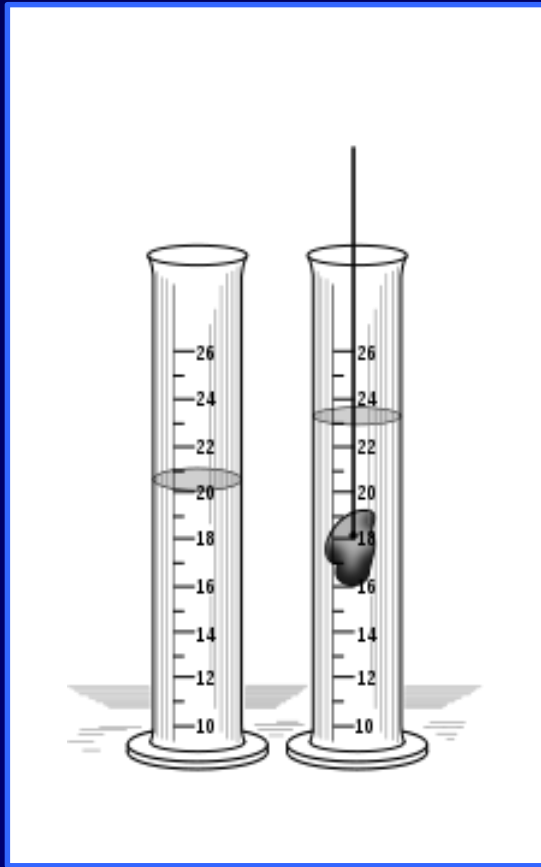
$$m_B = \frac{(0.8)(1.8 - 1/0.72)}{\left(1 - \frac{0.3557}{0.7200}\right)}$$

$$m_B = 0.65 \text{ (kg)}$$

Principio de Arquímedes

El **Principio de Arquímedes** afirma que: «Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba (ascendente) igual al peso del volumen del fluido que desaloja». Esta fuerza recibe el nombre de empuje hidrostático o de Arquímedes, y se mide en Newton (N) (en el SI). Dicho principio se formula así:

$$F_{Asc} = mg = \rho Vg$$



Donde $F_{Asc.}$ es la fuerza ascendente o empuje, ρ es la densidad del fluido, V el «volumen del fluido desplazado» por el cuerpo sumergido parcial o totalmente en el mismo, g la aceleración de la gravedad y m la masa. De este modo, la fuerza ascendente depende de la densidad del fluido, del volumen del cuerpo y de la gravedad existente en ese lugar.

Fig. 1.4.2. Empuje hidrostático.

La fuerza ascendente (*en condiciones normales y descrito de modo simplificado*) actúa verticalmente hacia arriba y está aplicada en el centro de gravedad del fluido desalojado por el cuerpo; este punto recibe el nombre de carena.

Historia: La anécdota más conocida sobre Arquímedes, matemático griego, cuenta cómo inventó un método para determinar el volumen de un objeto con una forma irregular. De acuerdo a Vitruvio, arquitecto de la antigua Roma, una nueva corona con forma de corona triunfal había sido fabricada para Hierón II, tirano gobernador de Siracusa, el cual le pidió a Arquímedes determinar si

la corona estaba hecha de oro sólido o si un orfebre deshonesto le había agregado plata. Arquímedes tenía que resolver el problema sin dañar la corona, así que no podía fundirla y convertirla en un cuerpo regular para calcular su densidad.

Mientras tomaba un baño, notó que el nivel de agua subía en la tina cuando entraba, y así se dio cuenta de que ese efecto podría usarse para determinar el volumen de la corona. Debido a que no hay compresión del agua, la corona, al ser sumergida, desplazaría una cantidad de agua igual a su propio volumen.

Al dividir la masa de la corona por el volumen de agua desplazada, se podría obtener la densidad de la corona.

La densidad de la corona sería menor si otros metales más baratos y menos densos le hubieran sido añadidos. Entonces, Arquímedes salió corriendo desnudo por las calles, tan emocionado estaba por su descubrimiento para recordar vestirse, gritando "¡Eureka!" (en griego antiguo: "εὕρηκα" que significa "¡Lo he encontrado!")"

Datos que podemos conocer del cuerpo (en el vacío) antes de sumergirlo: Por medidas directas podemos conocer: masa y volumen y a partir de estos datos su densidad:

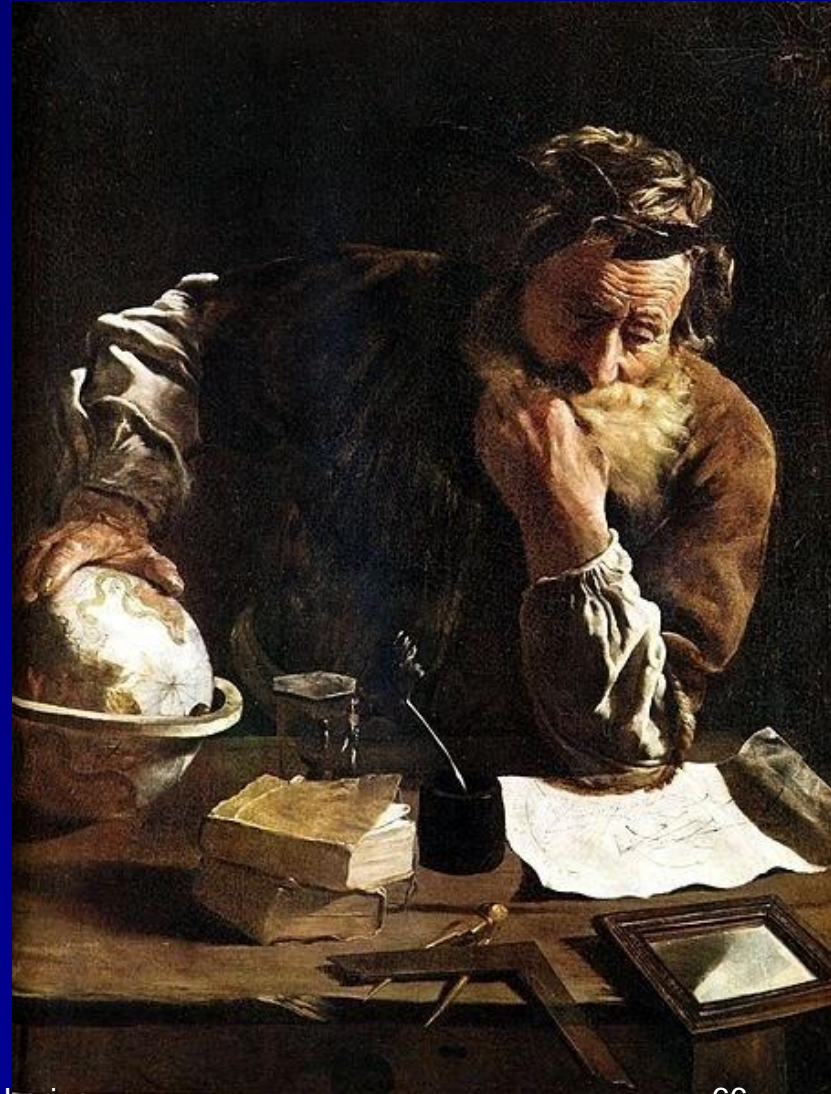
$$\rho = m/V$$

Conocida la masa se puede hallar el peso en el vacío: $\text{Peso} = m \cdot g$. La densidad nos da una idea de como están agrupados los átomos en el cuerpo. Cuanto más pesados sean los átomos y más juntos estén más denso será el cuerpo. Si la densidad del cuerpo es igual o mayor que la del líquido, el cuerpo quedará totalmente sumergido.

ARQUÍMEDES DE SIRACUSA

(287 a.C. - 212 a.C.)

Entre sus avances en física se encuentran sus fundamentos en hidrostática estática y la explicación del principio de la palanca. Es reconocido por haber diseñado innovadoras máquinas, incluyendo armas de asedio y el tornillo de Arquímedes, que lleva su nombre.



EJERCICIO 1.4.2

Una plataforma que flota en el agua tiene una inmersión de 8 (cm), la masa de la plataforma es de 575 (kg). El agua se encuentra en reposo (aguas tranquilas). Considere para el agua: $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$. Cuando un hombre se sube a la plataforma, la inmersión de la plataforma aumenta a 9.4 (cm).

¿Cuál es la masa del hombre en (kg)?

RESOLUCIÓN:

Principio de Arquímedes “La fuerza ascendente que actúa sobre un cuerpo sumergido en un fluido es igual al peso del volumen del líquido desalojado”



Masa del hombre: $m_h = ?$ (kg)

Del Principio de Arquímedes, el peso del hombre es igual al peso del agua desalojada:

$$P_{\text{h}} = F_{\text{asc}}(\text{H}_2\text{O})D_h$$

$$m_h g = m_{\text{H}_2\text{O}}(\text{H}_2\text{O}) g = \rho_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}}(\text{H}_2\text{O}) g \dots (1)$$

El volumen del agua desplazada por el hombre $V_{\text{H}_2\text{O}}(\text{H}_2\text{O})D_h$ es igual a:

$$V_{H_2O})_{Dh} = A_{ph}H_{2O})_{Dh} \dots (2)$$

$$\text{En donde: } h_{H_2O})_{Dh} = 9.4 - 8.0 = 1.4 \text{ (cm)}$$

Para determinar el área de la plataforma, del Principio de Arquímedes, el peso de la plataforma es igual al peso del agua desalojada:

$$\text{Peso})_p = F_{asc})_{H_2O})_{Dp}$$

$$m_{p\cancel{g}} = m_{H_2O})_{Dp\cancel{g}}$$

$$m_p = \rho_{H_2O} V_{H_2O)Dp} = \rho_{H_2O} A_p h_{H_2O)Dp}$$

Despejando el área de la plataforma A_p se tiene:

$$A_p = \frac{m_p}{\rho_{H_2O} h_{H_2O)Dp}} = \frac{575}{(10^3)(0.08)} = 7.1875 \text{ (m}^2\text{)}$$

Sustituyendo datos en la ecuación (2)

$$V_{H_2O)Dh} = A_p h_{H_2O)Dh} = (7.1875)(1.4 \times 10^{-2})$$

$$V_{H_2O)Dh} = 10.06 \times 10^{-2} \text{ (m}^3\text{)}$$

Sustituyendo datos en la ecuación (1)

$$m_h = \rho_{H_2O)Dh} V_{H_2O)Dh} = (10^3)(10.06 \times 10^{-2})$$

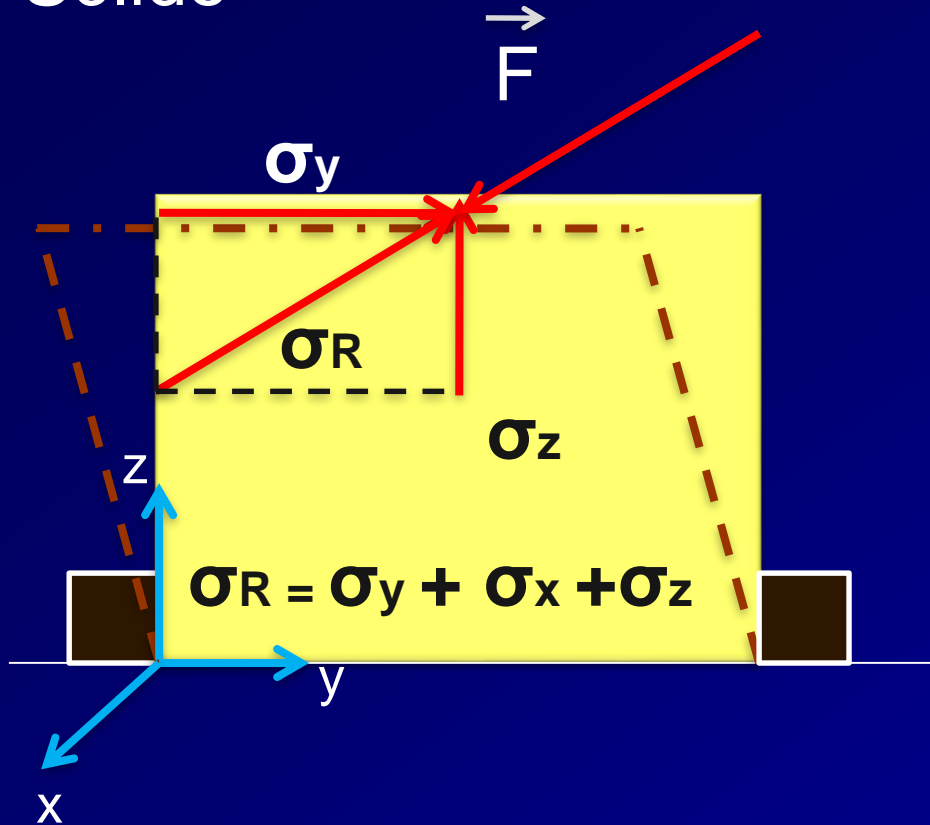
$$m_h = 100.6 \text{ (kg)}$$

ACCIÓN DE UNA FUERZA SOBRE SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASES

La aplicación de una fuerza sobre un sólido produce efectos diferentes a los que resultan cuando la fuerza se aplica sobre un fluido, ya sea un gas o un líquido.

La acción de una fuerza sobre un sólido, de acuerdo a la 3ª Ley de Newton, produce una reacción que se puede descomponer en los esfuerzos que el medio físico opone en las tres direcciones (σ_x , σ_y y σ_z), que son entidades vectoriales asociados a las características mecánicas del sólido sobre el cual actúa dicha fuerza.

Sólido



Por ejemplo, si en la figura se tiene un bloque de madera sobre el cual actúa la fuerza \vec{F} , en principio se presenta una deformación elástica, debido a que la energía de enlace de las

moléculas de la madera mantiene su posición rígida y fija entre sí, de tal manera que soporta la acción de la fuerza.

Fig. 1.4.3. Acción de una fuerza en un sólido.

La energía de enlace de las moléculas del sólido es lo suficientemente grande para mantenerlas fijas entre si, lo que no ocurre con la energía de enlace de las moléculas de los líquidos y gases, es por ello que el análisis de fuerzas que actúan sobre un sólido es diferente en los fluidos.

En el caso de los fluidos (líquidos o gases) y dadas las características mencionadas anteriormente, la aplicación de una fuerza no puede llevarse a cabo como en el caso de los sólidos, ya que éstos, por su estructura molecular «soportan» la acción directa de una fuerza.

En los fluidos, al aplicarles una fuerza, ésta «resbala» debido a que la energía de enlace de sus moléculas es «débil» y no las mantiene en una posición fija entre sí, no hay la rigidez de las moléculas del sólido.

En la Fig. 1.4.4. se representa esquemáticamente la acción de una fuerza sobre un gas y sobre un líquido.

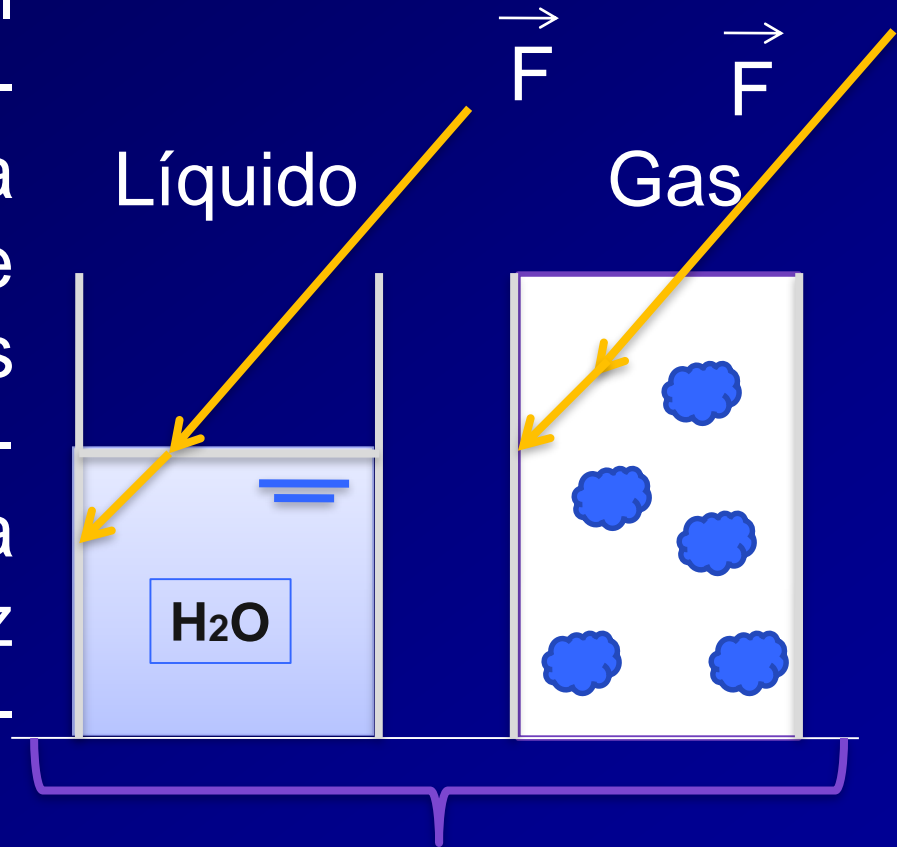
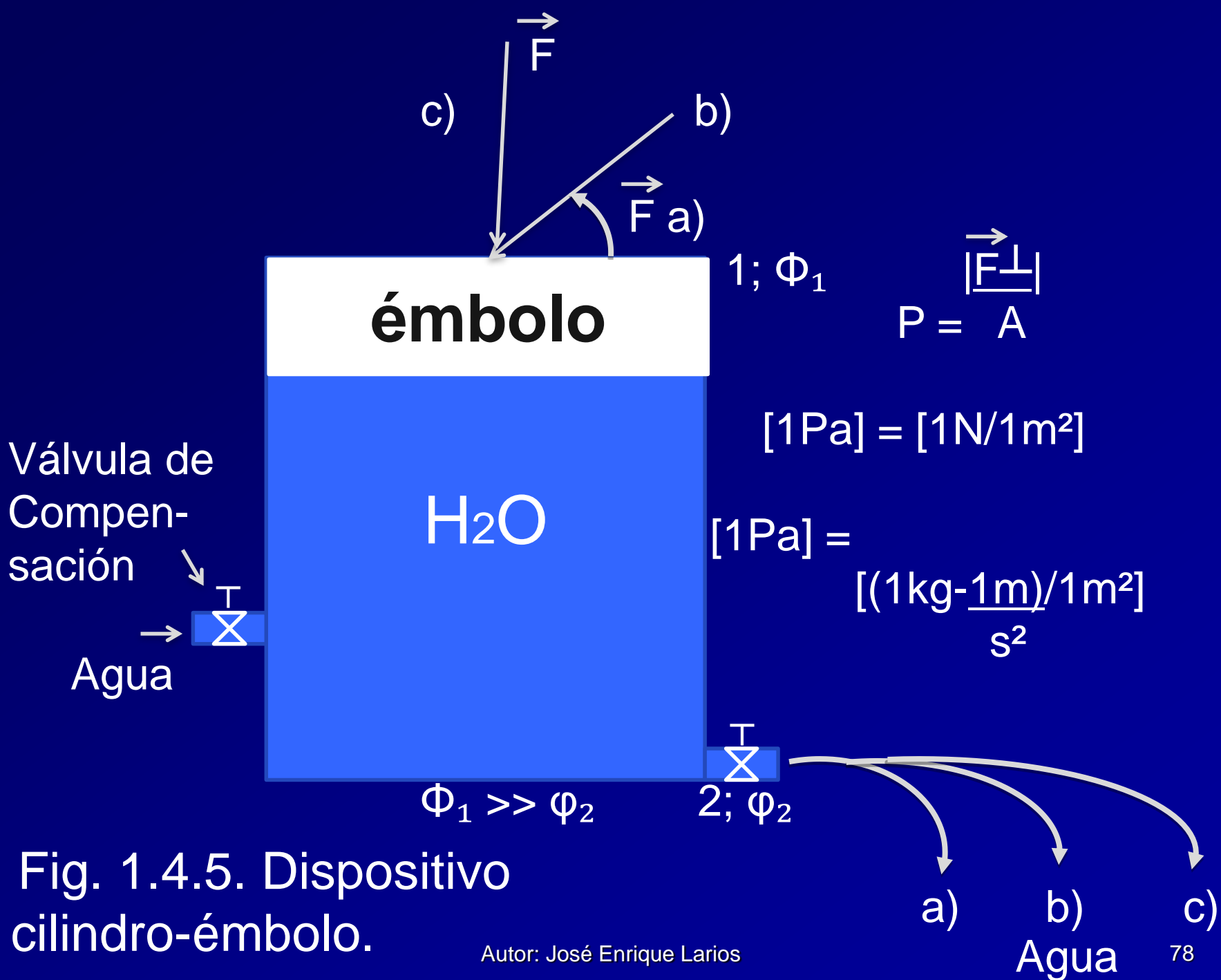


Fig. 1.4.4. Acción de una fuerza en fluidos estáticos: gases y líquidos.

CONCEPTO DE PRESIÓN MECÁNICA EN UN FLUIDO ESTÁTICO

Para que la fuerza aplicada sobre un fluido no “resbale”, ésta debe actuar sobre una superficie movable que transmita al fluido la acción mecánica de una fuerza, lo cual implica que el fluido debe estar confinado en un sistema cerrado, como por ejemplo en un sistema cilindro-émbolo como el que se muestra en la Fig. 1.4.5. que contiene agua que se le mantiene a una altura constante mediante una válvula de control que compensa el agua que se pierde en el fondo del tanque en estudio, que tiene un diámetro “mucho mayor” que el diámetro de la válvula de desfogue.



Si sobre el pistón actúa una fuerza \vec{F} en la posición a), cuando la fuerza es tangente al pistón (0°), se observa que el chorro de agua que sale del fondo por la válvula de desfogue no manifiesta cambio en la distancia que alcanza. Si se aumenta el ángulo de acción de la fuerza \vec{F} , por ejemplo a la posición b), la distancia que alcanza el chorro de agua que sale por la válvula de desfogue aumenta. La máxima distancia que alcanza el chorro de agua que sale del fondo del tanque por la válvula de desfogue, se presenta cuando la fuerza \vec{F} es perpendicular al pistón (90°), concluyendo que sólo la componente perpendicular de la fuerza \vec{F} transmite, a través del pistón, su acción sobre el agua contenida en el tanque a una altura constante.

Por tanto, a la acción de la fuerza perpendicular sobre el pistón se le denomina presión mecánica que se ejerce sobre el agua contenida en el sistema cilindro-émbolo, de la Fig. 1.4.5.. En este caso, la cara inferior del pistón transmite \vec{a} a las moléculas del agua la acción de la fuerza \vec{F} .

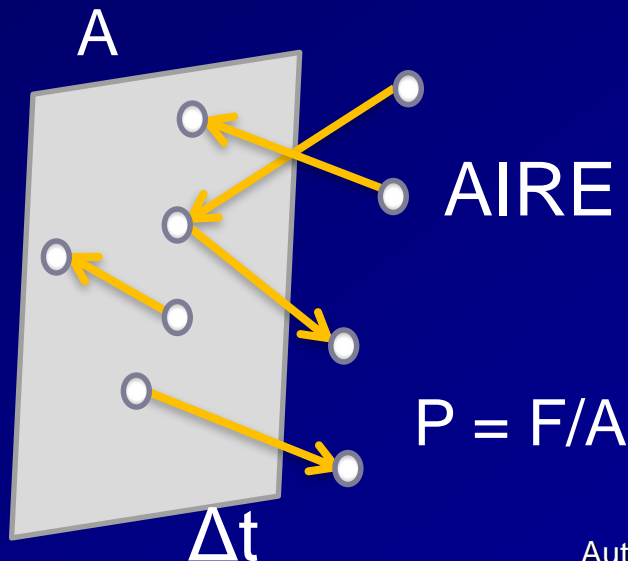
Por otra parte, las moléculas del agua de la Fig. 1.4.5 transmiten la acción de la fuerza por unidad de área a las paredes interiores del cilindro. La presión mecánica que ejercen las moléculas del agua dentro del recipiente se transmite en todas direcciones y sentidos, como se verá posteriormente con el Principio de Pascal.

A la presión mecánica sobre un fluido se le denota con la letra “P”, y desde el punto de vista macroscópico, la presión “P” en un fluido confinado es la fuerza “F” con la que un agente externo actúa a través de una superficie “A”, y sólo en dirección perpendicular a esta, como analíticamente se indica en la ecuación siguiente, definiendo al “Pascal” como la unidad en que se mide la presión en el SI.

$$\frac{|\vec{F}|}{A} = P; \frac{1 \text{ [Newton]}}{1 \text{ [metro}^2\text{]}} = 1 \text{ [Pascal]} = 1 \text{ [Pa]}$$

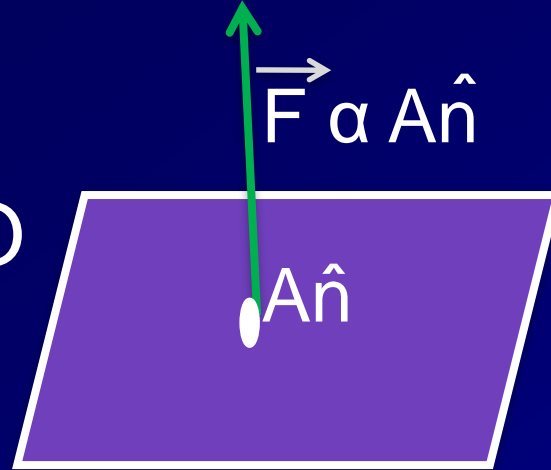
Otro ejemplo son las moléculas del aire atmosférico que ejercen una fuerza neta perpendicular a cualquier superficie denominada presión atmosférica.

Fig. 1.4.6. Presión de un gas.



Desde el punto de vista microscópico, la presión en un gas es el promedio de la fuerza con la que chocan sus moléculas sobre una superficie, debido al cambio de la cantidad de movimiento de dichas moléculas.

CONCEPTO MATEMÁTICO DE LA PRESIÓN.



\vec{F} = Fuerza [N]
 P = Presión [N/m²]
 \hat{n} = Vector unitario normal
 A = Área [m²]

Matemáticamente, la presión (P) se puede expresar como una constante de proporcionalidad que permite relacionar el vector fuerza (\vec{F}) con la representación vectorial de la superficie ($A\hat{n}$).

$$\vec{F} = PA\hat{n}$$

$$[N] = \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot [m^2]$$

Fig. 1.4.7. Expresión matemática de la presión. 83

EXPRESIÓN DIMENSIONAL Y UNIDAD DE MEDICIÓN DE LA PRESIÓN EN EL SI.

Con base en la definición de presión y de las dos ecuaciones anteriores, a continuación se desarrolla la expresión dimensional en el Sistema Internacional de Unidades de la cantidad física que denominamos presión (P):

$$\left\{ P = M^1 L^{-1} T^{-2} \right\} \text{ (expresión breve)}$$

En donde el número de dimensiones es $n=3$
con $a_1 = 1$, $a_2 = -1$ y $a_3 = -2$

La expresión dimensional completa de la presión
es:

$$\left\{ P = M^1 L^{-1} T^{-2} I^0 \Theta^0 IL^0 N^0 \right\}$$

En donde:

M = masa

L = longitud

T = tiempo

I = corriente eléctrica

Θ = temperatura termodinámica

IL = intensidad luminosa

N = cantidad de sustancia

ENUNCIADO DE PASCAL

“La fuerza aplicada sobre un fluido confinado se manifiesta en todas direcciones y sentidos, siempre perpendicular a la superficie sobre la que actúa.”

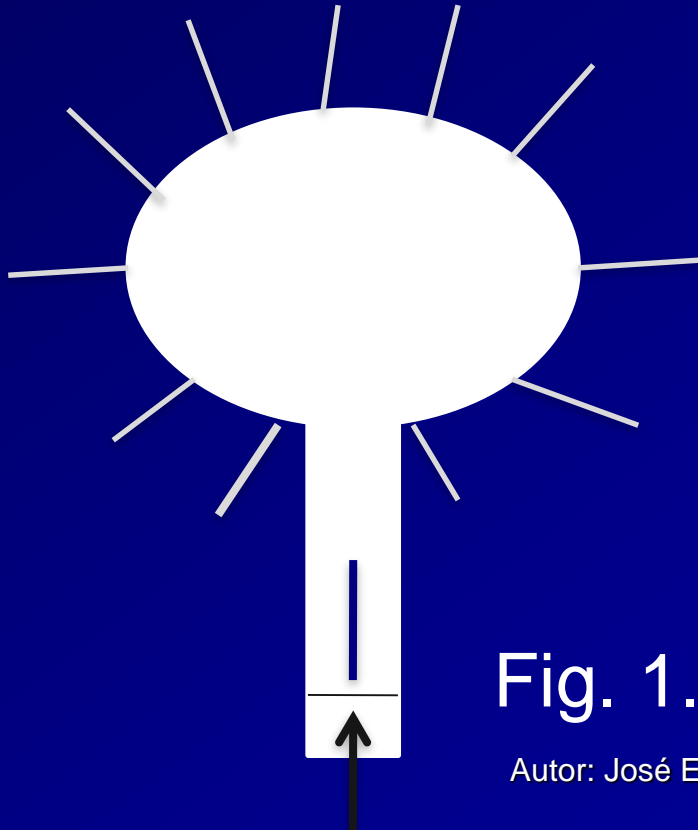


Fig. 1.4.8. Bomba de Pascal.

BOMBA DE PASCAL



BLAISE PASCAL

(1623 – 1662) Matemático, físico, filósofo católico y escritor. Sus contribuciones a las matemáticas y las ciencias naturales incluyen el diseño y construcción de calculadoras mecánicas, aportes a la teoría de probabilidad, investigaciones sobre los fluidos y la aclaración de conceptos tales como la presión y el vacío.



ESTÁTICA DE FLUIDOS

El objetivo de este subtema es la obtención del modelo matemático que relaciona la variación de la presión de un fluido en reposo o estático con respecto a la profundidad, es decir, como varía la presión con respecto a la variación en la dirección del eje “Z” de un sistema de referencia.

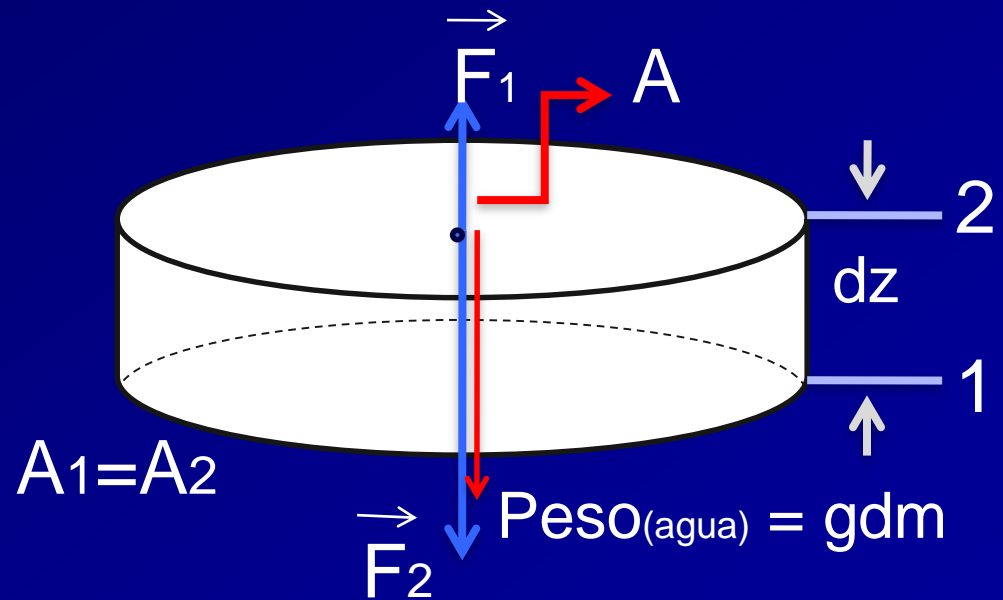
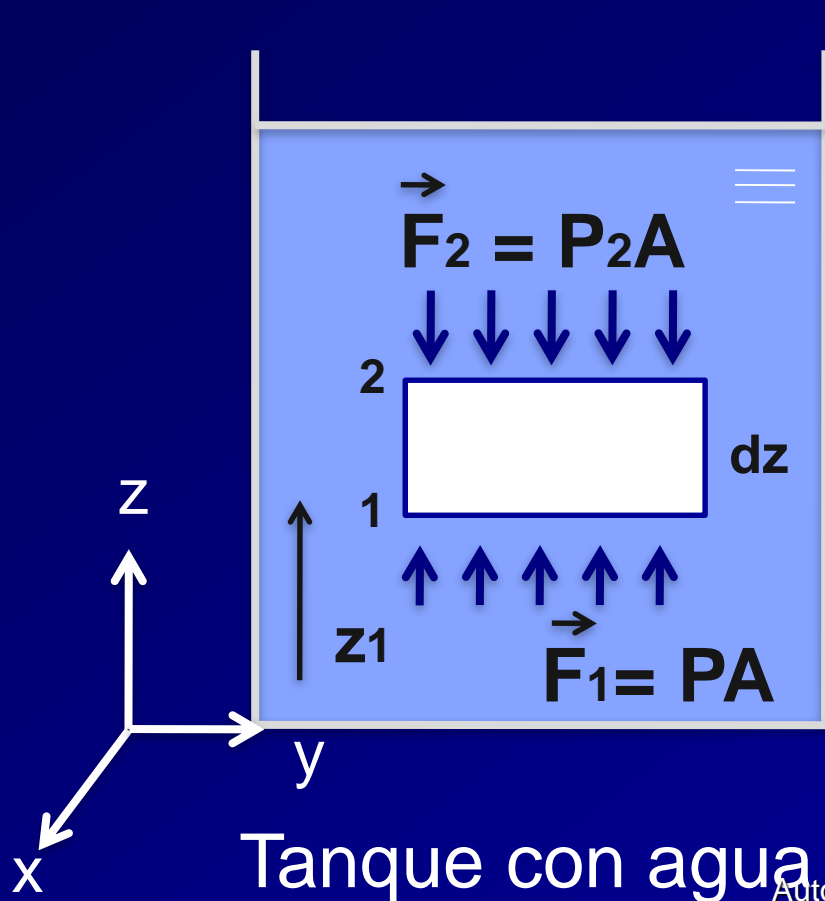
A continuación se hace un análisis de fuerzas en una diferencial de fluido en reposo, por ejemplo agua contenida en un tanque. El agua permanece en reposo con respecto a un sistema de referencia y por lo tanto la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre el fluido es igual a cero.

En la diapositiva siguiente se presenta el análisis de fuerzas sobre una diferencial del elemento de agua de forma cilíndrica de espesor « dZ » y con caras de área « A ». No se efectúan análisis de fuerzas en las direcciones « X » y « Y » ya que nuestra experiencia nos muestra que la presión únicamente varía en la dirección « Z », es decir, verticalmente.

El modelo matemático que se busca, además de relacionar la variación de la presión del agua con respecto a la variación en la dirección del eje “ Z ”, involucra otras variables físicas, propiedades físicas del fluido presentes en el fenómeno del fluido estático en estudio.

Fig. 1.4.9. Análisis de fuerzas en un fluido estático.

$$\Sigma F_z = F_1 - F_2 - gdm = 0 \dots (1)$$



$dm =$ diferencial de masa de agua

Si nos sumergirnos en el tanque de agua que se muestra en la figura, tenemos la experiencia de que al bajar en el agua, percibimos que se intensifica un malestar en nuestro oído y decimos que es debido a que la presión del agua aumenta.

Si nos desplazamos en el plano «XY» (horizontalmente) no se percibe ningún efecto en nuestro oído, únicamente si el desplazamiento se da en la dirección «Z» se aprecia variación de presión en el oído, esto es, en el agua la presión “P” es una función de la altura “Z”, por tanto:

$$P = P(Z)$$

Entonces, de acuerdo al sistema de referencia que se muestra en la figura anterior.

$$P_1 \rightarrow z_1; \quad P_2 = P_1 + dP \rightarrow z_2 = z_1 + dz$$

Por otra parte, de la ecuación $P = F/A$ que se desarrolló anteriormente, se despeja F para los puntos 1 y 2 del elemento de agua en estudio, quedando:

$$F_1 = AP_1, \text{ y } F_2 = AP_2 = A(P_1 + dP)$$

Sustituyendo estos términos en la ecuación (1), se tiene que:

$$\Sigma F_z = P_1A - P_2A - gdm = 0$$

Sustituyendo $P_2 = P_1 + dP$ en la Ec. anterior:

$$\Sigma F_z = P_1A - (P_1 + dP)A - gdm = 0$$

Desarrollando el producto y simplificando términos:

$$\Sigma F_z = \cancel{P_1A} - \cancel{P_1A} - AdP - gdm = 0$$

Despejando “dP” de la ecuación anterior:

$$dP = \frac{-dmg}{A} \left[\frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{\text{m}^2}}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

De la definición de densidad, la diferencial de masa se expresa como: $dm = \rho dV = \rho Adz$

Sustituyendo dm en la ecuación anterior:

$$dP = \frac{-\cancel{\rho} \cancel{A} dz g}{\cancel{A}}$$

Quedando lo que se conoce como:

ECUACIÓN DEL GRADIENTE DE PRESIÓN GRAVITACIONAL EN FLUIDOS ESTÁTICOS.

$$dP = -\rho g dz \text{ (Pa)}$$

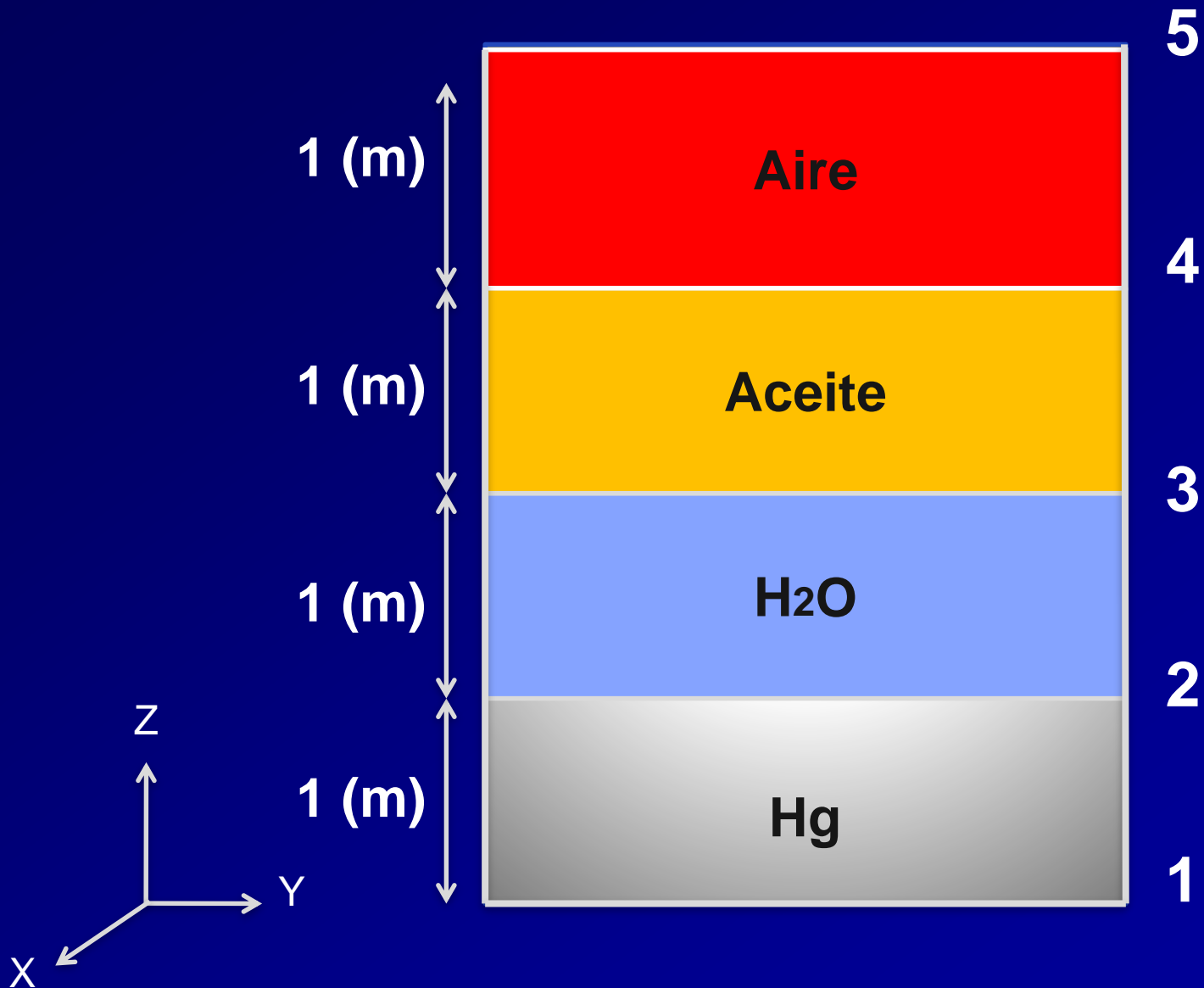
La ecuación anterior expresa la variación de la presión en la dirección del campo gravitatorio, es decir, perpendicular a la superficie terres-tre.

EJERCICIO: 1.4.3

En el tanque hermético que se muestra en la figura se tienen mercurio, agua, aceite y aire. La presión del aire es de 150 (kPa). La aceleración de la gravedad local es de 9.8 (m/s²) y las densidades relativas son, respectivamente:

$$\delta_{\text{Hg}} = 13.6, \delta_{\text{H}_2\text{O}} = 1, \delta_{\text{aceite}} = 0.86, \delta_{\text{aire}} = 1.23 \times 10^{-3}$$

Calcule la presión en el fondo del tanque.



RESOLUCIÓN :

Aplicando la Ec. del Gradiente de Presión:

$$dP = -\rho g dz$$

$$\int_1^2 dP = \int_1^2 -\rho g dz$$

$$P_2 - P_1 = -\rho g(z_2 - z_1)_{Hg}$$

$$P_f = P_1 = P_2 + \rho g h)_{Hg} \dots(1)$$

$$\int_2^3 dP = \int_2^3 -\rho g dz$$

$$P_3 - P_2 = -\rho g(z_3 - z_2)_{H_2O}$$

$$P_2 = P_3 + \rho g h)_{H_2O} \dots (2)$$

Sustituyendo la ecuación (2) en (1)

$$P_f = P_3 + \rho g h)_{H_2O} + \rho g h)_{Hg} \dots (3)$$

$$\int_3^4 dP = \int_3^4 -\rho g dz$$

$$P_4 - P_3 = -\rho g (z_4 - z_3)_{aceite}$$

$$P_3 = P_4 + \rho g h)_{aceite} \dots (4)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en (3)

$$P_f = P_4 + \rho g h)_{\text{aceite}} + \rho g h)_{\text{H}_2\text{O}} + \rho g h)_{\text{Hg}} \dots (5)$$

$$\int_4^5 dP = \int_4^5 -\rho g dz$$

$$P_5 - P_4 = -\rho g dz)_{\text{aire}}$$

$$P_4 = P_5 + \rho g h)_{\text{aire}} \dots (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en (5)

$$P_f = P_5 + \rho g h)_{\text{aire}} + \rho g h)_{\text{aceite}} + \rho g h)_{\text{H}_2\text{O}} + \rho g h)_{\text{Hg}}$$

$$P_f = P_{\text{aire}} + \rho g h)_{\text{aire}} + \rho g h)_{\text{aceite}} + \rho g h)_{\text{H}_2\text{O}} + \rho g h)_{\text{Hg}} \dots (7)$$

$$P_f = 150,000 + (1.23)(9.8)(1) + (860)(9.8)(1) +$$

$$(10^3)(9.8)(1) + (13,600)(9.8)(1)$$

$$P_f = 150,000 + 12.054 + 8,428 + 9,800 + 133,280$$

$$P_f = 301,520.054 \text{ (Pa)}$$

Análisis físico: La presión en el fondo del tanque es la suma de las presiones del aire y de las cuatro presiones de las columnas de los fluidos. Si no se considera la presión de la columna de aire: $\rho gh)_{\text{aire}}$

$$P_{f'} = P_f - \rho gh)_{\text{aire}} = 301,520.054 - 12.054 = 301,508.0 \text{ (Pa)}$$

Calculando el error de exactitud

$$\%EE\rho gh)_{\text{aire}} = \left| \frac{P_f - P_{f'}}{P_f} \right| \times 100$$

$$\%EE\rho gh)_{\text{aire}} = \left| \frac{301,520.054 - 301,508.0}{301,520.054} \right| \times 100$$

$$301,520.054$$

$$\%E(\rho gh)_{\text{aire}} = 0.0039977\%$$

Por lo tanto, es despreciable el término:

$$(\rho gh)_{\text{aire}} = 12.054 \text{ (Pa)}$$

Por lo cual, se puede generalizar que la presión que ejerce el peso por unidad de área de una columna de un gas es despreciable. Excepto el aire de la atmósfera.

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Es la presión que ejerce una columna de aire en cualquier punto dentro de la atmósfera terrestre, debido al peso por unidad de área que ejerce dicha columna desde el punto en cuestión hasta donde termina la atmósfera.

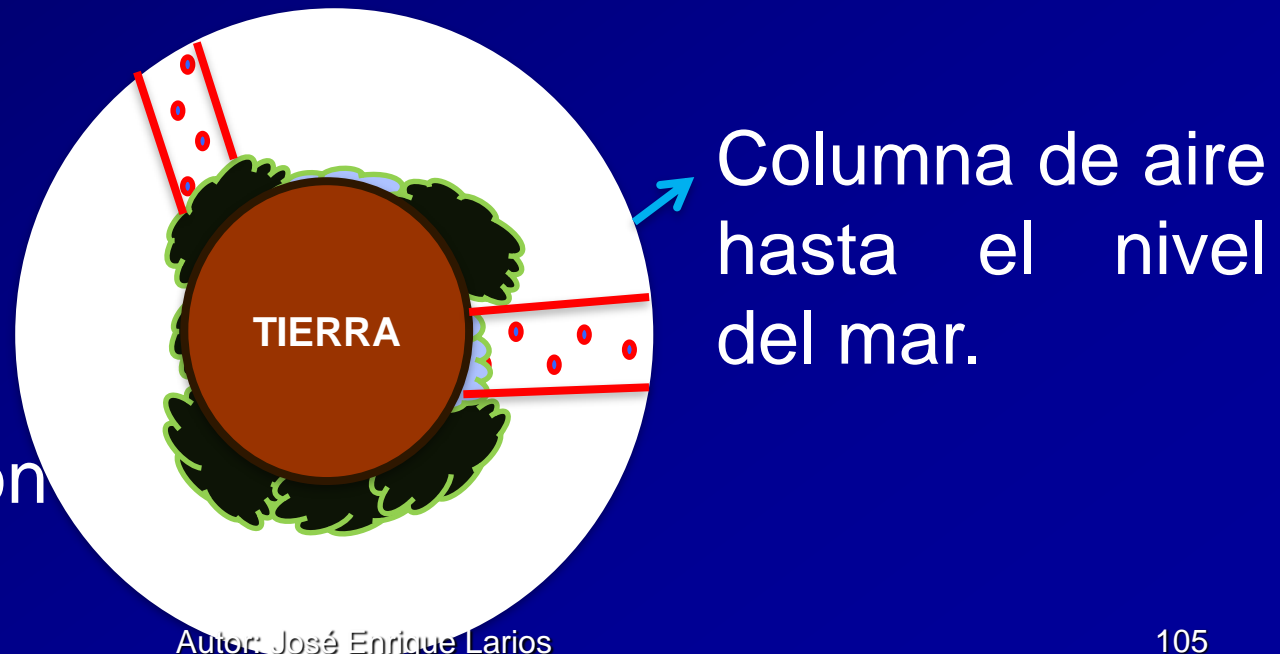
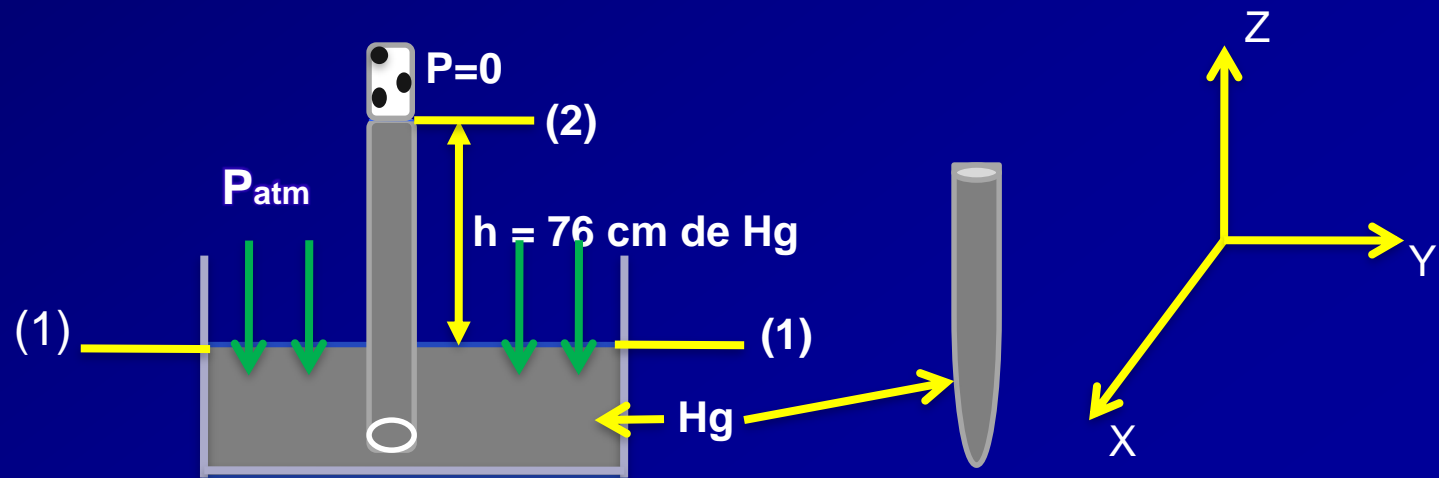


Fig. 1.4.10. Presión Atmosférica.

BARÓMETRO DE TORRICELLI

Es el instrumento de medición empírico de la presión atmosférica que permite cuantificar el peso por unidad de área de las moléculas de la columna de aire, equilibrándola con una columna de mercurio cuyo peso por unidad de área de las moléculas de mercurio ejerza la misma presión.

Fig. 1.4.11.
Barómetro
de Torricelli.



Para cuantificar la presión que ejercen las moléculas de aire desde el nivel del mar hasta donde termina la atmósfera, se aplica la Ecuación del Gradiente de Presión al Barómetro de Torricelli de la figura anterior:

$$\int_1^2 dP = - \int_1^2 \rho g dz$$

$$P_2 - P_1 = -\rho_{Hg}g(z_2 - z_1) = -\rho gh)$$

barómetro

$$P_2 - P_1 = -P_{atm} = -\rho gh), \text{ en donde: } P_1 = P_{atm}$$

barómetro

$$P_{\text{atm}} = \rho gh) \text{ Barómetro}$$

BARÓMETRO DE TORRICELLI. Es el instrumento de medición que permite cuantificar el valor absoluto de la presión atmosférica de la columna de aire (peso de las moléculas del aire por unidad de área) que se ejerce en cada punto de la atmósfera terrestre. La presión atmosférica a nivel del mar es igual a:

$$P_{\text{atm}} = 101,325.0 \text{ [Pa]}$$

Nivel del Mar

La presión atmosférica medida con el Barómetro de Torricelli es la presión absoluta o total que ejerce el peso de las moléculas de aire atmosférico por unidad de área sobre un punto cualquiera de la superficie terrestre.

La presión absoluta o total de un fluido es la fuerza que ejercen las moléculas del fluido sobre una superficie, por ejemplo, la del recipiente que lo contiene. Si este fluido está confinado en un sistema cilindro-émbolo, esta presión absoluta es equivalente a la fuerza total que ejerce la cara interior del émbolo sobre el fluido.

EVANGELISTA TORRICELLI

(1608-1647) Matemático y físico italiano. Descubrió y determinó el valor de la presión atmosférica y en 1643 inventó el barómetro. Una unidad de medida, el torr, utilizada en física para indicar la presión barométrica cuando se trabaja en condiciones cercanas al vacío, se denomina así en su honor.



EJERCICIO: 1.4.4

- a) Determine la presión atmosférica en la Ciudad de México, empleando la Ecuación del Gradiente de Presión. La altura en el Zócalo de la Ciudad de México es de 2,246.0 (m).

- b) Para el resultado del inciso anterior determine el %EE si la altura barométrica en la Ciudad de México es de 58.6 (cm de Hg).

Considere que el aire atmosférico se comporta como Gas Ideal; que su temperatura promedio es constante y de 20 ($^{\circ}\text{C}$), y que las corrientes del aire en la atmósfera son despreciables. La presión atmosférica al nivel del mar es de 101,325.0 (Pa) y la aceleración de la gravedad es de 9.807 (m/s^2).

RESOLUCIÓN

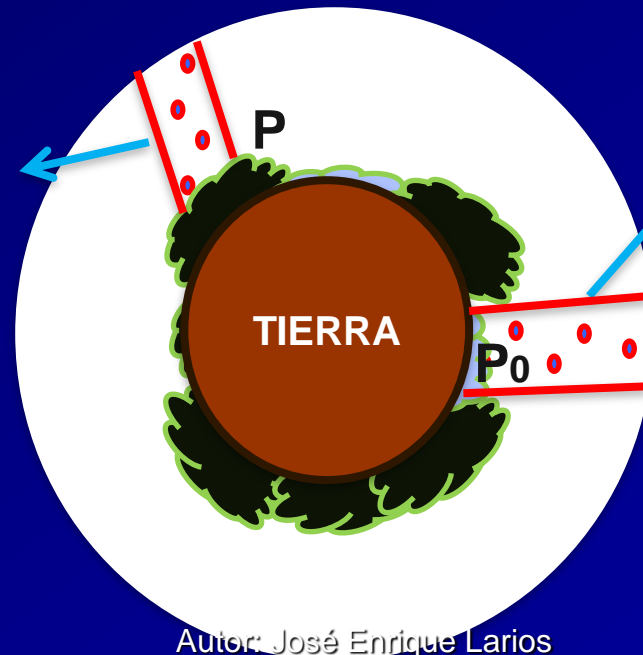
a) Se aplica la Ecuación del Gradiente de Presión:

$$dP = -\rho g dz$$

para obtener un modelo matemático, considerando que el aire de la atmósfera se comporta como Gas Ideal: $PV = mRT$

Columna de aire hasta el Zócalo al nivel de la Ciudad de México.

$$\rho = 0$$



Columna de aire hasta el Nivel del Mar.

Dividiendo la ecuación del Gas Ideal entre V:

$$\frac{PV}{V} = \frac{mRT}{V} = P = \rho RT$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho RT}{\rho_0 RT} \text{ (cualquier punto arriba del nivel del mar)}$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \text{ (al nivel del mar)}$$

Sustituyendo en la Ec. del Gradiente de Presión

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} ; \rho = \rho_0 \frac{P}{P_0} ;$$

$$dP = -\rho_0 \frac{P}{P_0} g dz$$

$$\frac{dP}{P} = -\rho_0 g dz$$

$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}$ sustituyendo en la ecuación anterior

$$\frac{dP}{P} = - \frac{\cancel{P_0}}{RT_0} \frac{g}{\cancel{P_0}} dz$$

$$\frac{g}{RT_0} = \frac{9.807}{(286.98)(293.15)} = 1.1657 \times 10^{-4}$$

$$\alpha = 1.1657 \times 10^{-4} \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$\frac{\frac{\cancel{m}}{g^2}}{\left[\frac{\cancel{\text{kg} \cdot \cancel{m} / \cancel{\text{s}^2} \cdot \cancel{m}}{\cancel{\text{kg}} \cdot \cancel{K}} \right] \cancel{(K)}} = \text{(m}^{-1}\text{)}$$

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = \int_{Z_0}^Z -\alpha dz ; \text{ Integrando}$$

$$\ln \left(\frac{P}{P_0} \right) = -\alpha z \Big|_{z_0}^z$$

$$[\ln (P/P_0)] = [-\alpha(z - z_0)]$$

En donde:

$z - z_0 = h$, es la altura sobre el nivel del mar

$$P/P_0 = e^{-\alpha h}; \text{ Despejando: } P = P_0 e^{-\alpha h}$$

$$P_{CdeM} = (101,325.0) e^{-(1.1657 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1})(2246 \text{ m})}$$

$$P_{\text{modelo}} = P_{C.deM} = 77,985.03 \text{ (Pa)}$$

b) Para determinar el %EE (Porcentaje de Error de Exactitud) del modelo matemático y considerando que es confiable para su uso en ingeniería, si su error de exactitud no excede en un 2%, a continuación se determina este parámetro.

$$\%EE = \frac{|P_{\text{barom}} - P_{\text{modelo}}|}{P_{\text{barom}}} \times 100$$

$$P'_{\text{CdeM}} = P_{\text{barom}} = \rho gh)_{\text{barom}} = (13,600)(9.78)(0.586)$$

$$P'_{\text{CdeM}} = 77,942.79 \text{ (Pa)}$$

$$\%EE = \frac{|(77,942.79 - 77,985.03)|}{77,942.79} \times 100$$

$$\%EE = 0.0542 (\%)$$

PRESIONES ABSOLUTA Y RELATIVA

PRESIÓN ABSOLUTA. Es la fuerza que ejercen las moléculas de un fluido sobre la superficie de las paredes del recipiente que lo contiene. En el caso de la presión atmosférica, es la fuerza total que ejerce el peso de las moléculas de aire atmosférico por unidad de área, en un punto cualesquiera de la superficie terrestre.

Si un fluido está contenido en un sistema cilindro-émbolo, la fuerza total que actúa sobre el área del émbolo produce una presión absoluta en el fluido.

PRESIÓN RELATIVA. Es la presión de un fluido medida con referencia a la presión de otro fluido. No es la cuantificación de la fuerza total que ejercen las moléculas del fluido sobre la superficie de las paredes del recipiente que lo contiene.

Generalmente, la presión relativa hace referencia a la presión del aire atmosférico que actúa sobre un punto cualesquiera de la superficie terrestre. Para cuantificar la presión de un fluido confinado en un sistema cerrado, se emplea un instrumento de medición denominado manómetro y cuyo punto de referencia ($0'$) es la presión atmosférica local, por lo que un manómetro mide presiones relativas.

MANÓMETRO. Es el instrumento de medición de presión que indica valores relativos, de la fuerza por unidad de área que ejerce un fluido, con respecto a la presión atmosférica. En la siguiente diapositiva se observa que al estar desconectado el manómetro en «U» se presenta equilibrio (igual altura en las dos columnas) en la sustancia manométrica, por lo cual el “0” del manómetro en “U” ya “incluye” la presión atmosférica local.

PRESIÓN MANOMÉTRICA. Es la presión de un fluido dada por un instrumento de medición denominado manómetro, cuyo valor medido es relativo a la presión atmosférica local.

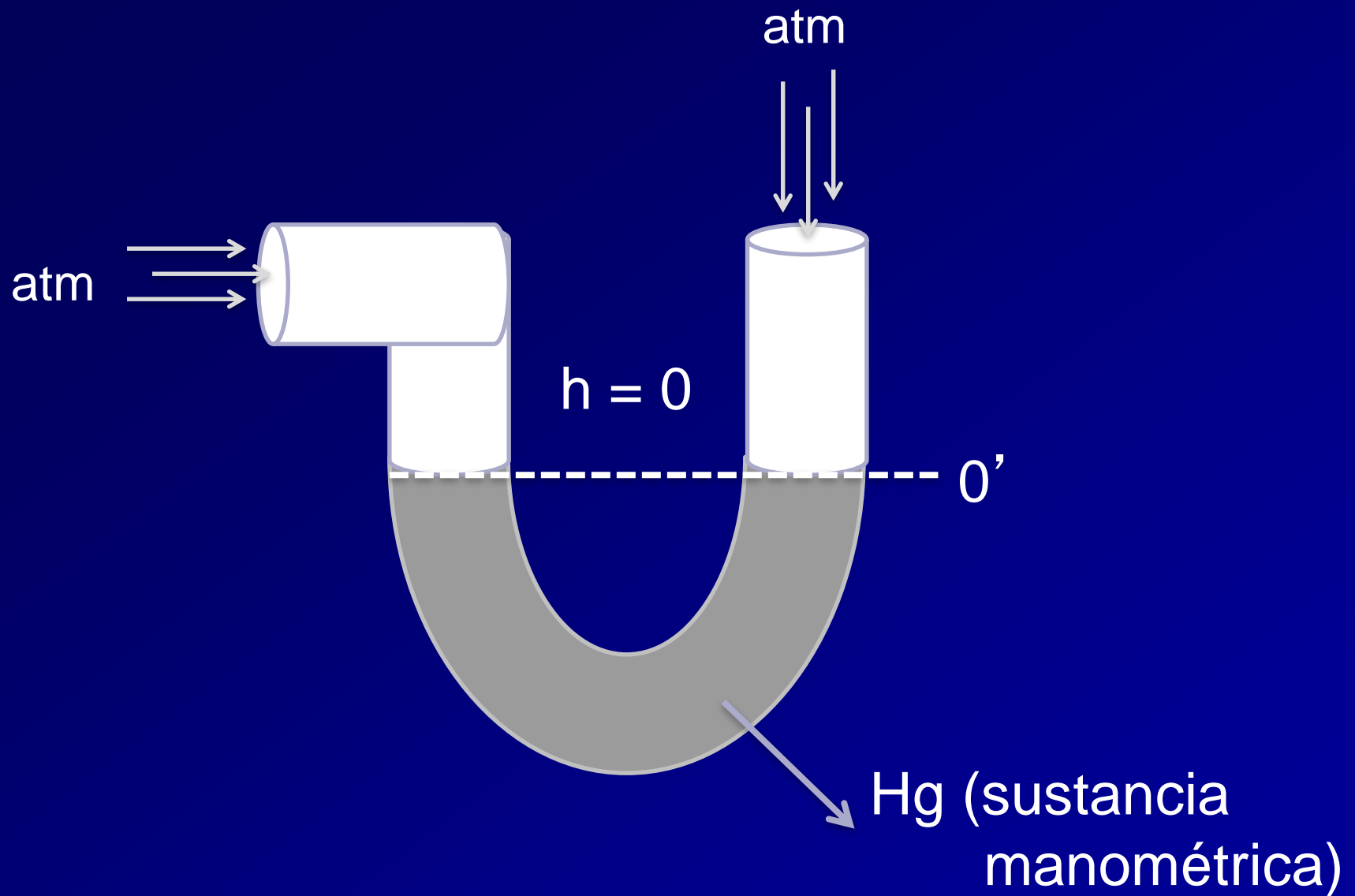
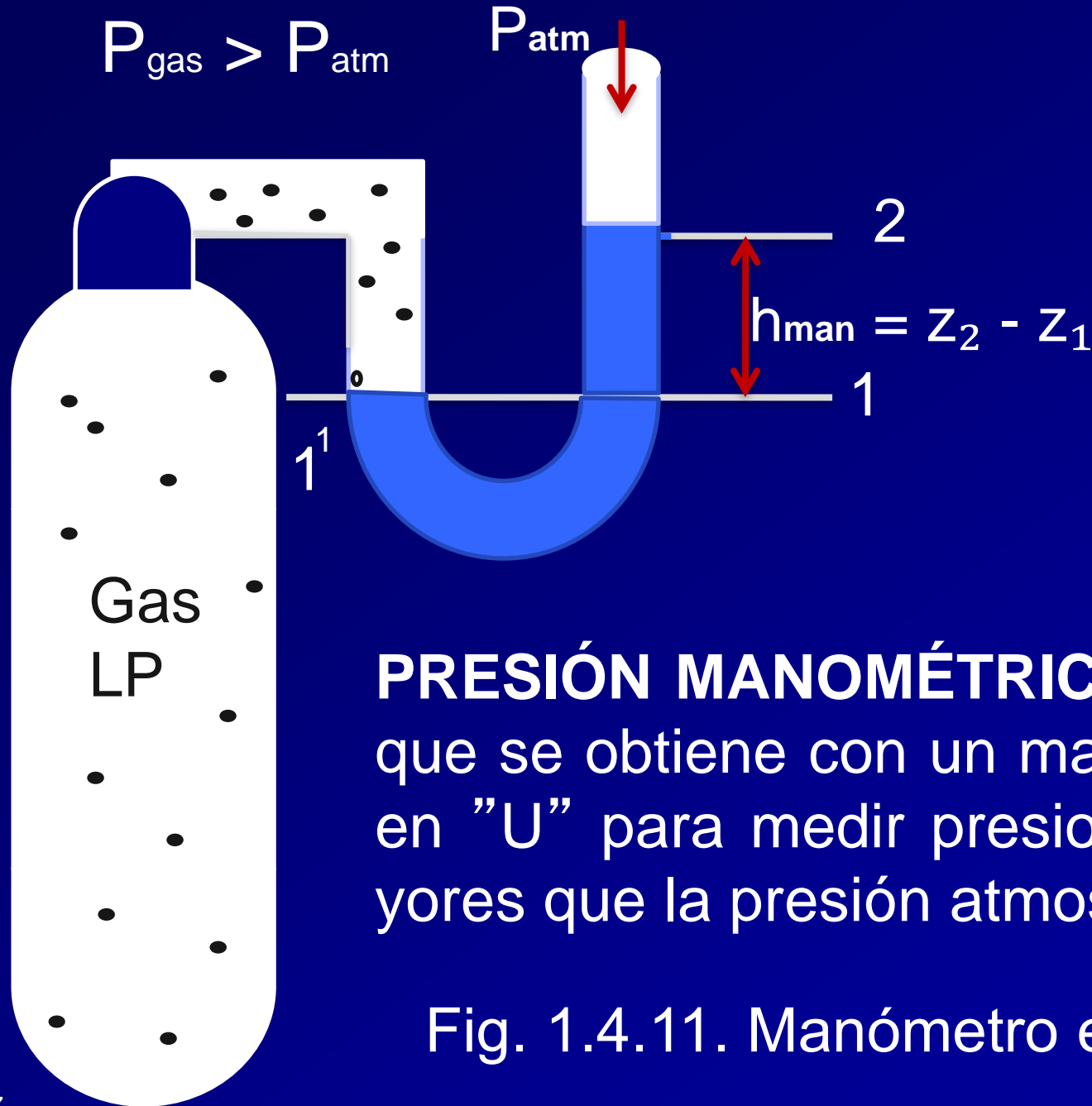
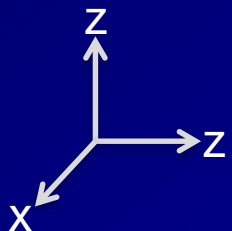


Fig. 1.4.10. Manómetro en “U”.



PRESIÓN MANOMÉTRICA: Es la que se obtiene con un manómetro en "U" para medir presiones mayores que la presión atmosférica.

Fig. 1.4.11. Manómetro en "U".



Aplicando la ecuación del Gradiente de Presión al Manómetro en «U» de la figura anterior.

$$\int_1^2 dP = \int_1^2 -\rho g dz$$

$$P_2 - P_1 = -\rho g(z_2 - z_1) = -\rho g h)_{\text{manómetro}}$$

$$P_{\text{ATM}} - P_{\text{GAS)LP}} = -\rho g h)_{\text{manómetro}} = -P_{\text{man)gas}}$$

$$P_{\text{man)gas}} = \rho g h)_{\text{manómetro}}$$

Despejando P_{gas} de la ecuación anterior

$$P_{\text{gas}} = P_{\text{ATM}} + P_{\text{man)gas}}; \quad P_{\text{gas}} > P_{\text{ATM}}$$

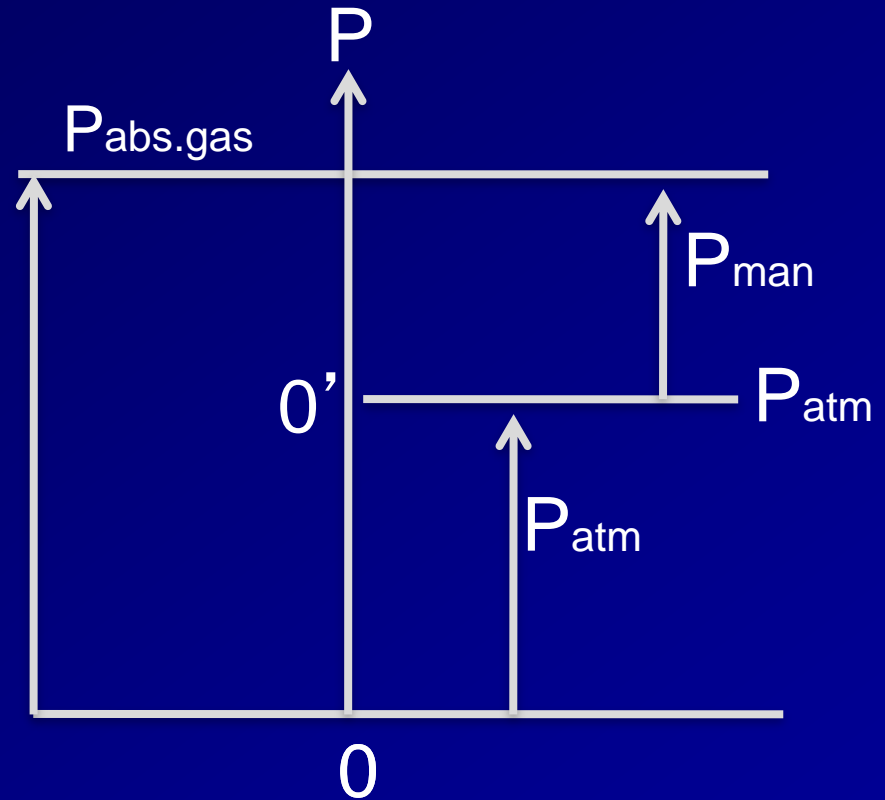
De la escala de presión absoluta, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$P_{\text{gas}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{man}} = \rho g h)_{\text{man}}$$

$$P_{\text{gas}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{abs.gas}} = P_{\text{rel.gas}} + P_{\text{atm}}$$



$$P_{\text{abs}} > P_{\text{atm}}$$
$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}}$$

Fig. 1.4.12.

EJERCICIO: 1.4.5

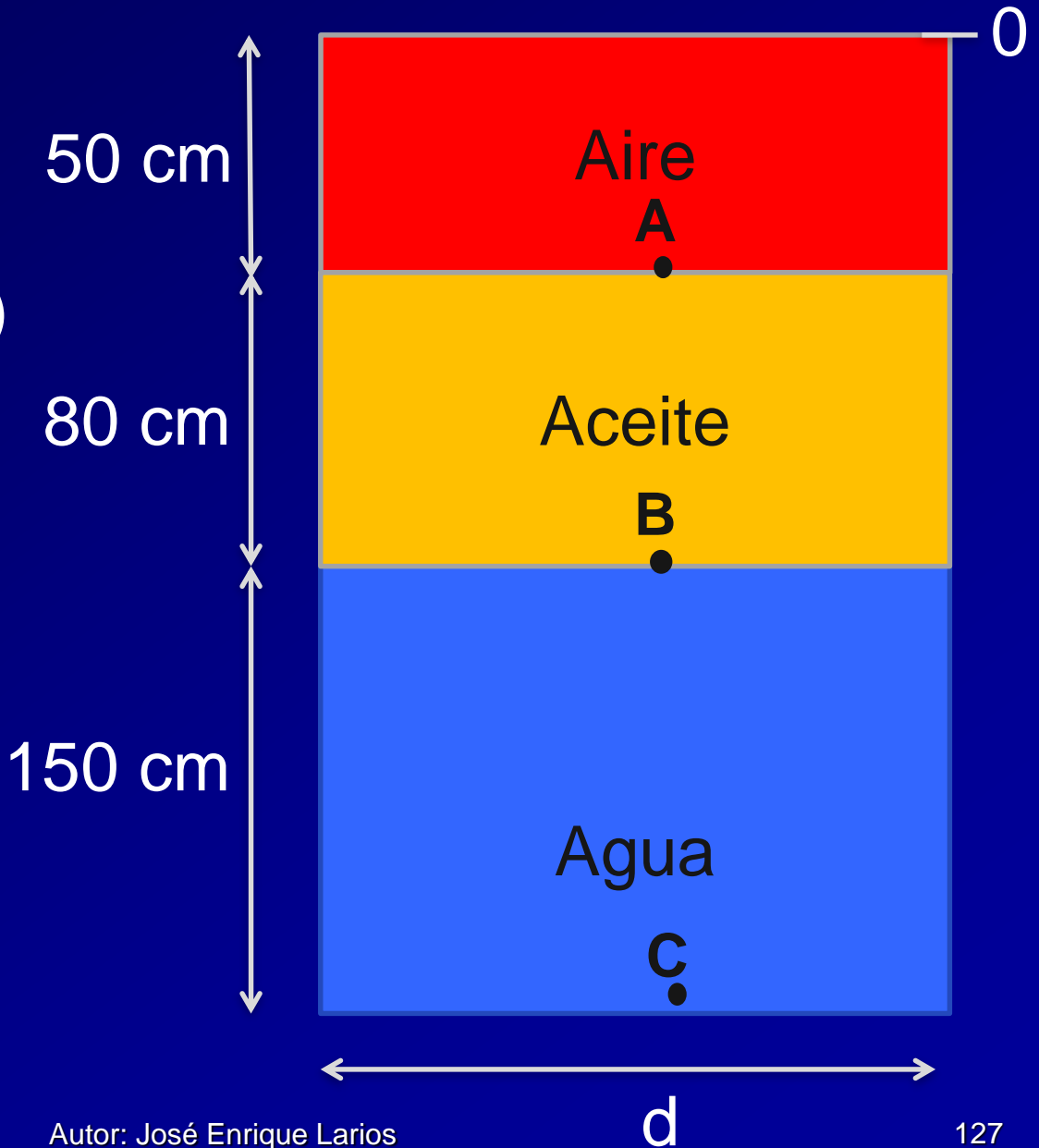
La figura muestra un tanque cilíndrico de 40 (cm) de diámetro, herméticamente cerrado que contiene los fluidos indicados. La presión manométrica del aire contenido en dicho tanque es 300 (kPa) y su densidad es de $3.57 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, la masa de aceite es 85.45 (kg). Con base en ello, determine:

- a) La presión manométrica en el punto “B” en (kPa).
- b) La presión absoluta en el punto “C” en (kPa).

DATOS:

$P_{ATM} = 78,000 \text{ (Pa)}$

$g = 9.78 \text{ (m/s}^2\text{)}$



RESOLUCIÓN :

$$P_{\text{man)B}} = \text{¿? (kPa)}$$

Al colocar un manómetro en el punto «B» y aplicando la ecuación de manometría para un fluido con presión mayor que la atmosférica:

$$P_B = P_{\text{atm}} + P_{\text{man)B}} \dots (1)$$

En la ecuación anterior P_B es la presión absoluta en el punto «B». Despejando $P_{\text{man)B}}$ de esta ecuación:

$$P_{\text{man)B}} = P_B - P_{\text{atm}} \dots (2)$$

Para obtener P_B (presión absoluta en el punto «B») se aplica la Ecuación del Gradiente de Presión: $dP = -\rho g dz$, entre los puntos «A» y «B»

$$\int_B^A dP = \int_B^A -\rho g dz$$

$$P_A - P_B = -\rho g (z_A - z_B)_{\text{Aceite}}$$

$$P_B = P_A + \rho g h)_{\text{Aceite}} \dots (3)$$

Para obtener P_A (presión absoluta en el punto «A») se aplica la Ecuación del Gradiente de

Presión: $dP = -\rho g dz$, entre los puntos «A» y «0»

$$\int_A^0 dP = \int_A^0 -\rho g dz$$

$$P_0 - P_A = -\rho g(z_0 - z_A)_{\text{Aire}}$$

$$P_A = P_0 + \rho g h)_{\text{Aire}} \dots (4)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en (3)

$$P_B = P_0 + \rho g h)_{\text{Aire}} + \rho g h)_{\text{Aceite}} \dots (5)$$

Por otra parte, la presión del aire es igual a:

$$P_{\text{aire}} = P_0 = P_{\text{atm}} + P_{\text{man)aire}} \dots (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en (5)

$$P_B = P_{\text{atm}} + P_{\text{man)aire}} + \rho g h)_{\text{Aire}} + \rho g h)_{\text{Aceite}}$$

Con base al análisis del problema (1.5.1), la presión de la columna de aire es despreciable:

$$\rho g h)_{\text{Aire}} = 0$$

Quedando finalmente:

$$P_B = P_{atm} + P_{man)aire} + \rho gh)_{Aceite} \dots (7)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en (2)

$$P_{man)B} = \cancel{P_{atm}} - \cancel{P_{atm}} + P_{man)aire} + \rho gh)_{Aceite}$$

$$P_{man)B} = P_{man)aire} + \rho gh)_{Aceite} \dots (8)$$

Para obtener la densidad del aceite y efectuar cálculos se parte de la definición de densidad y los datos del enunciado del problema:

$$\rho_{\text{aceite}} = \frac{85.45 \text{ (kg)}}{(\pi)(0.2)^2(0.8)(\text{m}^3)} = 849.98 = 850 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Sustituyendo datos en la Ec. (8):

$$P_{\text{man)B}} = 300,000 + (850)(9.78)(0.8)$$

$$\text{a) } P_{\text{man)B}} = 306.65 \text{ (kPa)}$$

$$b) P_{abs)c} = \rho g h)_{H_2O} + \rho g h)_{aceite} + \cancel{\rho g h)_{aire}} + P_{aire}$$


$$P_{aire} = P_{ATM} + P_{man)aire}$$

$$P_{abs)c} = (10^3)(9.78)(1.5) + (850)(9.78)(0.8) + 78,000 + 300,000$$

$$b) P_{abs)c} = 399,320.4 \text{ (Pa)}$$

Otro camino

$$P_{\text{abs)c}} = P_{\text{abs)B}} + \rho g h_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$P_{\text{abs)c}} = P_{\text{ATM}} + P_{\text{man)B}} + \rho g h_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$P_{\text{abs)c}} = 78,000 + 306,650.4 + (10^3)(9.78)(1.5)$$

$$P_{\text{abs)c}} = 399,320.4 \text{ (Pa)}$$

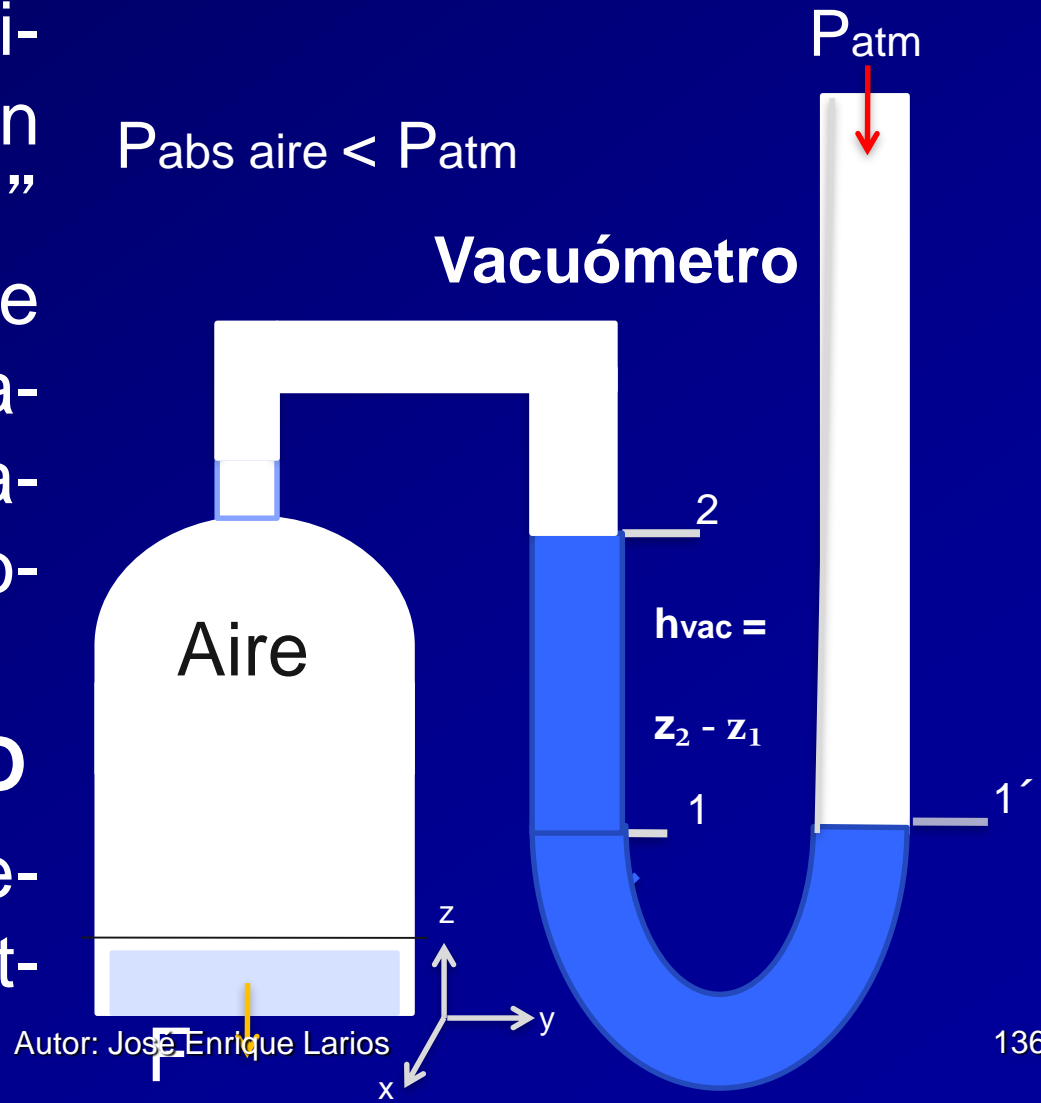
PRESIÓN VACUOMÉTRICA

Cuando la presión del fluido es menor que la atmosférica y se emplea un manómetro en “U” para medirla, se dice que la presión es vacuométrica, y el manómetro funciona como un vacuómetro.

PRESIÓN DE VACÍO

Es una presión menor a la presión atmosférica.

Fig. 1.4.13.



Aplicando la Ecuación del Gradiente de Presión al Vacuómetro en «U»

$$\int_1^2 dP = \int_1^2 -\rho g dz$$

Integrando:

$$P_2 - P_1 = -\rho g(z_2 - z_1) =$$

$$P_{\text{aire}} - P_{\text{ATM}} = -\rho g h)_{\text{vacuómetro}} = -P_{\text{vac)aire}}$$

$$P_{\text{vac)aire}} = \rho g h)_{\text{vacuómetro}}$$

Despejando P_{aire} de la ecuación anterior

$$P_{\text{aire}} = P_{\text{ATM}} - P_{\text{vac)aire}}$$

$$P_{\text{aire}} < P_{\text{ATM}}$$

Si se efectúa un análisis de presiones referida a una escala de presión absoluta, y se grafican esquemáticamente las presiones: absoluta, atmosférica y vacuométrica, se puede generalizar la ecuación de manometría para la medición de presiones de vacío como se indica en la siguiente diapositiva.

De la escala de presión obtenemos la siguiente

ecuación: $P_{\text{abs.aire}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vac}}$

$$P_{\text{vac}} = \rho g h)_{\text{vac}}$$

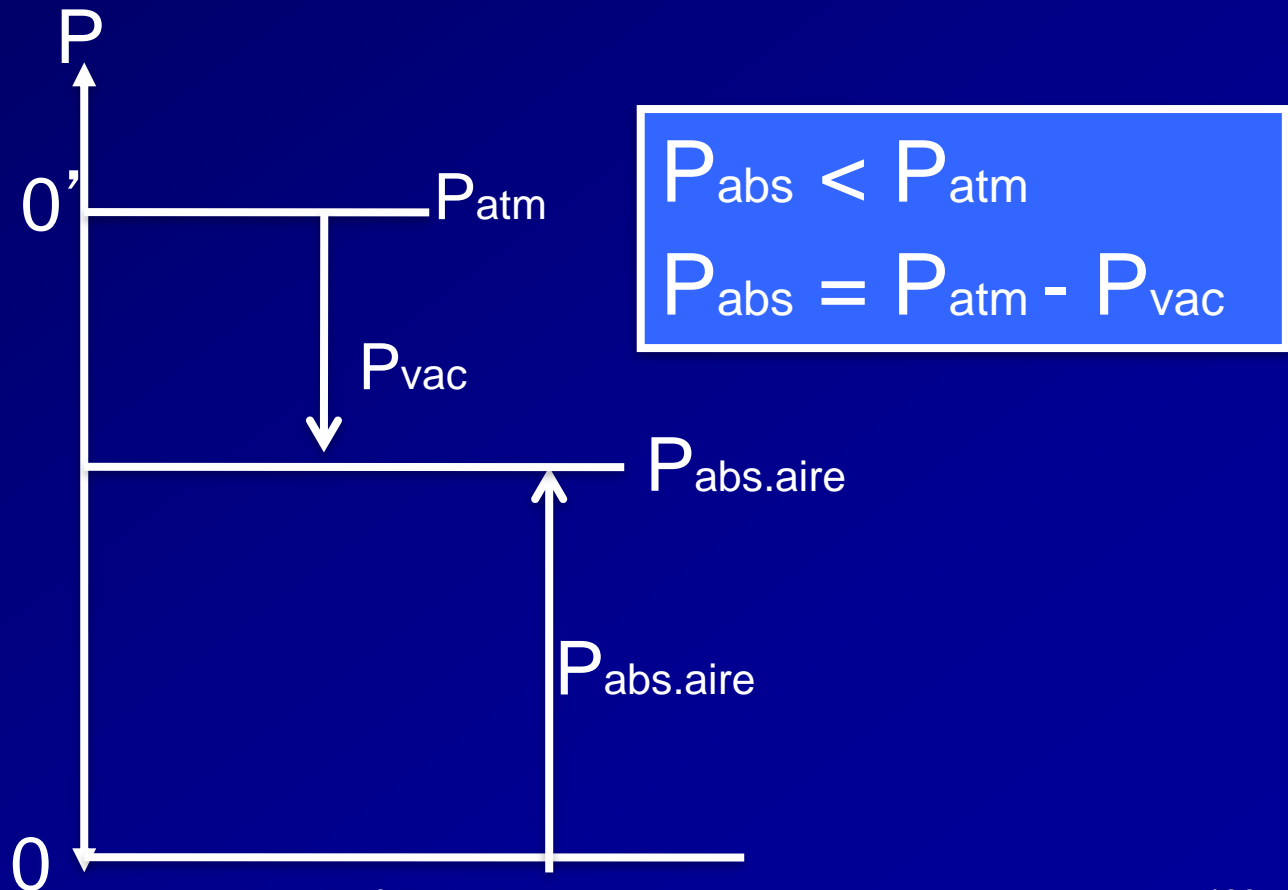


Fig. 1.4.14

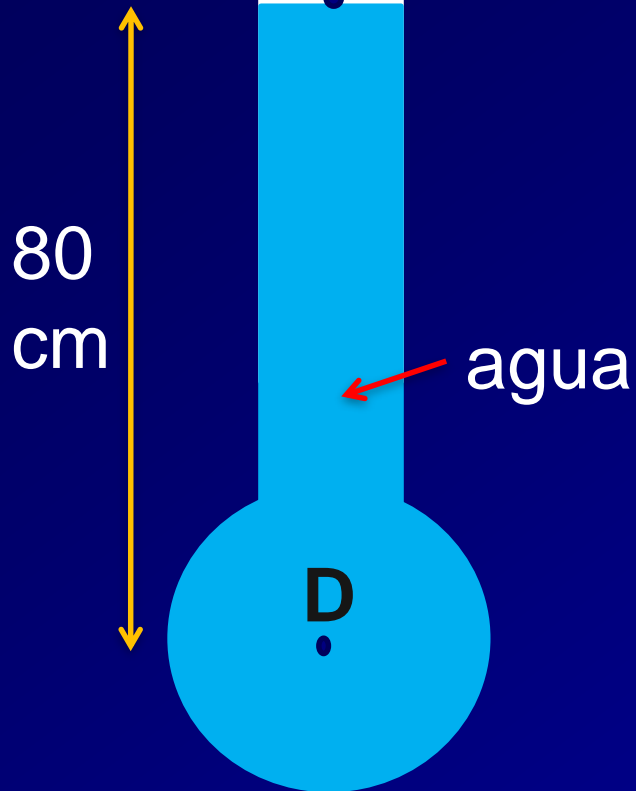
EJERCICIO: 1.4.6

En la figura se muestra un recipiente que contiene varios fluidos a $20\text{ [}^{\circ}\text{C]}$. Si la presión vacuométrica en el punto D es $32\ 078.4\text{ [Pa]}$ y la aceleración gravitatoria del lugar es $g = 9.78\text{ [m/s}^2\text{]}$, determine:

- a) La presión vacuométrica en el punto C.
- b) La densidad del líquido desconocido.

aire

P_{atm}



Líquido desconocido

RESOLUCIÓN:

$$a) P_{\text{vac)C}} = ?$$

$$\text{DATOS: } P_{\text{vac)D}} = 32,078.4 \text{ (Pa)}, g = 9.78 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

En la Fig. se observa que la presión atmosférica desplaza al líquido desconocido hacia la rama izquierda, por tanto se concluye que:

$$P_{\text{ATM}} > P_{\text{aire}}$$

Lo que implica:

$$P_{ABS)C} \text{ y } P_{ABS)D} < P_{ATM}$$

Aplicando la Ec. del Gradiente de Presión a los puntos C y D

$$\int_D^C dP = -\int_D^C \rho g dz = -\rho g \int_D^C dz$$

$$\underbrace{P_C - P_D}_{\text{presiones abs.}} - \rho g (Z_C - Z_D) = - \rho_{H_2O} g h_{H_2O} \dots (1)$$

De las ecuaciones de manometría:

$$P_{ABS)C} = P_{ATM} - P_{vac)C}$$

$$P_{ABS)D} = P_{ATM} - P_{vac)D}$$

Sustituyendo las dos ecuaciones anteriores en la Ec. (1) y eliminando términos:

$$(\cancel{P_{ATM}} - P_{vac)C}) - (\cancel{P_{ATM}} - P_{vac)D}) = - \rho g h_{H_2O}$$

$$- P_{\text{vac)C}} + P_{\text{vac)D}} = - \rho g h)_{\text{H}_2\text{O}}$$

Despejando $P_{\text{vac)C}}$

$$P_{\text{vac)C}} = \rho g h)_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{vac)D}}$$

Sustituyendo datos:

$$P_{\text{vac)C}} = (10^3)(9.78)(0.8) + 32,078.4$$

$$P_{\text{vac)C}} = 39,902.4 \text{ (Pa)}$$

$$b) \rho)_{LD} = ?$$

Aplicando la Ec. del Gradiente de Presión a los puntos A y B

$$\int_A^B dP = -\int_A^B \rho g dz = -\rho g \int_A^B dz$$

$$\underbrace{P_B - P_A}_{\text{presiones abs.}} = - \rho g (Z_B - Z_A) = - \rho_{LD} g h_{LD} \dots(2)$$

presiones abs.

De las ecuaciones de manometría

$$P_{ABS)B} = P_{ATM} - P_{vac)B} = P_{ATM} - P_{vac)C}$$

$$P_{ABS)A} = P_{ATM}$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la Ec. (2)

$$\cancel{P_{ATM}} - P_{vac)C} - \cancel{P_{ATM}} = - \rho gh)_{LD}$$

Despejando $\rho)_{LD}$

$$\rho)_{LD} = \frac{P_{vac)C}}{gh)_{LD}}$$

Sustituyendo datos:

$$\rho)_{LD} = \frac{39,902.4}{(9.78)(0.3)}$$

$$\rho)_{LD} = 13,600 \text{ (kg/m}^3\text{)} \rightarrow \rho)_{Hg}$$

ECUACIONES DE MANOMETRÍA

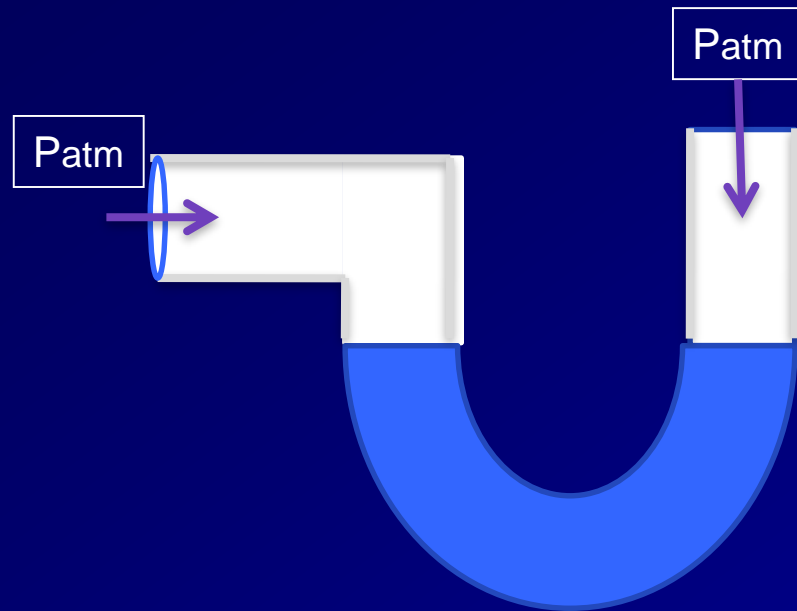


Fig. 1.4.15. Mano-
Vacuómetro en “U”.

Manómetro:

$$P_{abs} > P_{atm}$$

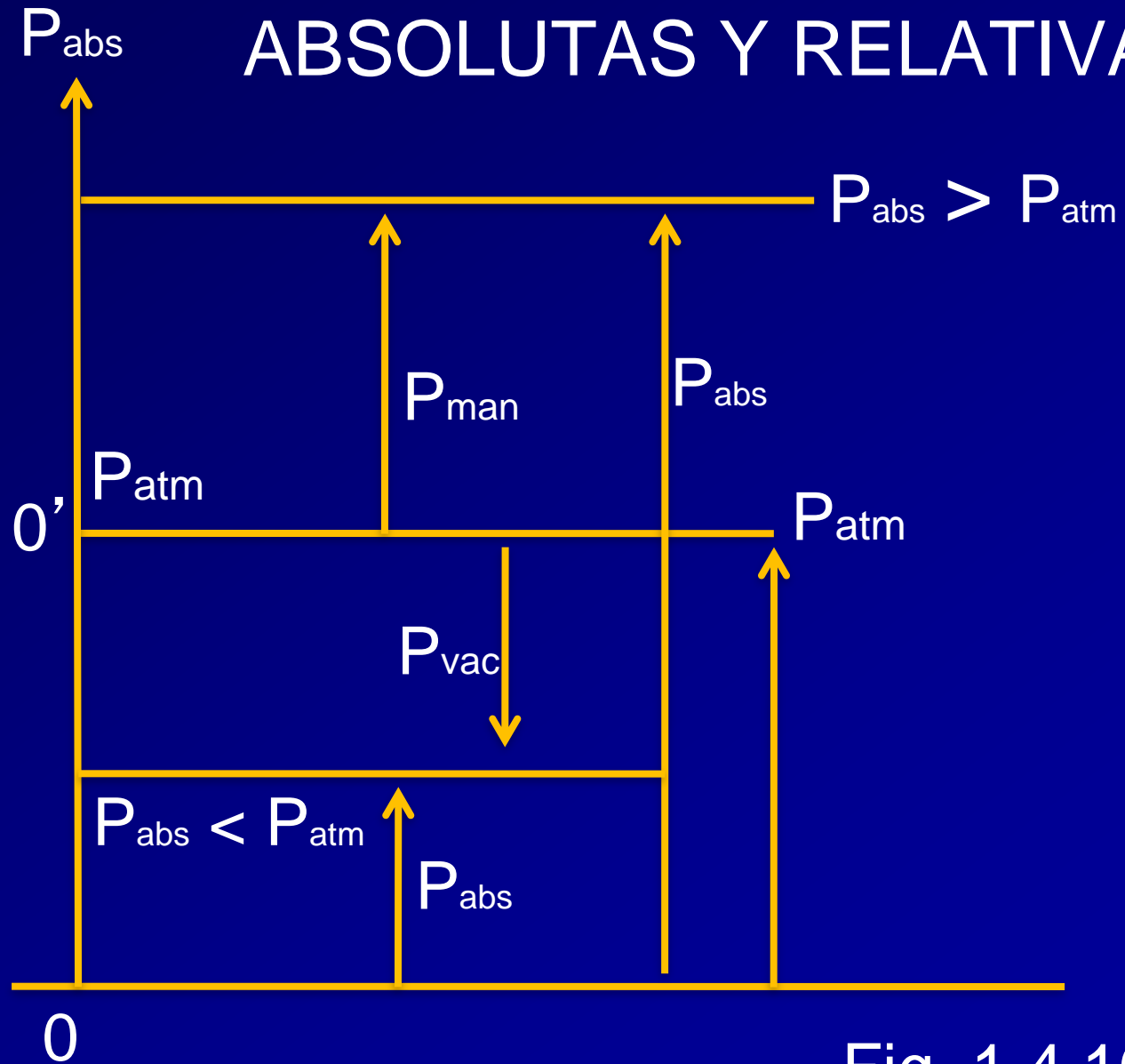
$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

Vacuómetro:

$$P_{abs} < P_{atm}$$

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vac.}$$

ESCALA DE PRESIONES ABSOLUTAS Y RELATIVAS



MANÓMETRO DE BOURDON

Funciona igual que un mano-vacuómetro en «U».

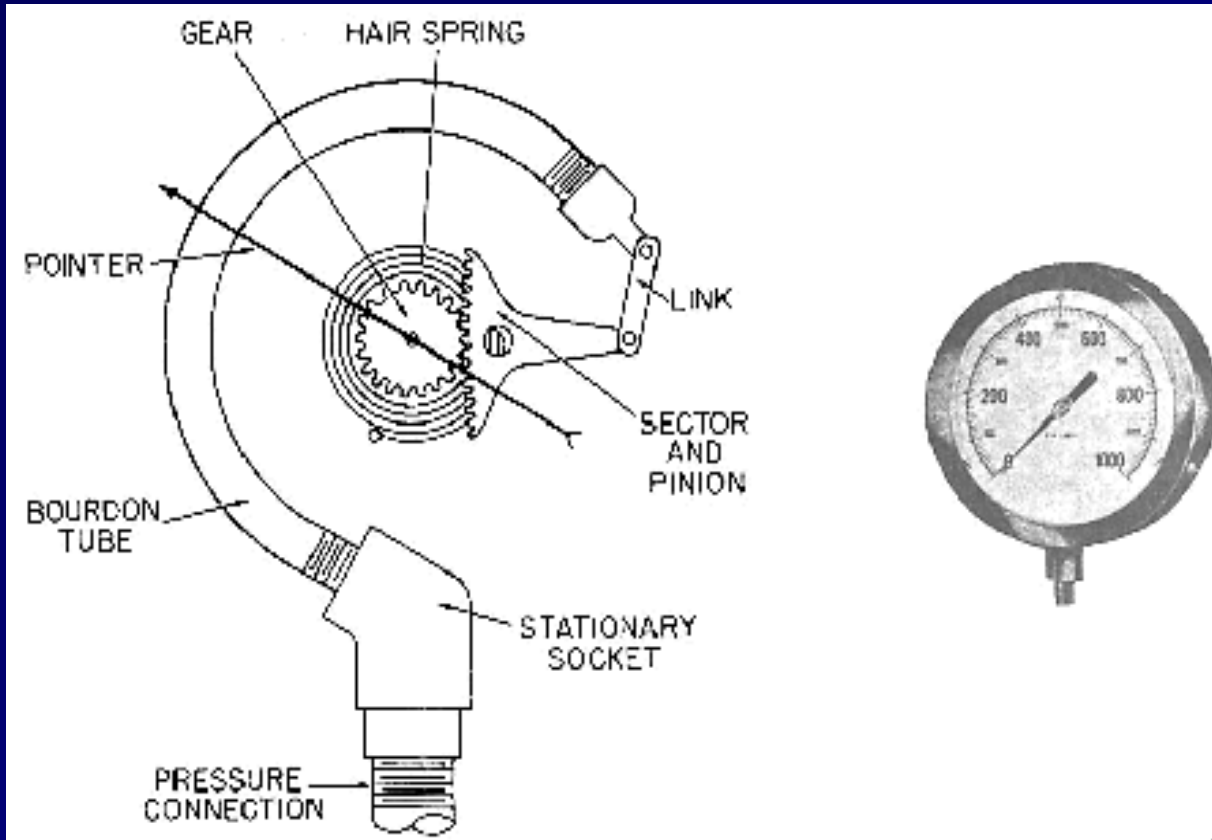
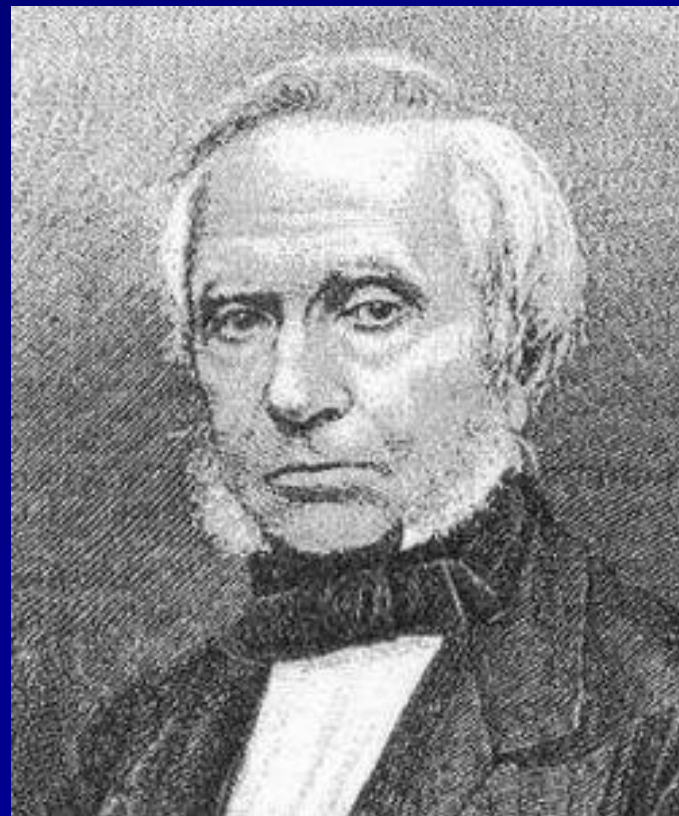


Fig. 1.4.17.

<http://www.sapiensman.com/neumatica/n>

BOURDON, EUGÈNE

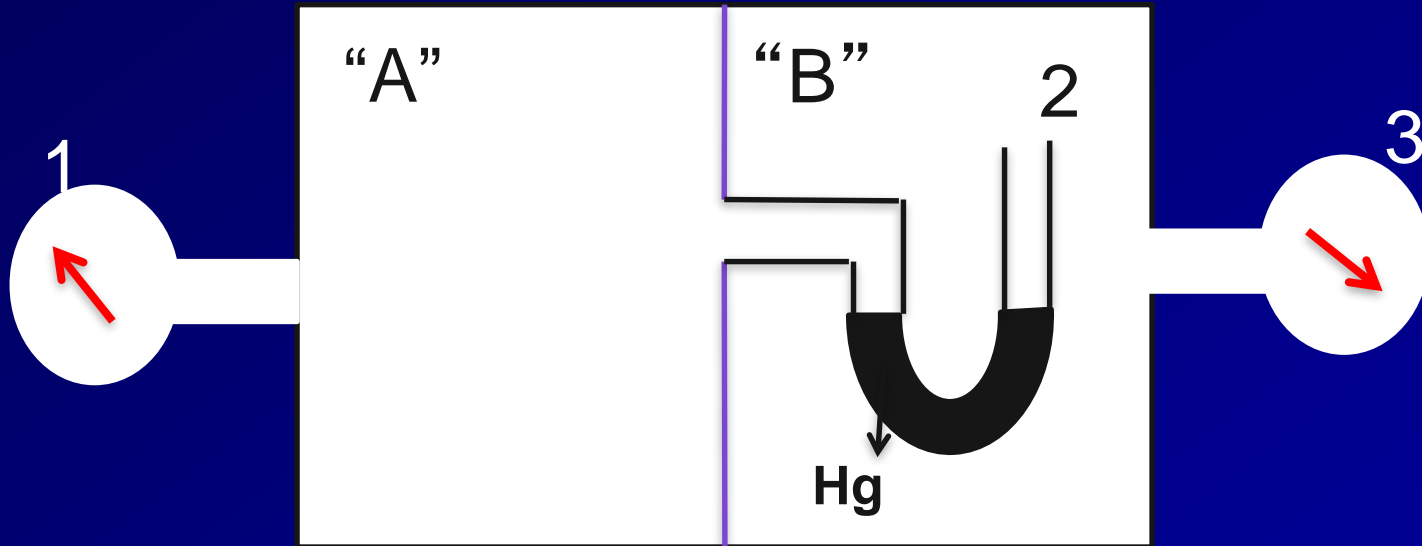
(1808 - 1884). Ingeniero e industrial francés. En 1849 inventó un manómetro metálico que fue utilizado por la marina francesa en las calderas de vapor. También fabricó otros muchos dispositivos, como una trompa de vacío, un reloj neumático y un taquímetro.



EJERCICIO: 1.4.7

Se tienen dos compartimientos “ A ” y “ B ” herméticamente sellados a los cuales se les han colocado los manómetros como se muestra en la figura. El manómetro de Bourdon (1) indica una presión de 1.5 (bar) y el manómetro de Bourdon (3) indica una presión de 2.5 (bar).

Diga si el manómetro en “ U ” (2) funciona como manómetro o como vacuómetro y cuál es la altura de la columna de mercurio en [cm]. Considere que la altura barométrica local es de 60 (cm de Hg). Considere que $\rho = 13,600$ (kg/m³) y que la aceleración de la gravedad local es 9.79 (m/s²).



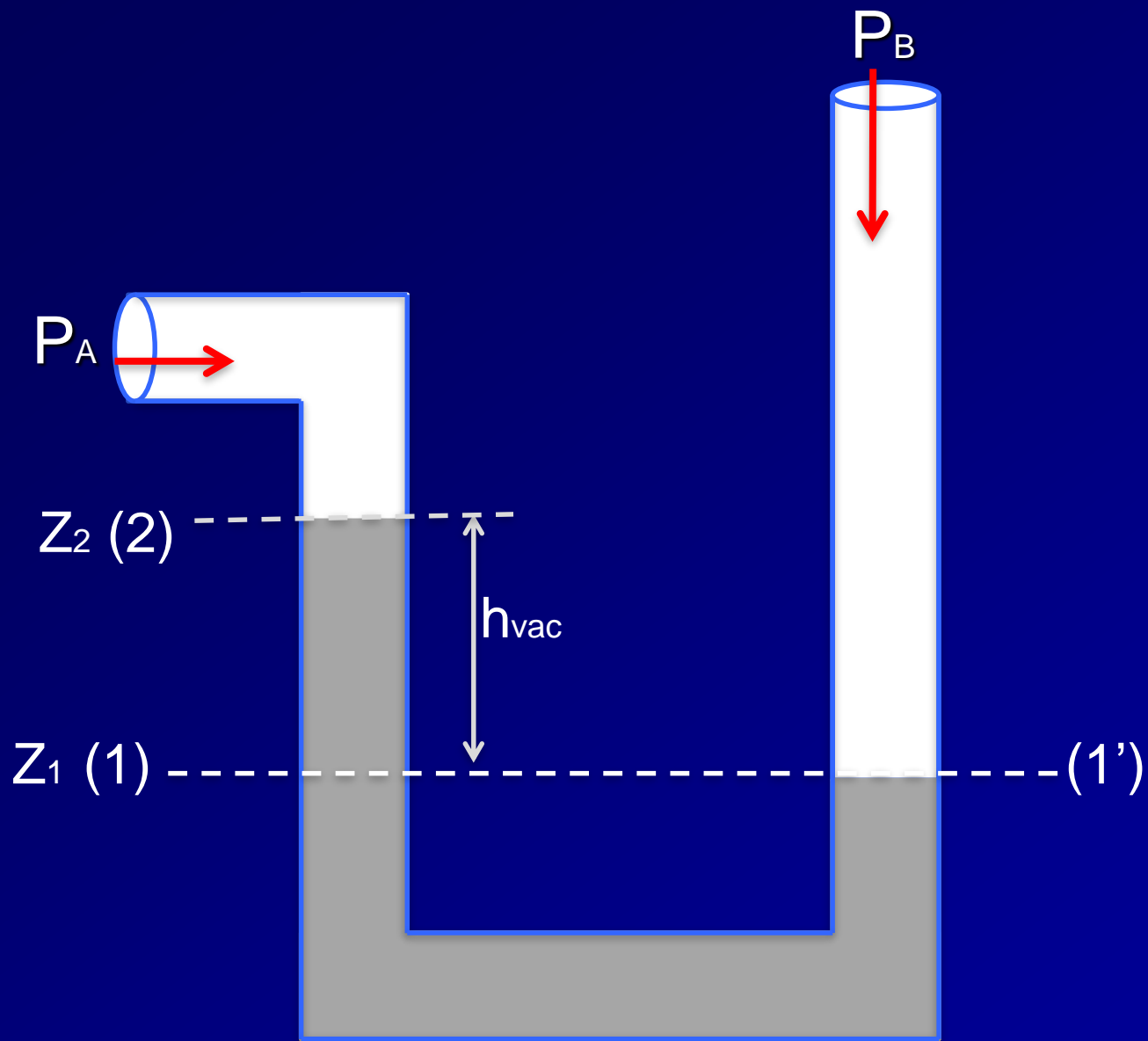
RESOLUCIÓN:

$$1 \text{ (bar)} = 10^5 \text{ (Pa)}$$

Ya que la $P_{\text{man)B}} > P_{\text{man)A}} \rightarrow P_{\text{abs)B}} > P_{\text{abs)A}}$

Por tanto, el manómetro (2) funciona como vacuómetro.

$$P_A > P_{\text{ATM}} \text{ y } P_B > P_{\text{ATM}}$$



$$\int_1^2 dP = \int_1^2 -\rho g dz$$

$$P_2 - P_1 = -\rho_{\text{Hg}} g (z_2 - z_1)$$

$$P_A - P_B = -\rho_{\text{Hg}} g (h_{\text{Hg}})_{\text{vac}}$$

$$(h_{\text{Hg}})_{\text{vac}} = \frac{P_A - P_B}{-\rho_{\text{Hg}} g}$$

$$(h_{\text{Hg}})_{\text{vac}} = \frac{(P_{\text{ATM}} + P_{\text{man}})_B - (P_{\text{ATM}} + P_{\text{man}})_A}{\rho_{\text{Hg}} g}$$

$$(h_{\text{Hg}})_{\text{vac}} = \frac{(2.5 - 1.5) \times 10^5}{(13,600)(9.79)}$$

$$(h_{\text{Hg}})_{\text{vac}} = 0.75(\text{m})$$

1.5 EQUILIBRIOS: TÉRMICO, MECÁNICO Y QUÍMICO. LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA, DEFINICIÓN DE TEMPERATURA, PROPIEDADES TERMOMÉTRICAS, ESCALAS DE TEMPERATURA Y TEMPERATURA ABSOLUTA.

El conjunto de propiedades termodinámicas de un sistema hacen referencia al nivel energético del sistema termodinámico, es decir, a mayor velocidad mayor energía cinética, a mayor presión y temperatura mayor actividad molecular, etc. Formas de energía que se definen mediante los modelos matemáticos de las diferentes for-

mas de manifestación de la energía que hay en el mundo físico, por tanto, con las propiedades termodinámicas se establece lo que se denomina estado termodinámico.

Concepto de Estado Termodinámico

Es el nivel energético de la sustancia de trabajo de un sistema termodinámico que se expresa con sus propiedades termodinámicas independientes y en equilibrio. Con los modelos matemáticos correspondientes y que involucran a algunas de estas propiedades, se pueden cal-

cular las diferentes formas de energía que tiene el sistema; como son la energía cinética, la energía potencial y la energía interna, que posteriormente se estudiarán y se les denominará energías como propiedad del sistema.

En el subtema 1.6 “El postulado de estado. El diagrama (v, P) .” se define el Postulado de Estado que delimita el número de propiedades termodinámicas independientes que definen el estado termodinámico de un sistema.

Definir el estado termodinámico de un siste-

ma implica que sus propiedades termodinámicas no varíen, lo cual sólo es posible cuando no hay procesos de transferencia de energía entre el sistema y su medio ambiente. Para que las propiedades termodinámicas permanezcan invariantes, el sistema no debe ni ganar ni perder energía, esto es, debe permanecer en equilibrio denominado termodinámico.

CONCEPTO DE EQUILIBRIO TERMODINÁMICO

Condiciones de equilibrio termodinámico de un sistema:

1. La suma de fuerzas en el interior del sistema es igual a cero, es decir, se encuentra en equilibrio mecánico (el gradiente de fuerzas es igual a cero).
2. La temperatura en cada punto del sistema es constante, es decir, está en equilibrio térmico (el gradiente de temperatura es igual a cero).
3. Las moléculas que conforman al sistema no reaccionan químicamente entre sí, es decir, está en equilibrio químico (el gradiente de reactivos químicos es igual a cero).

TEORÍA DEL CALÓRICO

A fines del siglo XIX y principios del XX la 1ª y 2ª leyes de la Termodinámica se establecieron sobre la base de conceptos equívocos de la “Teoría del Calórico”, del químico Antoine de Lavoisier, hasta que se presentaron fenómenos termodinámicos en los que esta “Teoría” no cumplía con el comportamiento de la materia en los procesos físicos que involucraban la temperatura y el calor. Esta “Teoría” consideraba que el calor era un “fluido” que se movía de un cuerpo que está a una temperatura más alta a otro que está a una temperatura más baja, era

de algún modo análogo, decía esta “Teoría”, al flujo de un fluido, que como el agua, fluye desde una altura superior a otra inferior. Con esta conceptualización no resulta sorprendente que las primeras teorías sobre la propagación del calor lo trataran como si fuese algo parecido a un “fluido”, denominado «fluido calórico».

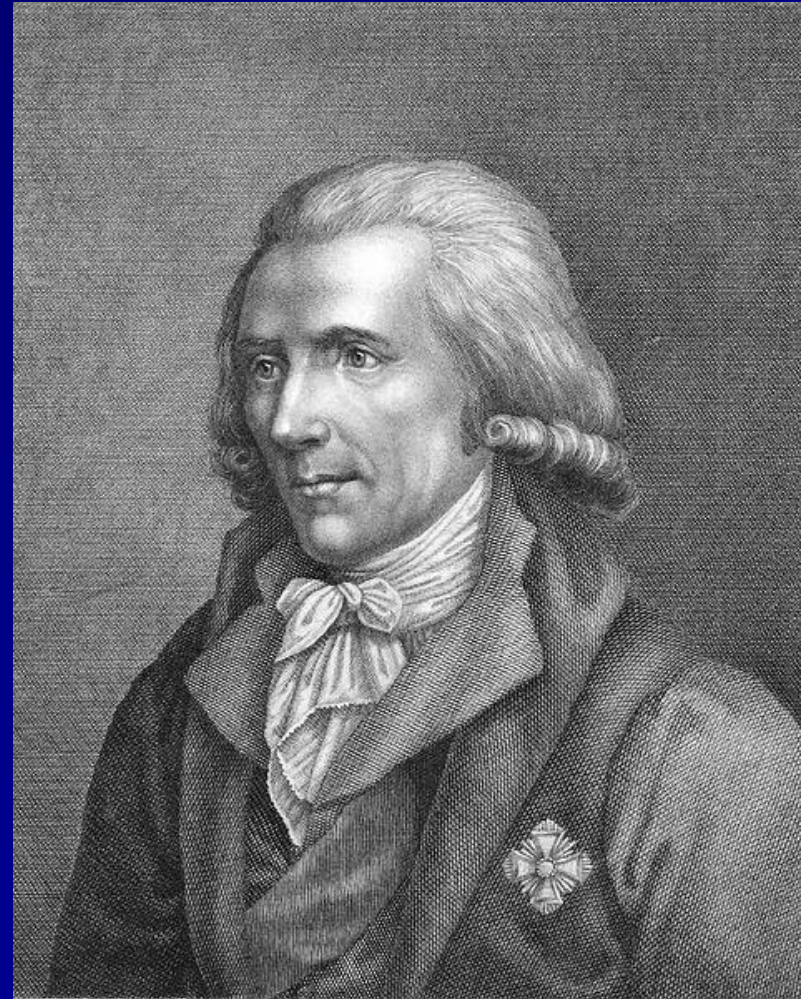
Decía esta “Teoría” que si un cuerpo pierde «fluido calórico», su temperatura debería disminuir, y ésta debería aumentar si el cuerpo ganara «fluido calórico». A pesar de que con esta idea de considerar al calor como un fluido se explicaban muchas de las características relativas a la trans-

ferencia del calor, la “Teoría” del «fluido calórico» resultaba inconsistente con los procesos experimentales.

Fue Benjamín Thompson, también conocido como el conde Rumford de Baviera, quien se opuso seriamente al concepto del «fluido calórico», al observar el proceso de barrenado en la fabricación de cañones que le fue encomendada por el gobernador de Baviera, quien temeroso de la propagación de la Revolución Francesa, le pidió al Conde Rumford la supervisión de los cañones construidos para la defensa de las fronteras. En el proceso de taladrar el alma o centro de los cañones,

BENJAMIN THOMPSON, CONDE DE RUMFORD

(1753 - 1814) Médico, físico e inventor norteamericano (Woburn-Massachusetts). Sus experimentos y su cuestionamiento de la física establecida en el siglo XVIII, contribuyeron a los grandes avances que se produjeron en el siglo XIX en el campo de la termodinámica. El cráter Rumford, en la Luna, recibió este nombre en honor a él. Formuló también, la hipótesis mecánica sobre la naturaleza del calor, echando por tierra la tesis del calórico de Lavoisier.



Rumford observó que se producía un aumento de temperatura en la estructura del cañón, en las virutas metálicas y en el propio taladro, de modo que parecía generarse “fluido calórico” continuamente en lugar de agotarse, como predecía la «Teoría del Calórico».

Rumford dirigió una serie de experimentos para medir el cambio de temperatura que ocurría al utilizar maquinaria rudimentaria desafilada en el proceso de taladrado, empleando agua para refrigerar la broca del taladro y la estructura del cañón, midiendo el aumento de temperatura que se pre-

sentaba en el agua y observó con “sorpresa y asombro que también expresaban los semblantes de los allí presentes viendo la gran cantidad de agua que se calentaba, y que verdaderamente llegaba a hervir sin ningún fuego”. Rumford concluyó que el calor no podía ser una sustancia material a la que denominaban «fluido calórico», ya que parecía no tener límite, no agotarse.

A Rumford le pareció que la elevación de la temperatura era el resultado del rozamiento o del trabajo realizado por las fuerzas de rozamiento, echando por tierra la “Teoría del Calórico” de Lavoisier, quien, al no poder refutar a Rumford,

según sus propias palabras, aceptó la vuelta a aquellas «viejas doctrinas que sostienen que el calor no es otra cosa que un movimiento vibratorio de las partículas del cuerpo».

Por ello, se requirió establecer una estructura conceptual a la que se le denominó Ley Cero de la Termodinámica, que permite explicitar los conceptos de: calor, energía interna, equilibrio térmico, temperatura empírica y termómetro, entre otros, para tener conceptos congruentes, con los fenómenos termodinámicos. Esta Ley lleva el nombre de Ley Cero, debido a que los conceptos

que se generan de ella son empleados en la Primera y Segunda Leyes de la Termodinámica, y son básicos para estructurar el estudio de la Termodinámica.

ENUNCIADO DE LA LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA.

“Si se tiene un sistema “A” que se encuentre en equilibrio térmico con un sistema “C”, y por otra parte, si se tiene un sistema “B” en equilibrio térmico con el mismo sistema “C”, entonces, se concluye que los sistemas “A” y “B” están en equilibrio térmico.”

El enunciado de la Ley Cero de la Termodinámica involucra implícitamente los conceptos de: calor, energía interna, equilibrio térmico, temperatura empírica y termómetro, entre otros.

Para hacerlos explícitos a continuación se analizará el estado termodinámico en que no haya equilibrio térmico entre los cuerpos “A”, “B” y “C”, es decir, que tengan diferente temperatura. en el entendido de que se desarrollará el concepto de este parámetro que está relacionado con la energía interna de estos cuerpos.

ENERGÍA INTERNA: Se conceptualiza que la energía interna es la sumatoria de todas las formas de energía que a nivel molecular tiene una sustancia de trabajo de un sistema termodinámico.

Como ya se mencionó, en la Ley Cero de la Termodinámica, los cuerpos “A”, “B” y “C”, tienen un nivel energético molecular equivalente, por lo cual, se especifica que están en equilibrio térmico. Con la finalidad de explicitar las consecuencias de esta Ley, a continuación se desarrolla un análisis de los cuerpos “A”, “B” y “C”, en condiciones de desequilibrio energético.

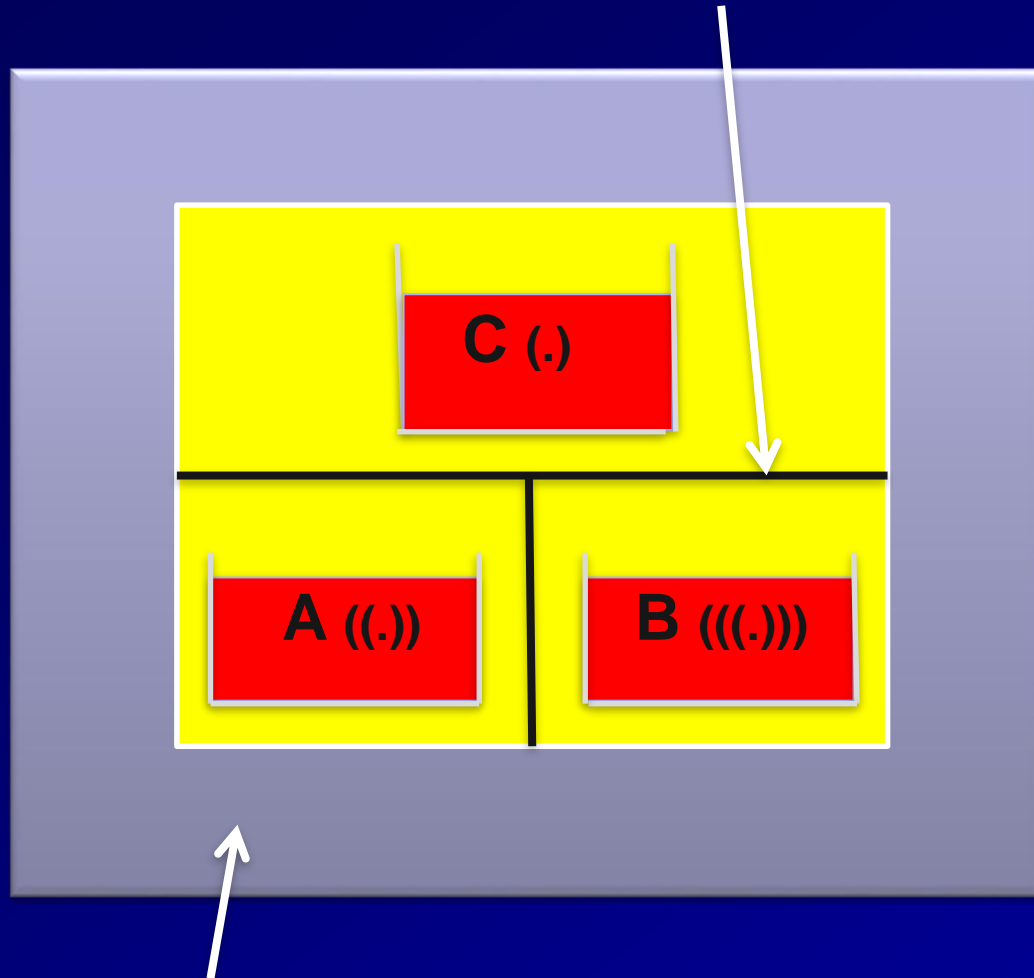
En las siguientes diapositivas se analizará el enunciado de la Ley Cero de la Termodinámica, representando a una molécula de cada uno de los cuerpos “A”, “B” y “C” con un “punto”.

La energía interna o nivel energético molecular se representará con un punto, una de las moléculas del cuerpo cuya energía quedará representada por el número de “paréntesis”. A continuación se definen algunos conceptos de los elementos que se indican en la diapositiva, para facilitar su comprensión.

PARED DIATÉRMANA O DIATÉRMICA: Es aquella que permite el flujo o transferencia de calor, pero no la transferencia de trabajo. Es una pared ideal. En la siguiente diapositiva, los cuerpos “A”, “B” y “C” se ponen en contacto a través de una pared de esta naturaleza para que se dé la transferencia energética a nivel molecular, sin que se permita una interacción mecánica, esto es, para que no se transfiera trabajo

PARED ADIABATA O ADIABÁTICA: Es aquella que permite el flujo o transferencia de trabajo, pero no la transferencia de calor. Es una pared ideal. Sin embargo, en este caso las paredes son rígidas y tampoco hay transferencia de trabajo.

Pared diatérmana
o diatérmica (${}_1W_2 = 0$)



Pared adiabata o
adiabática (${}_1Q_2 = 0$)

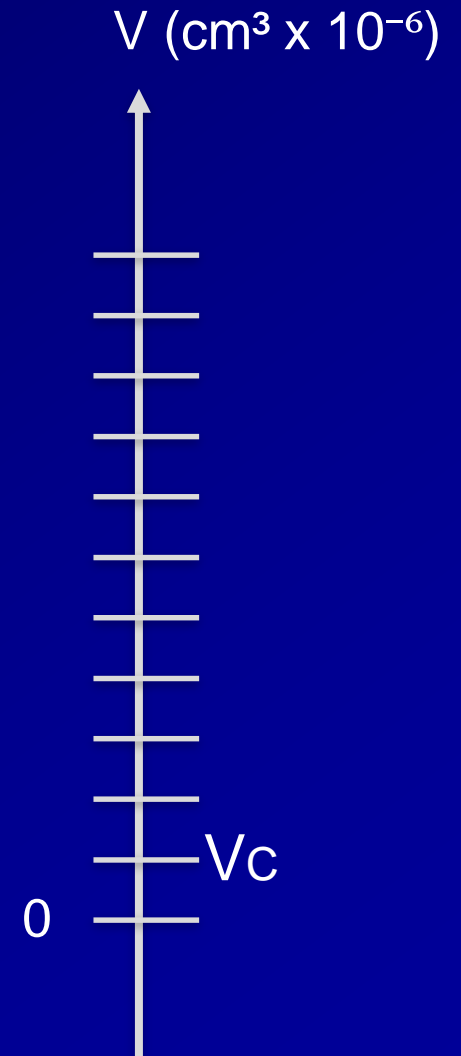


Fig. 1.5.1.

Autor: José Enrique Larios

Al entrar en contacto el cuerpo «A» con el cuerpo «C» le transfiere energía «microscópica», esto es, ondas electromagnéticas si consideramos la teoría electromagnética y/o “fotones” si consideramos la Teoría Corpuscular, a este proceso se le denomina mecanismo de transferencia de energía en forma de calor.

CALOR: Es energía microscópica que se transfiere de un sistema a otro debido a un potencial energético que a nivel molecular hay entre ellos, y que a nivel macroscópico se define como la transferencia de energía en forma de calor del sistema que está a mayor temperatura al que está a menor temperatura.

En la siguiente dispositiva, esquemáticamente representamos el equilibrio térmico con la distribución equitativa de la energía molecular en donde, a nivel «microscópico» cada molécula de los cuerpos «A» y «C», después del proceso de transferencia de calor tienen tres niveles de energía cada uno. Macroscópicamente observamos que el volumen de «C» aumenta (V_{C-A}).

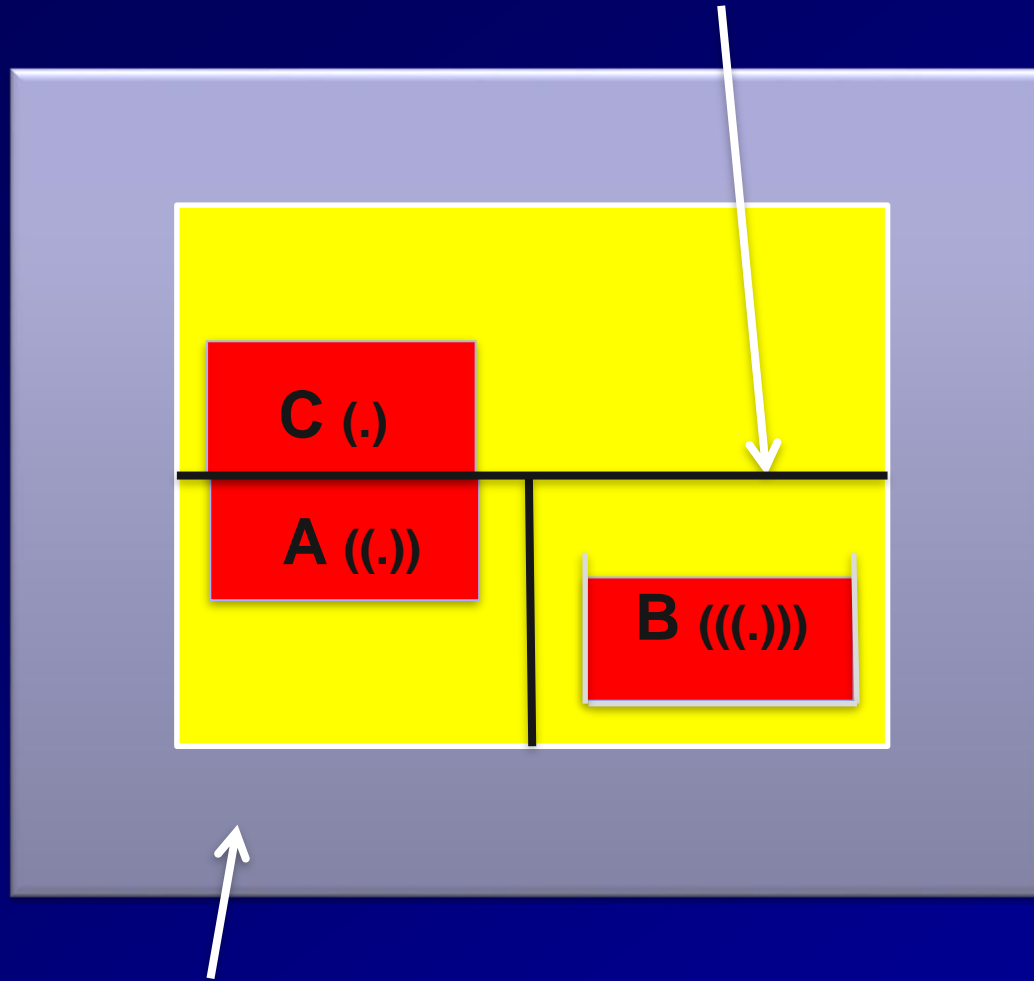
El cuerpo “C”, con el menor nivel energético “dos unidades de energía”, al ponerse en contacto con los cuerpos “A” y “B” recibe energía a nivel “microscópico”

Al hombre no le es posible observar esta transferencia de energía microscópica, sin embargo, sí puede observar los cambios “macroscópicos” como el cambio de volumen, que denominaremos propiedad termométrica y que registramos en la escala de volumen del cobre, si consideramos que los cuerpos “A”, “B” y “C” son lingotes de cobre a los que denominaremos sustancia termométrica.

Al entrar en contacto el cuerpo «A» con el cuerpo «C» se da la transferencia de energía que denominamos en forma de calor, que no es otra cosa más que la energía «microscópica» (energía molecular o interna) que cede el cuerpo «A» al cuerpo «C».

En la siguiente dispositiva, esquemáticamente representamos el equilibrio térmico con la distribución equitativa de la energía molecular en donde, a nivel «microscópico» cada molécula de los cuerpos «A» y «C», después del proceso de transferencia de calor tienen tres niveles de energía cada uno. Macroscópicamente observamos que el volumen de «C» aumenta (V_{C-A}).

Pared diatérmana
o diatérmica (${}_1W_2 = 0$)



Pared adiabata o
adiabática (${}_1Q_2 = 0$)

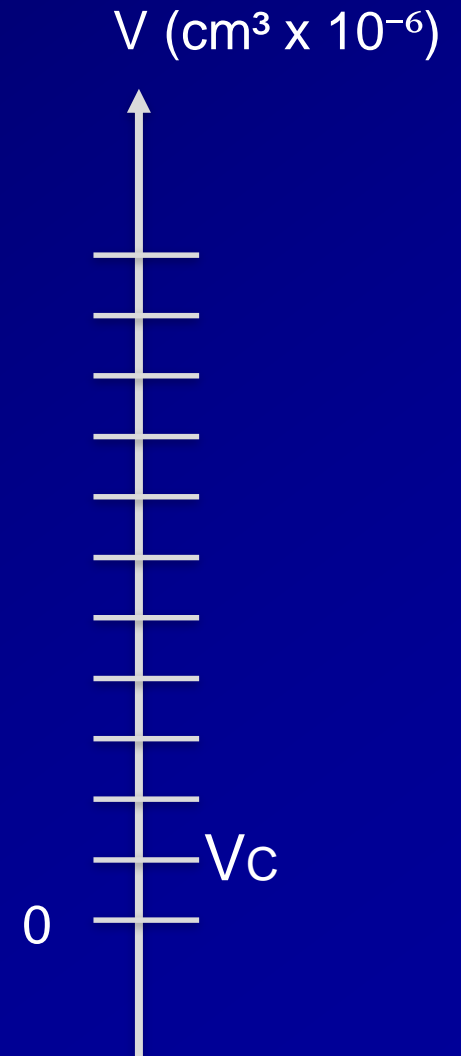
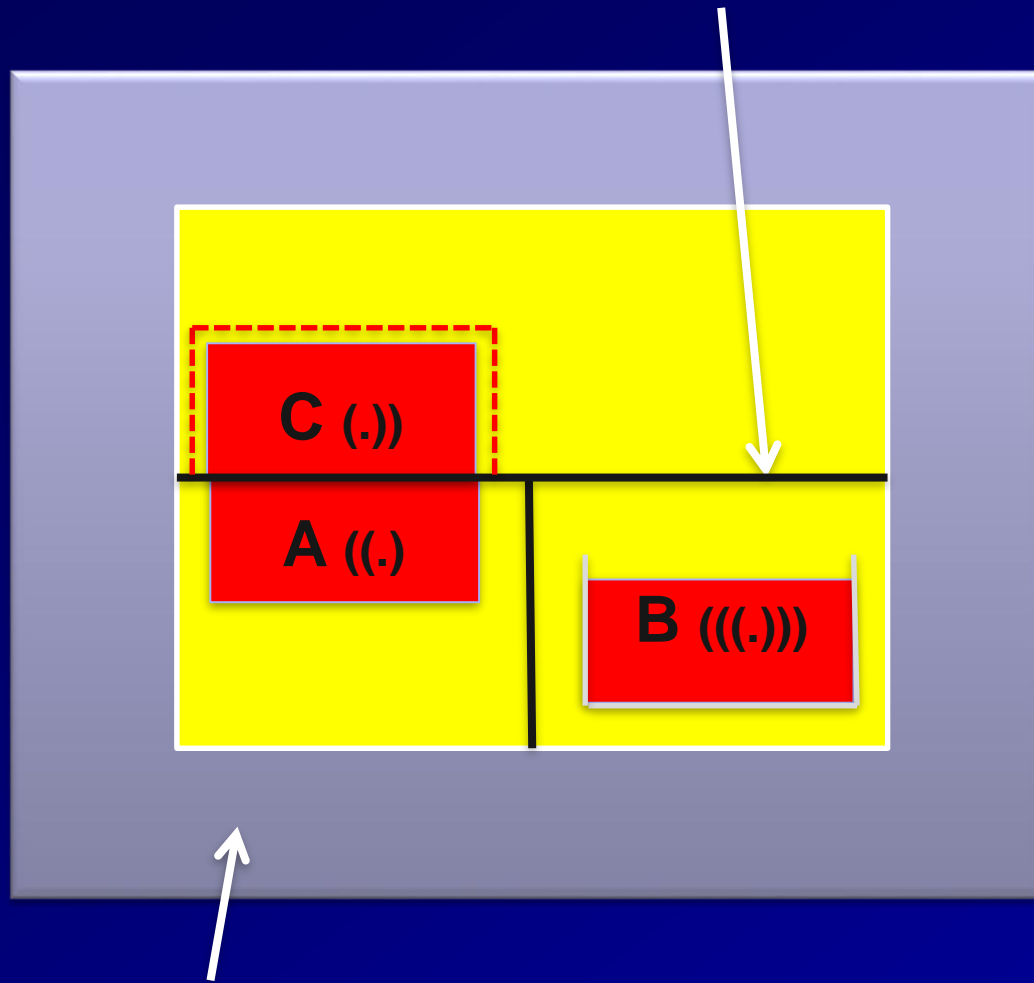


Fig. 1.5.2.

Autor: José Enrique Larios

Pared diatérmana
o diatérmica (${}_1W_2 = 0$)



Pared adiabata o
adiabática (${}_1Q_2 = 0$)

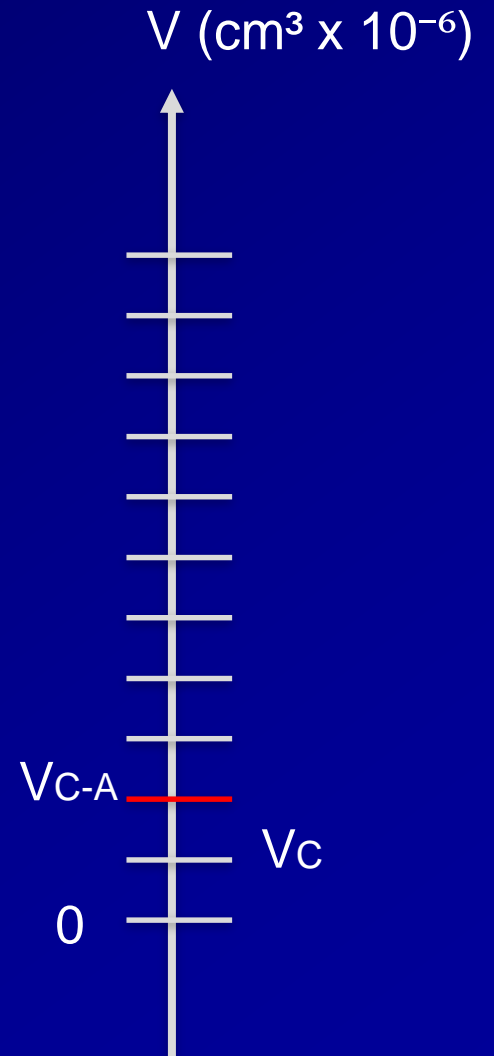


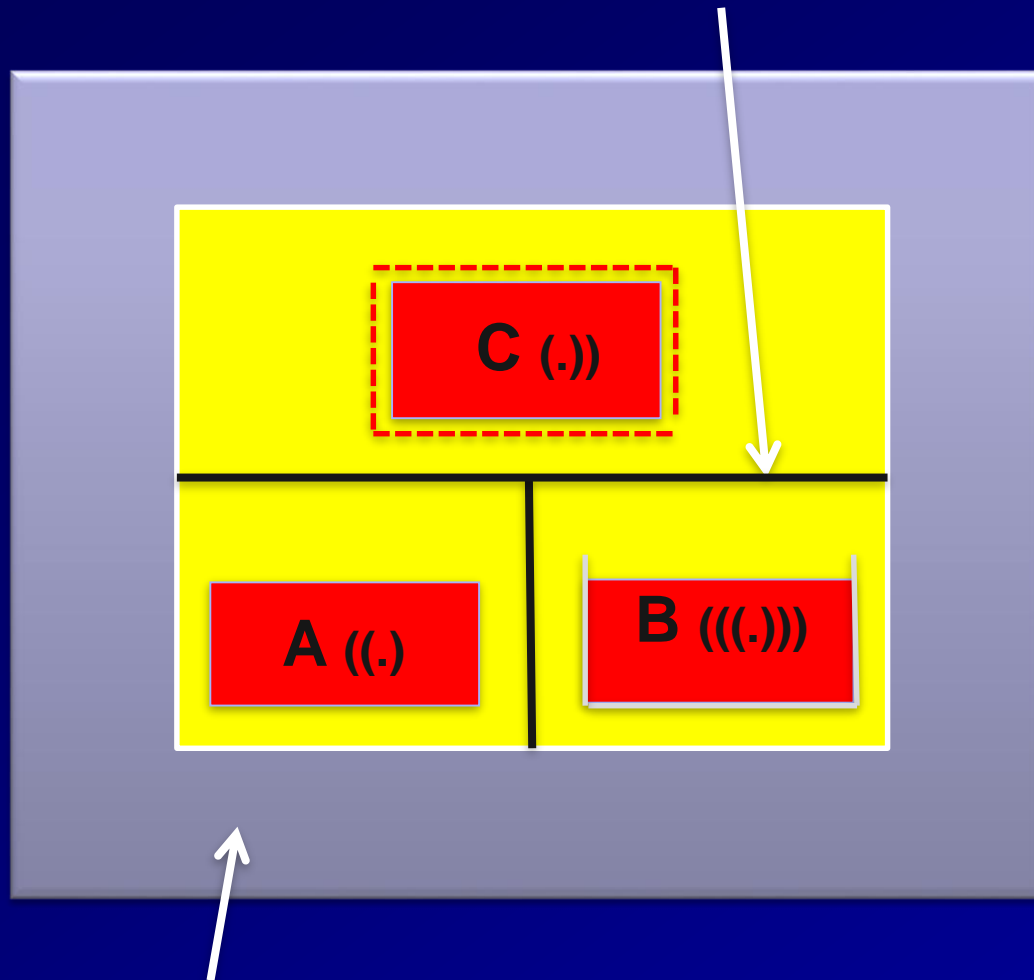
Fig. 1.5.3.

Autor: José Enrique Larios

Si consideramos que el cuerpo «C», después de haberse puesto en contacto con el cuerpo «A» es decir, de alcanzar el equilibrio térmico se pusiera en contacto con una mezcla de agua con hielo a la presión atmosférica del nivel del mar y no cambia su volumen, concluiríamos que están en equilibrio térmico.

De tal manera, que esta consideración nos permite establecer una escala de temperatura como lo hizo Celsius, si asignamos que el volumen V_{c-a} «equivale» a cero grados centígrados, tal como se muestra en la escala de la diapositiva siguiente.

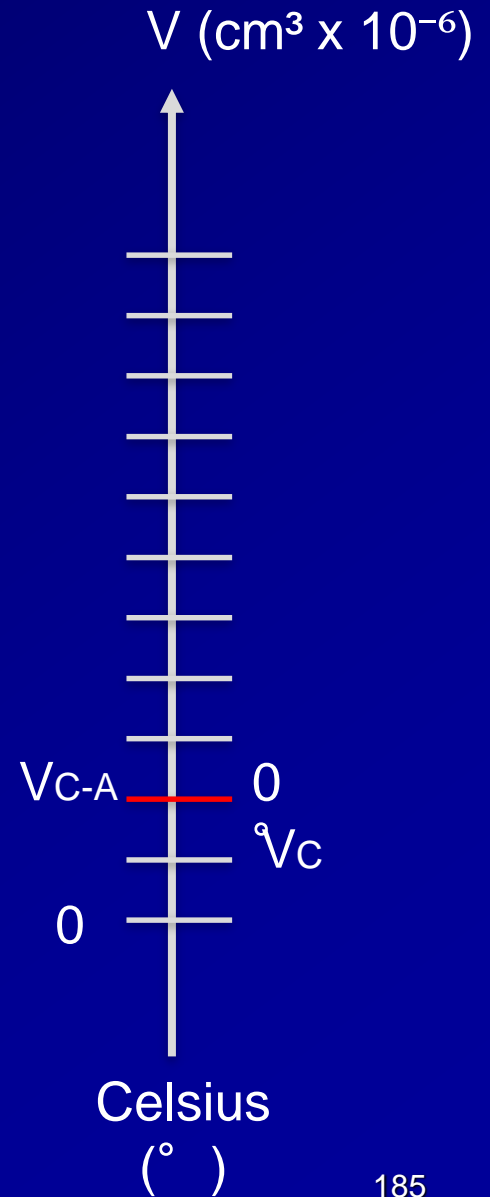
Pared diatérmana
o diatérmica (${}_1W_2 = 0$)



Pared adiabata o
adiabática (${}_1Q_2 = 0$)

Fig. 1.5.4.

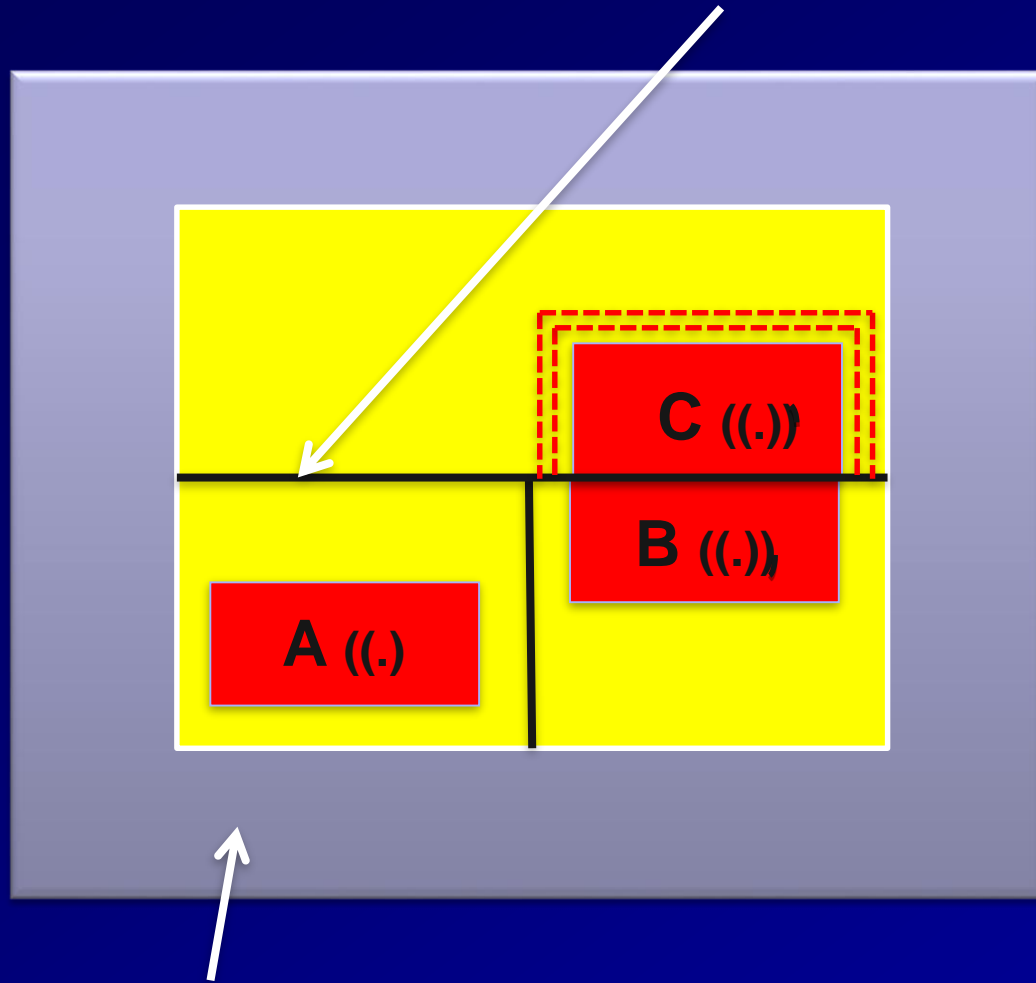
Autor: José Enrique Larios



Al entrar en contacto el cuerpo «B» con el cuerpo «C» se da la transferencia de energía que denominamos en forma de calor, que no es otra cosa más que la energía «microscópica» (energía molecular o interna) que cede el cuerpo «B» al cuerpo «C».

En la siguiente dispositiva, esquemáticamente representamos el equilibrio térmico con la distribución equitativa de la energía molecular en donde, a nivel «microscópica» cada molécula de los cuerpos «B» y «C», después del proceso de transferencia de calor tienen cuatro y medio niveles de energía cada uno. Macroscópicamente el volumen del cuerpo «C» aumenta ($V_C - B$).

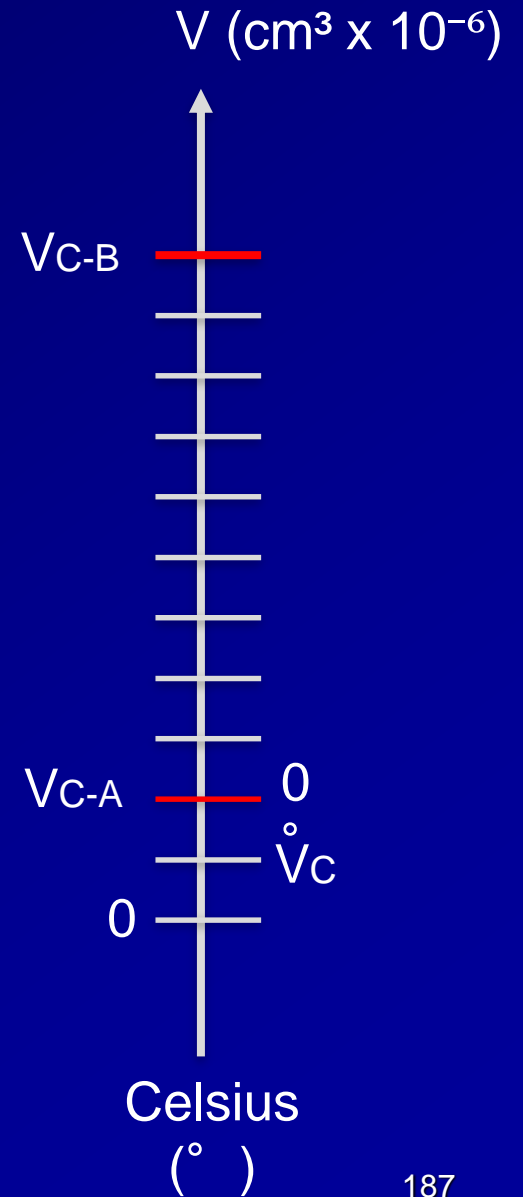
Pared diatérmana
o diatérmica (${}_1W_2 = 0$)



Pared adiabata o
adiabática (${}_1Q_2 = 0$)

Fig. 1.5.5.

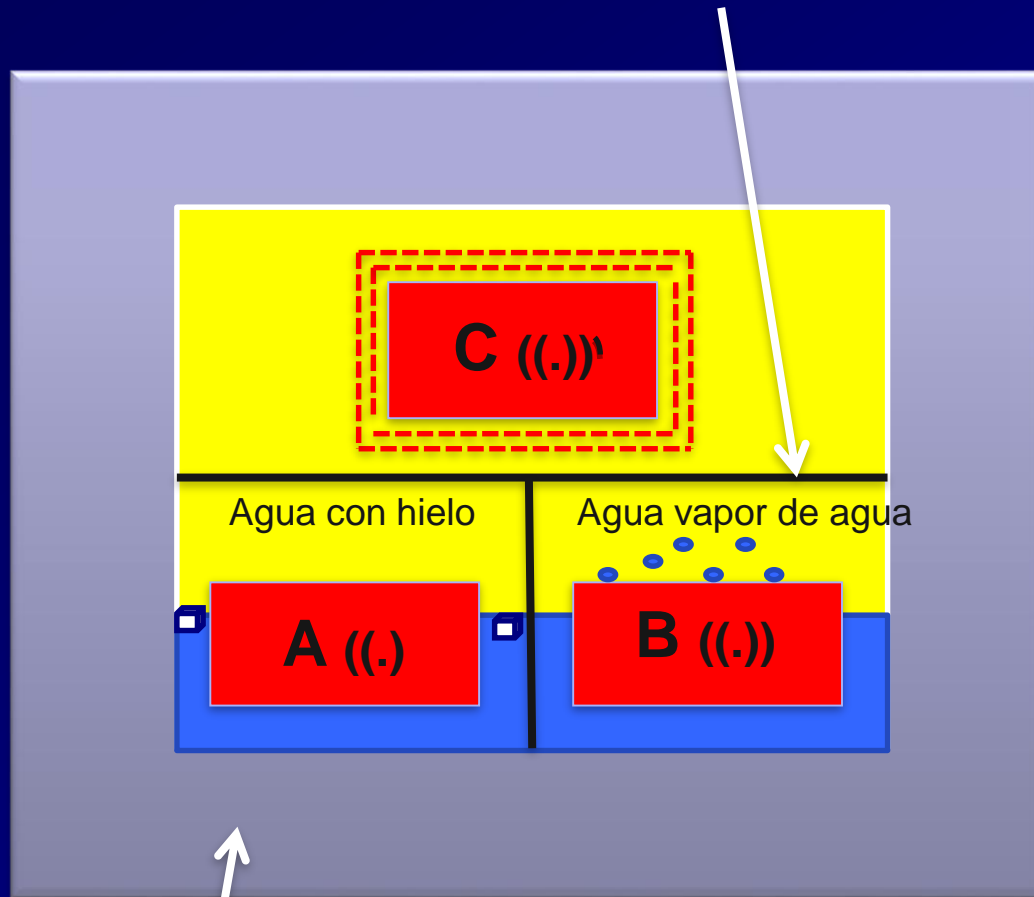
Autor: José Enrique Larios



Si consideramos que el cuerpo «C», después de haberse puesto en contacto con el cuerpo «B» es decir, de alcanzar el equilibrio térmico se pusiera en contacto con una mezcla de agua con vapor de agua a la presión atmosférica del nivel del mar y no cambia su volumen, concluiremos que están en equilibrio térmico.

De tal manera, que esta consideración nos permite establecer una escala de temperatura como lo hizo Celsius, si asignamos que el volumen V_{C-B} «equivale» a cien grados centígrados, tal como se muestra en la escala de la diapositiva siguiente.

Pared diatérmana
o diatérmica (${}_1W_2 = 0$)



Pared adiabata o
adiabática (${}_1Q_2 = 0$)

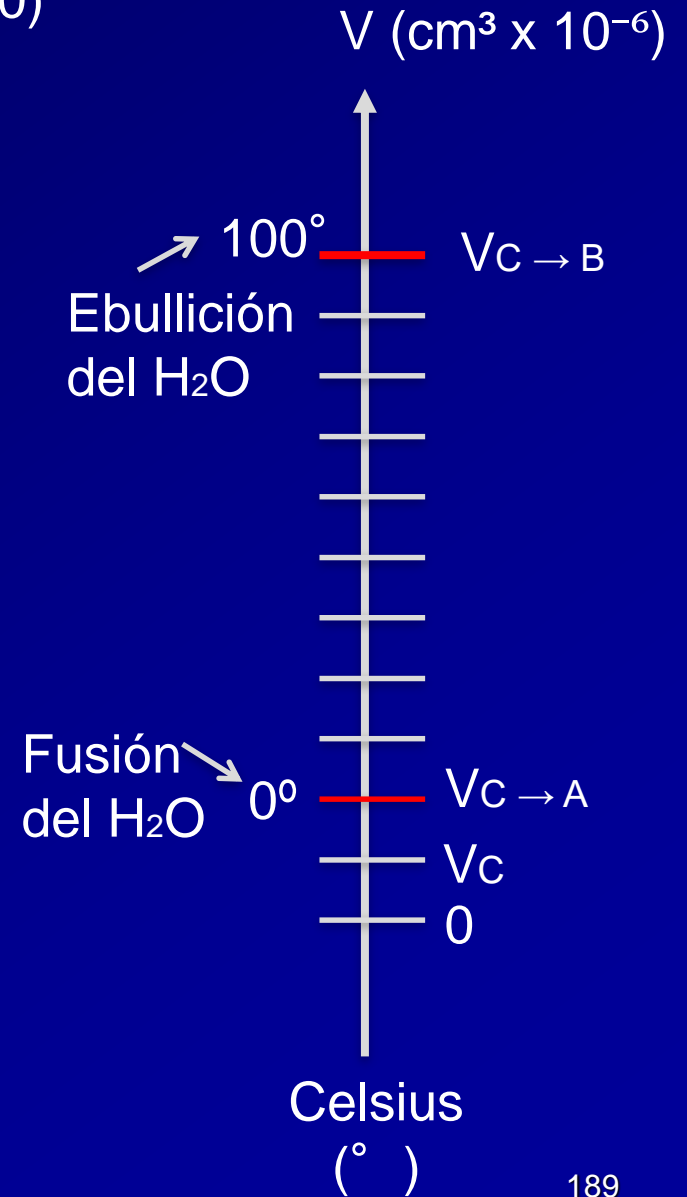


Fig. 1.5.6.

Autor: José Enrique Larios

Establecemos que el cuerpo «C», al cambiar su energía molecular debido a la transferencia de calor, varía su volumen, lo que es macroscópicamente observable y que podemos cuantificar por lo que decimos que el volumen es la propiedad termométrica.

De hecho, el cuerpo «C» funciona como termómetro ya que la adecuación de la escala de volumen a la escala de temperatura en grados Celsius permite medir la «temperatura» asociándolo al cambio de volumen, y con ello establecemos una escala de temperatura empírica que en este caso decimos que es relativa ya que no está referida a un nivel cero de energía molecular.

El cuerpo «C» de las diapositivas anteriores, equivale a lo que conocemos como el termómetro de Bulbo de mercurio ya que la propiedad termométrica que se emplea es la dilatación volumétrica que con el tubo capilar se transforma en dilatación lineal.

DILATACIÓN

- Volumétrica
- Superficial
- Lineal

La sustancia termométrica: Hg

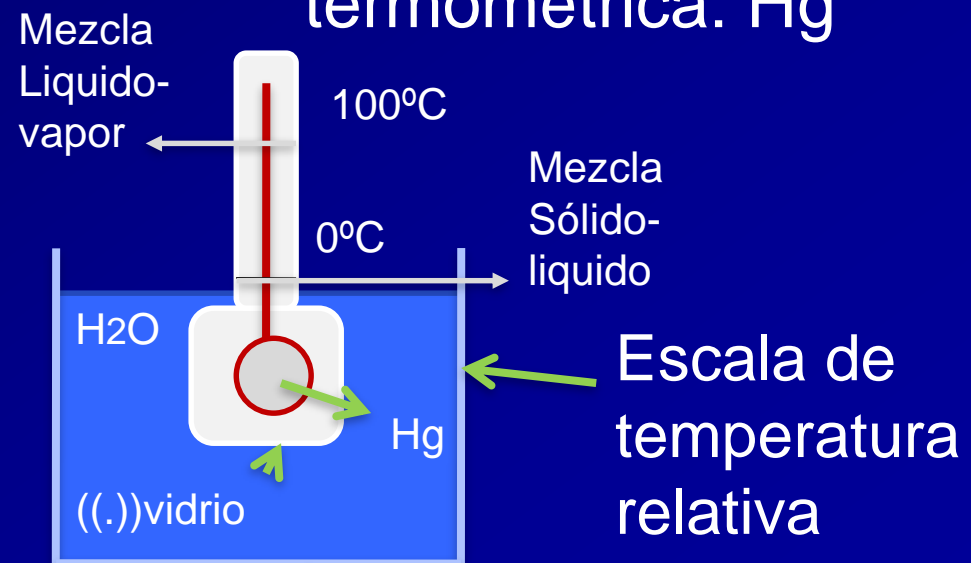


Fig. 1.5.7.

Al lingote de cobre del cuerpo «C» se le denomina sustancia termométrica, y en sí, la descripción de los procesos de transferencia de calor con los cuerpos «A» y «B», lo que se llevó a cabo fue la «medición» de su temperatura.

En instrumentación y metrología diríamos que el cuerpo «C» transduce la señal variación de energía interna (nivel energético molecular), que no es observable por el hombre, a una señal física que si es observable por el hombre: el cambio de volumen del cuerpo «C» en los procesos de transferencia de calor descritos.

Como consecuencia del análisis hecho a la Ley Cero de la Termodinámica, a partir de los procesos descritos anteriormente, a continuación se definen los siguientes conceptos.

EQUILIBRIO TÉRMICO. Se presenta cuando dos cuerpos o sistemas termodinámicos tienen el mismo nivel energético molecular, que a nivel macroscópico equivale a que se encuentran a la misma temperatura. Como en el caso del cuerpo “C” al equilibrarse energéticamente a nivel molecular con los cuerpos “A” y “B”, cuando estos están en equilibrio con el agua en los estados de fusión y ebullición, respectivamente.

TEMPERATURA EMPÍRICA. Es la propiedad termodinámica que se define a partir de que se le relaciona con una propiedad física, macroscópicamente observable , que cambia cuando su energía molecular cambia y sirve como el parámetro con el cual se establece el nivel energético molecular de un sistema, es decir, su energía interna.

La temperatura empírica se puede definir con respecto a un nivel de energía absoluto o relativo. Es absoluto cuando este parámetro se escala con respecto a un nivel energético molecular cero. Es relativo cuando la temperatura se

escala con respecto a un nivel energético molecular arbitrario, por ejemplo, el punto de fusión del agua.

TERMÓMETRO: Es un dispositivo o instrumento de medición que transduce los cambios de la energía molecular de un sistema al cambio de una propiedad física macroscópicamente observable, como puede ser el cambio de volumen, resistencia eléctrica, diferencia de potencial, presión, luminosidad, etc. Al escalar esta variable termométrica a un punto de referencia absoluto o relativo, se cuantifica la temperatura empírica absoluta o relativa, respectivamente.

ESCALAS DE TEMPERATURA EMPÍRICA RELATIVA Y ABSOLUTA

Cuando en un termómetro se escalan los cambios lineales de una propiedad física macroscopicamente observable del sistema en estudio, debido a los cambios en la energía interna de dicho sistema, se dice que se establece una escala de temperatura empírica.

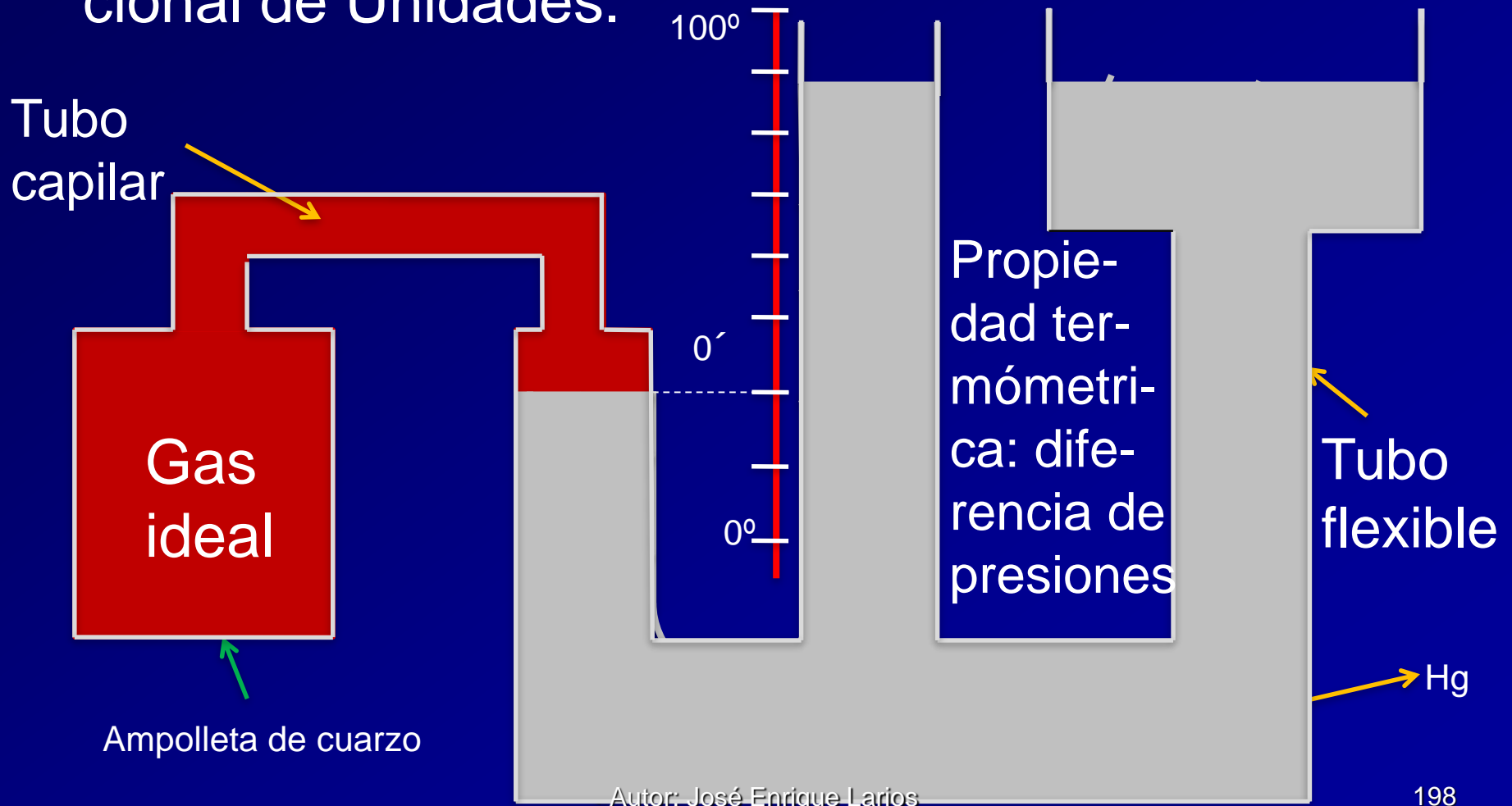
La escala de temperatura empírica puede estar referida, para cuantificar los cambios energéticos, ya sea a un punto arbitrario, con lo que

se establece una escala de temperatura empírica relativa; o bien, referido a un nivel de energía molecular cero, y establecer una escala de temperatura empírica absoluta.

Históricamente la primera escala que se desarrolló fue la centígrada que propuso Celsius, posteriormente Lord Kelvin, con base en la escala de Celsius, propuso su escala de temperatura absoluta. En la diapositiva siguiente se presenta el termómetro de temperatura patrón que se emplea en el Sistema Internacional de Unidades: el Termómetro de Gas a Volumen Constante.

TERMÓMETRO DE GAS A VOLUMEN CONSTANTE.

Fig. 1.5.8. Termómetro Patrón del Sistema Internacional de Unidades.



ESCALAS DE TEMPERATURA EMPÍRICA RELATIVA Y ABSOLUTA

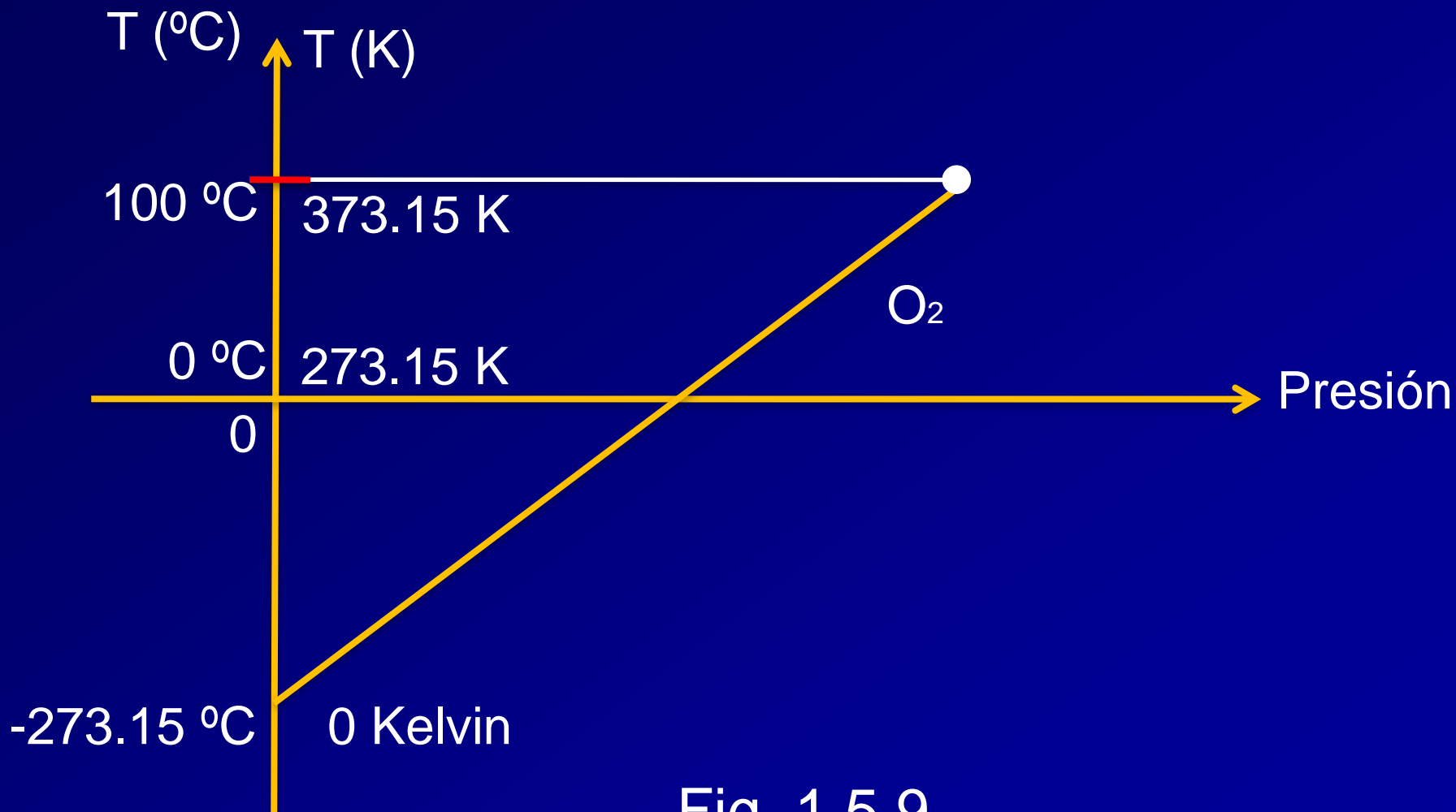


Fig. 1.5.9.

TEMPERATURA EMPÍRICA ABSOLUTA: Es el parámetro cuyo valor numérico está dado en grados y hace referencia a la energía interna del sistema, con un nivel de energía molecular cero, como lo establece la escala de temperatura absoluta de Kelvin o de Rankine.

TEMPERATURA EMPÍRICA RELATIVA: Es el parámetro cuyo valor numérico está dado en grados y hace referencia a la energía interna del sistema, con un nivel de energía molecular arbitrario, como lo establece la escala de temperatura relativa de Celsius o de Fahrenheit.

Fig. 1.5.10. Escalas de temperatura.

Kelvin	Celsius	Farenheit	Rankine
373.15 K	100 °C	212 °F	671.6 °R
	100	180	
273.15 K	0 °C	32 °F	
		0 °F	459.6° R
0 K	-273.15 °C	-459.6 °F	0 °R

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$$

$$^{\circ}\text{F} = 1.8 \text{ }^{\circ}\text{C} + 32$$

$$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{R} - 459.6$$

TIPOS DE TERMÓMETROS

DILATACIÓN

- Volumétrica
- Superficial
- Lineal

La sustancia termométrica: Hg

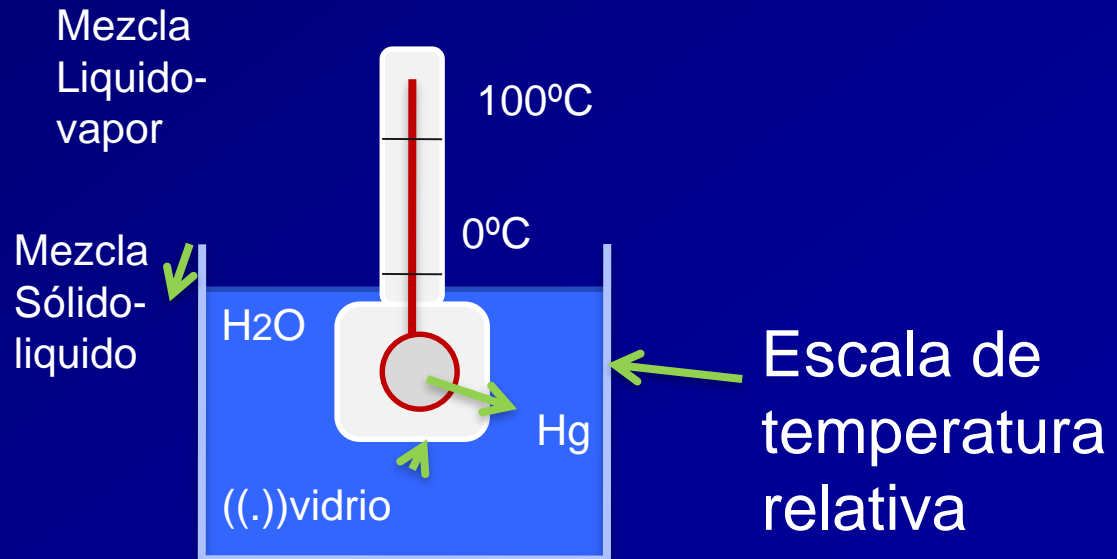
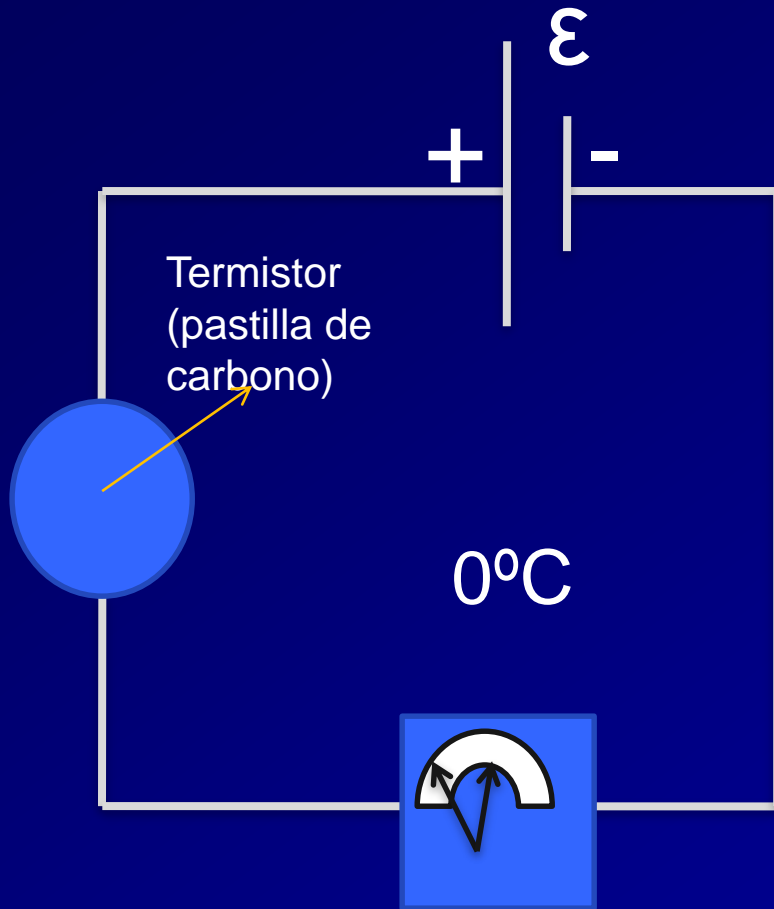


Fig. 1.5.11.

RESISTENCIA ELÉCTRICA



La sustancia termométrica:
Semiconductor

Fig. 1.5.12.

Amperímetro

DIFERENCIA DE POTENCIAL

La sustancia termométrica:
Termopar

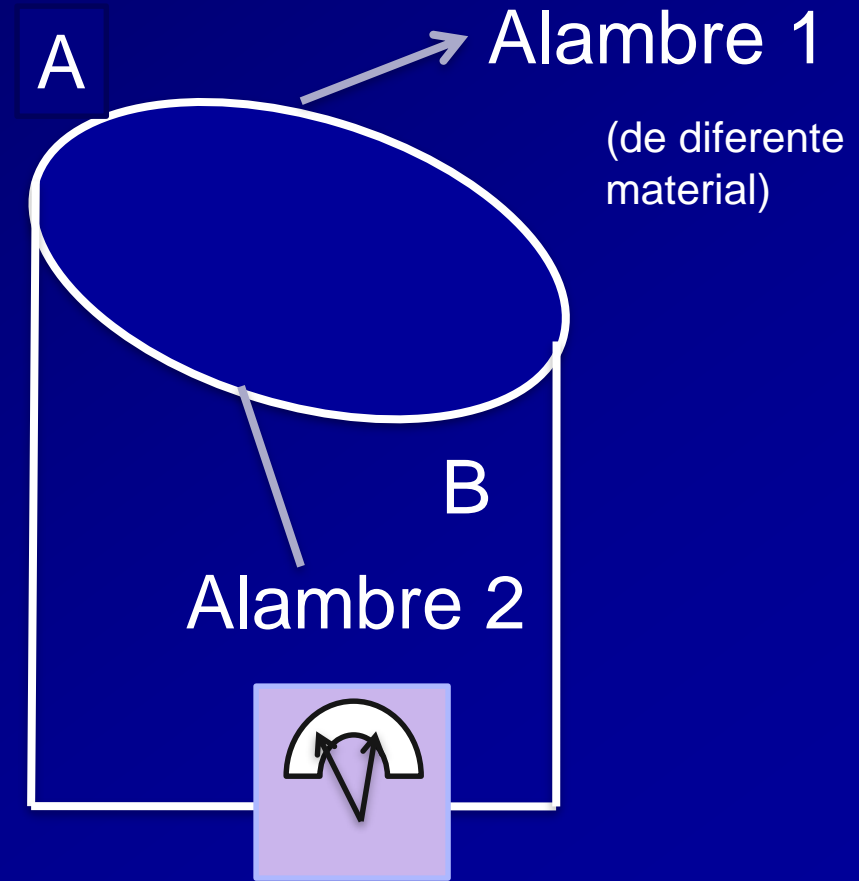
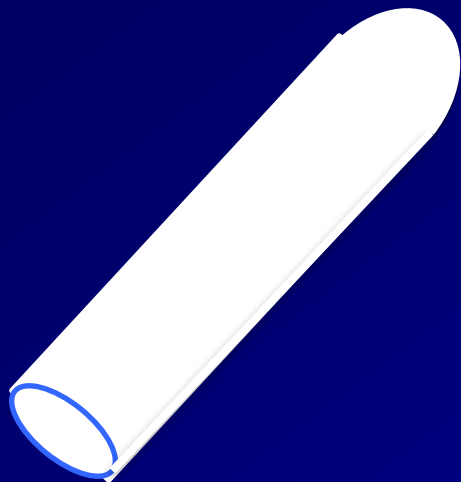


Fig. 1.5.13.

INTENSIDAD LUMINOSA (PIRÓMETROS)

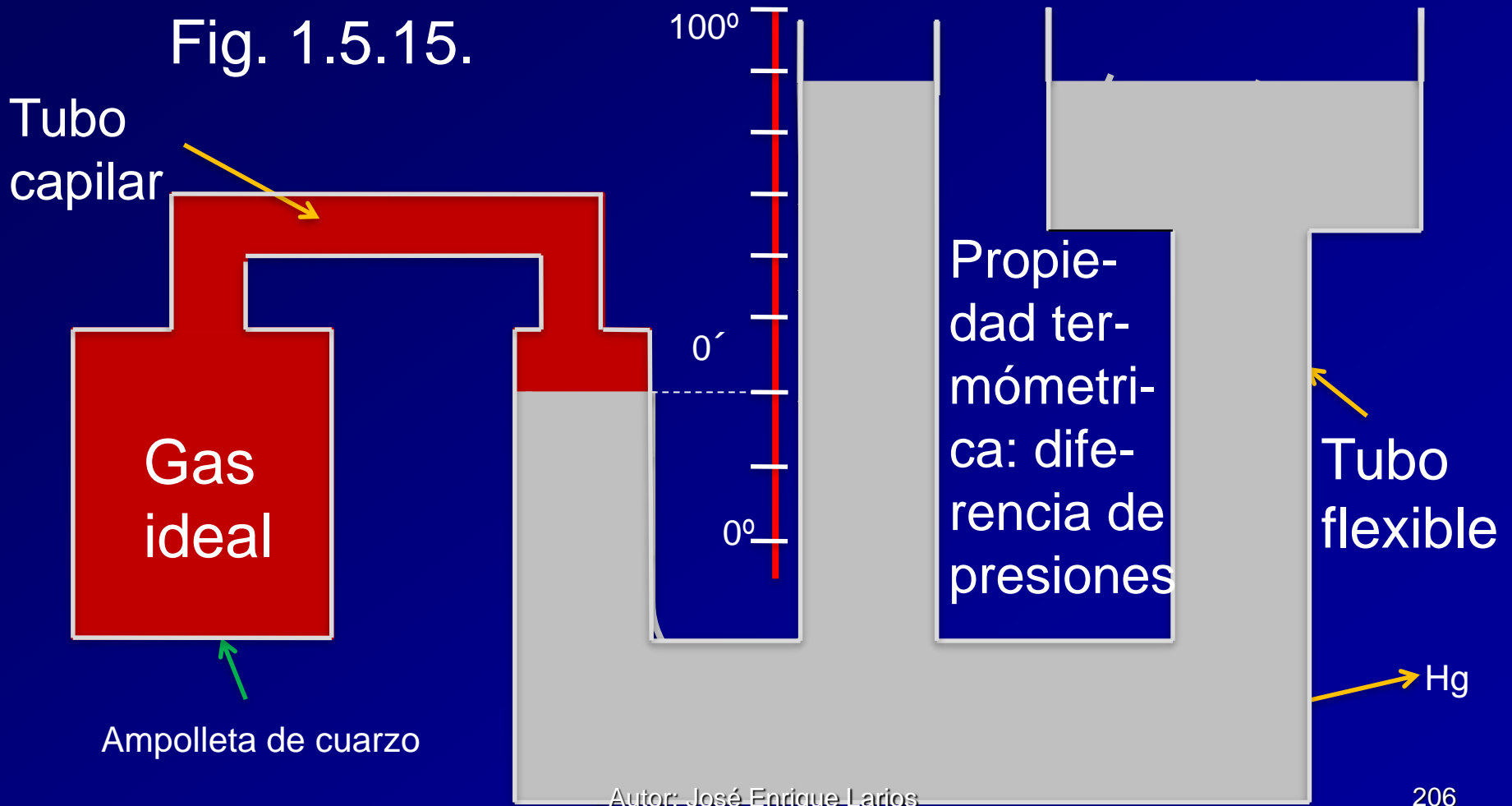


- La sustancia termométrica es:
Barra de aleación metálica.
- La propiedad termométrica es:
La intensidad luminosa.
- La escala es:
Color – temperatura.

Fig. 1.5.14.

DIFERENCIA DE PRESIONES: Termómetro de Gas a Volumen Constante es el Termómetro Patrón del Sistema Internacional de Unidades.

Fig. 1.5.15.



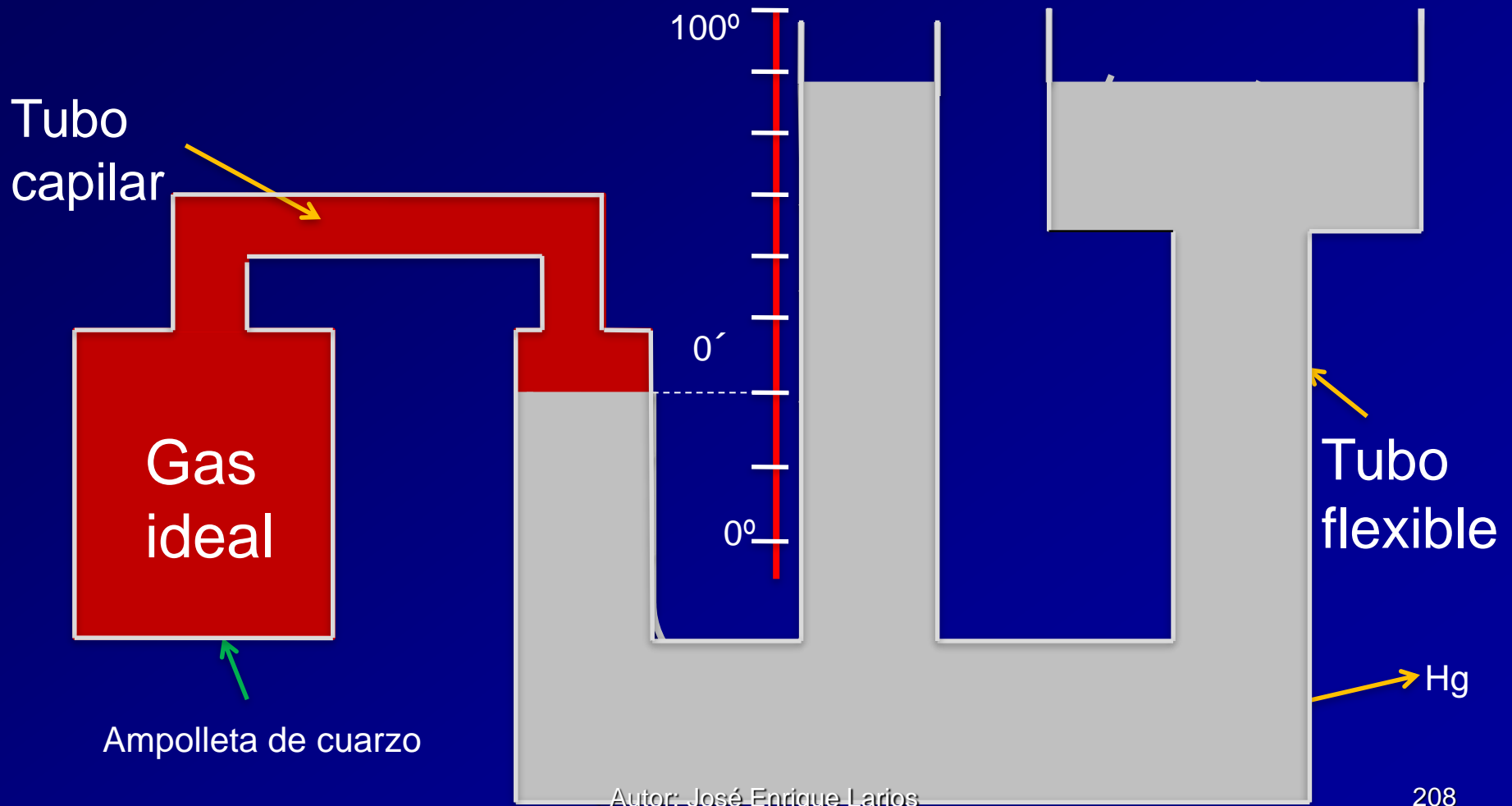
EJERCICIO 1.5.1

Un termómetro de gas a volumen constante se pone en contacto con un sistema de temperatura desconocida T y a continuación en contacto con agua en el punto triple. La columna de mercurio unida al termómetro da una lectura de $+10.7$ y -15.5 (cm), respectivamente.

La presión atmosférica local es de 980 (mbar) y la densidad relativa del mercurio es de 13.6

Determine la temperatura desconocida en Kelvin.

DATOS: $h_{SD} +10.7$; $h^* = -15.5$ (cm) (punto triple del agua)
 $P_{ATM} = 980$ (mbar); $\rho_{Hg} = 13,600$ (kg/m^3); $g = 9.8$ (m/s^2)



RESOLUCIÓN: La sustancia termométrica es Gas Ideal

$$P^*V = mRT^*$$

T^* = punto triple del agua

$$T^* = 0.01 (^{\circ} \text{C}) = 273.16 \text{ (K)}$$

$\rightarrow h^* = -15.5$ (cm de Hg) altura del manovacuómetro

$$T_D = ? \text{ (K)} \rightarrow h_D = 10.7 \text{ (cm de Hg)}$$

$$\left. \begin{array}{l} \cancel{P_D V} = \cancel{mRT_D} \rightarrow P_D/T_D = mR/V \\ \cancel{P^* V} = \cancel{mRT^*} \rightarrow P^*/T^* = mR/V \end{array} \right\} \begin{array}{l} \underline{P_D} = \underline{P^*} \rightarrow \underline{P^*} = \underline{P_D} \\ \underline{T_D} \quad \underline{T^*} \quad \underline{P_D} \quad \underline{T_D} \end{array}$$

Como la ampolleta de cuarzo es un sistema cerrado:

$$m = \text{ctte}: V_P = V^*$$

Como el gas no cambia: $R = \text{ctte}$

$$\frac{P^*}{P_D} = \frac{T^*}{T_D} \rightarrow T_D = T^* \left(\frac{P_D}{P^*} \right)$$

$$T_D = (273.16) \frac{(P_{ATM} + \rho gh)_{\text{man}}}{(P_{ATM} - \rho gh)_{\text{vac}}}$$

$$T_D = (273.16) \left(\frac{98,000 + (13,600)(9.8)(0.107)}{98,000 - (13,600)(9.8)(0.155)} \right)$$

$$T_D = 396.49 \text{ (K)}$$

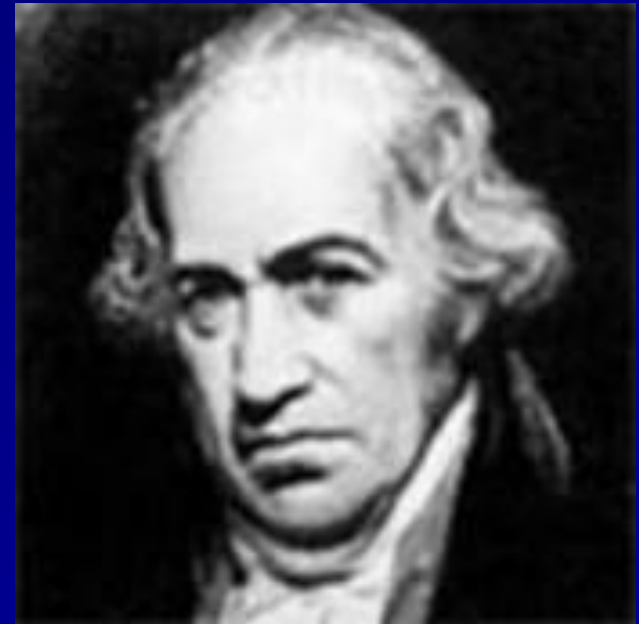
ANDERS CELSIUS

(1701 - 1744) Astrónomo sueco, fue el primero que propuso el termómetro centígrado, que tiene una escala de 100 grados que separan el punto de ebullición y el de congelación del agua.



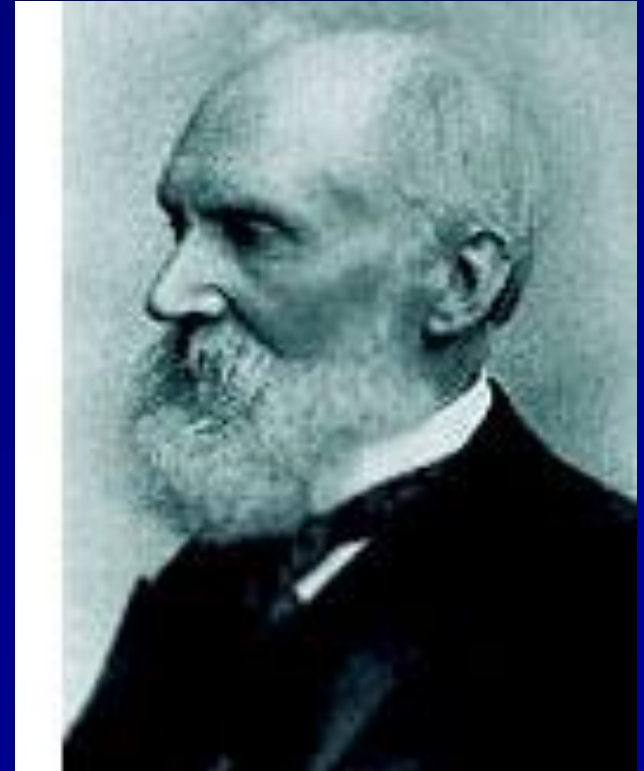
FAHRENHEIT, DANIEL GABRIEL

(1686 - 1736). Físico alemán. En 1714 construyó el primer termómetro con mercurio en vez de alcohol. Con el uso de este termómetro, concibió la escala de temperatura conocida por su nombre. Descubrió que además del agua, hay otros líquidos que tienen un punto de ebullición determinado y que estos puntos de ebullición varían con los cambios de presión atmosférica.



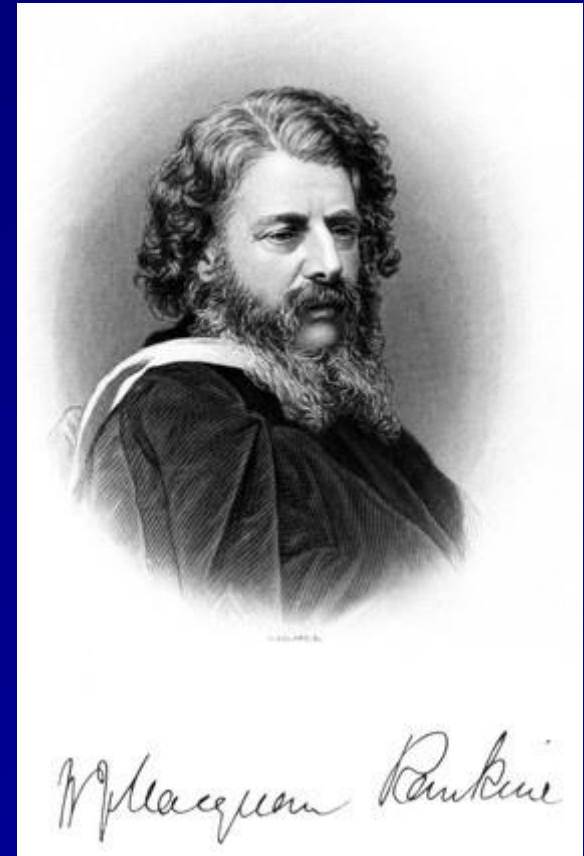
KELVIN, WILLIAM THOMSON

Lord (1824 - 1907). Matemático y físico británico. En 1848 Kelvin estableció la escala absoluta de temperatura que sigue llevando su nombre.



RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN

Ingeniero y físico escocés (1820-1872). En el *Manual of the Steam Engine* (1859) desarrolló analíticamente el complejo de las transformaciones del vapor en las máquinas térmicas, y estableció el ciclo termodinámico característico (ciclo de Rankine).



1.6 EL POSTULADO DE ESTADO. EL DIAGRAMA (V,P). DEFINICIÓN DE PROCESO TERMODINÁMICO, PROCESO CASIESTÁTICO, PROCESO CASIESTÁTICO: ISOBÁRICO, ISOMÉTRICO, ISOTÉRMICO, ADIABÁTICO Y POLITRÓPICO. EL PROCESO CÍCLICO.

Enunciado del Postulado de Estado

“El número de propiedades termodinámicas independientes que definen el estado termodinámico intensivo de una sustancia pura, es igual al número de formas que esta sustancia tiene para hacer trabajo potencialmente reversible, más uno.”

En el Tema 1 se estableció que el estado termodinámico de un sistema expresa el nivel energético de la sustancia de trabajo de un sistema termodinámico, que se manifiesta mediante sus propiedades termodinámicas independientes que denotamos con la letra “X” y con “Y” a cualquier otra propiedad termodinámica dependiente, cuya relación funcional, se puede expresar por: $Y = F(X_1, X_2, X_3 \dots X_n)$, que se obtiene empíricamente con modelos matemáticos basados en principios, conceptos y leyes de la Termodinámica, donde: $Y_1, Y_2, \dots Y_n$

Las propiedades termodinámicas dependientes “Y” se pueden obtener empíricamente con modelos matemáticos basados en principios, conceptos y leyes de la Termodinámica, sin embargo, la pre-

gunta es ¿cuál es el número mínimo de propiedades termodinámicas independientes “X” definen el estado termodinámico de un sistema?

Como todo en la Física, basándose en la experimentación, se observó que el número de propiedades termodinámicas independientes “X” están relacionadas con el número de formas de hacer trabajo potencialmente reversible que tiene la sustancia de trabajo de un sistema termodinámico, como lo establece el Postulado de Estado aplicable a sustancias puras y simples, que a continuación se definen.

SUSTANCIA PURA

Es aquella que tiene una composición o estructura molecular químicamente homogénea y estable, por lo cual no hay reacciones químicas que alteren su comportamiento físico, como por ejemplo el agua, que es empleada en las plantas termoeléctricas y en general en procesos industriales.

Hay otras sustancias de trabajo que no son sustancias puras, como por ejemplo el aire, pero que en ciertas condiciones de estado se comporta como sustancia pura.

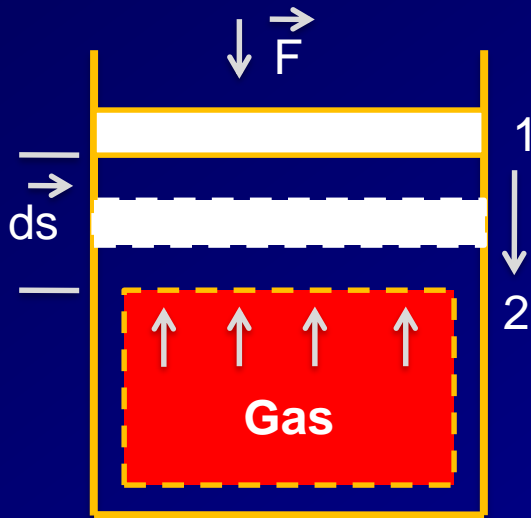
SUSTANCIA SIMPLE

Es aquella que tiene una forma relevante de efectuar trabajo potencialmente reversible. Hay sustancias simples: eléctrica; magnética, de tensión superficial; compresible; etc.

SUSTANCIA SIMPLE COMPRESIBLE

Es aquella sustancia de trabajo, gas o vapor sobrecalentado, cuya forma relevante de efectuar trabajo potencialmente reversible es debido a su capacidad de variar su volumen.

La evaluación del trabajo de una Sustancia Simple Compresible se calcula con la ecuación general del trabajo mecánico.



$${}_1W_2 = \int_1^2 \vec{F}_g \cdot d\vec{s}$$

Fig. 2.1.1. Proceso Cuasiestático

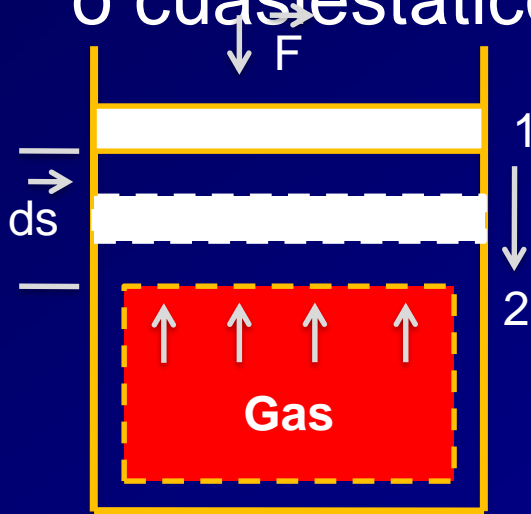
Para que se considere que el trabajo se realiza mediante un proceso potencialmente reversible o cuasiestático, se hacen idealizaciones que permiten al gas regresar a su estado inicial de manera espontánea, para lo cual se considera que no están presentes las causas de irreversibilidad.

Por ejemplo, para que no haya fricción entre el émbolo y las paredes del cilindro se idealiza que la variación o cambio de volumen es infinitesimal, por tanto, el desplazamiento ds del pistón es tan lento que se “evita” la acción de la fuerza de fricción y el gas alcanza el equilibrio termodinámico en cada punto de la trayectoria y la presión, la

temperatura, volumen específico, etc., es decir, cada una de las propiedades termodinámicas tienen un valor en cualquier punto dentro del sistema, cabe recordar que el equilibrio termodinámico de un sistema implica:

- a) Equilibrio mecánico (no se presenta ningún gradiente de presión dentro del sistema, presión constante);
- b) Equilibrio térmico (no se presenta ningún gradiente de temperatura dentro del sistema, temperatura constante), y
- c) Equilibrio químico (no se presenta ninguna reacciones químicas, no hay procesos exotérmico o endotérmico).

TRABAJO DE UNA SUSTANCIA SIMPLE COMPRESIBLE. Es el trabajo que se realiza sobre un gas o vapor sobrecalentado al comprimirlo o el trabajo que éste realiza al expandirse, de forma potencialmente reversible o cuasiestático.



Proceso
Cuasiestático

$${}_1W_2 = \int_1^2 \vec{F}_g \cdot d\vec{s}$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 |\vec{F}_g| |ds| \cos\theta$$

$$\vec{F}_g = P_g A$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 |P_g A| |\vec{ds}| \cos 180^\circ$$

$$Ads = dV$$

El trabajo de una Sustancia Simple Compresible se le denominará en estas notas trabajo de compresión/expansión ($W_{c/e}$), que se evalúa con la siguiente ecuación:

$${}_1W_2_{c/e} = - \int_1^2 P dV$$

EJERCICIO: 2.3.3

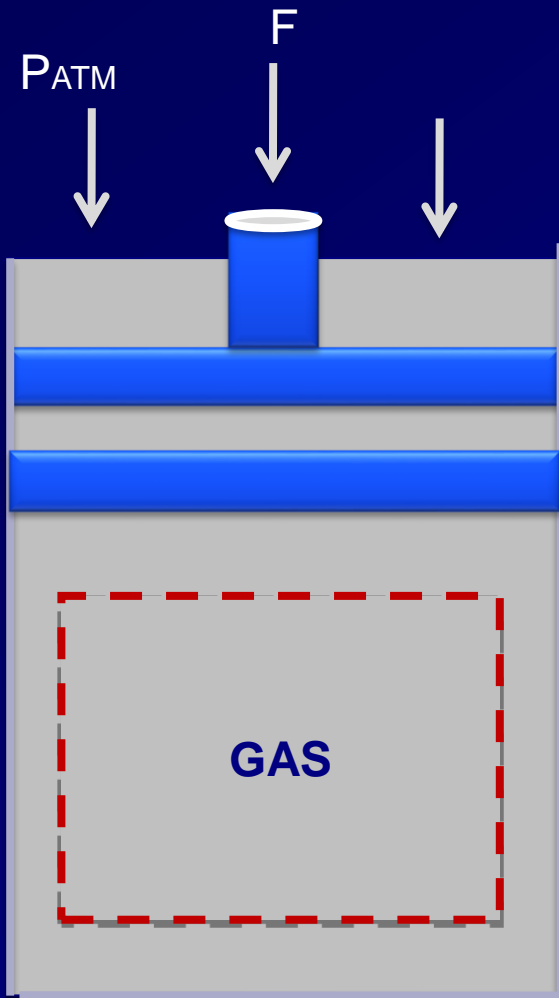
Un gas está confinado dentro de un dispositivo cilindro-pistón sin fricción y rodeado por la atmósfera normal. Al principio su presión era de 1,400 [kPa] y un volumen de 0.3 [m³]. Si el gas se expande hasta alcanzar un volumen de 0.6 [m³] y el área del pistón es de 0.1 [m²], calcule el trabajo en Joule que realiza el sistema contra la fuerza F cuya dirección es la del eje que está conectado al pistón.

La presión atmosférica es de 100 [kPa], supóngase-

se que el proceso que sigue el sistema es :

- a) A presión constante;
- b) El producto PV es una constante;
- c) El producto PV^2 es una constante.

Compare los procesos cuasiestáticos usando un diagrama P-V.



$$P_1 = 1,400 \text{ (kPa)}$$

$$V_1 = 0.3 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$V_2 = 0.6 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$A_{\text{pistón}} = 0.1 \text{ [m}^2\text{]}$$

$${}_1W_2 = ?$$

$$P_{\text{ATM}} = 100 \text{ (kPa)}$$

$$\text{a) } P = \text{ctte}; \quad {}_1W_{2 \text{ c/e}} = -\int_1^2 P dV = -P(V_2 - V_1)$$

$${}_1W_{2 \text{ c/e}} = -(1,400 \times 10^3)(0.6 - 0.3) = -420,000.0 \text{ (J)}$$

$$P_{\text{ATM}} = \text{ctte}, \quad {}_1W_{2 \text{ c/e}})_{\text{ATM}} = -P_{\text{ATM}} (V_2' - V_1')$$

$${}_1W_{2 \text{ c/e}})_{\text{ATM}} = - (100)(10^3)(-0.3) = 30,000 \text{ (J)} = 30 \text{ (kJ)}$$

El trabajo total en el universo es:

$$\Sigma W = 0$$

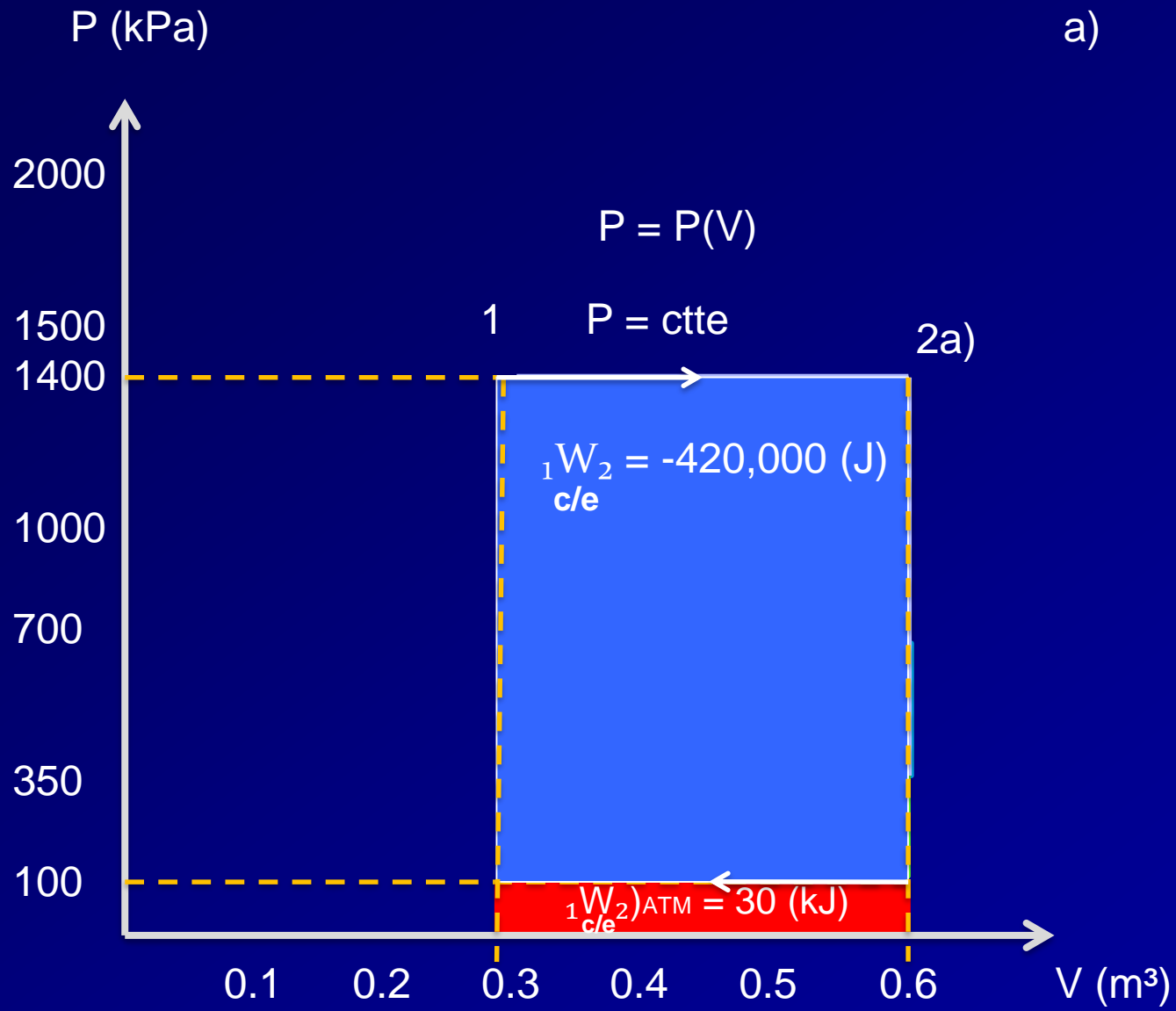
$${}_1W_{2)_{\text{ATM}}} + W_F + {}_1W_{2)_{\text{gas}}} = 0$$

$${}_1W_{2)_{\text{F}}} = - {}_1W_{2)_{\text{gas}}} - {}_1W_{2)_{\text{ATM}}} \dots (1)$$

Sustituyendo resultados en la Ec. (1)

$${}_1W_{2)_{\text{F}}} = -(-420) - 30 = 390,000 \text{ (J)}$$

a)



$$b) \quad PV = \text{ctte}; \quad P = \frac{\text{ctte}}{V}$$

Sustituyendo en ${}_1W_2$
c/e

$${}_1W_2 \frac{c/e}{c/e} = - \int_1^2 \frac{\text{ctte}}{V} dV = -\text{ctte} \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$${}_1W_2 \frac{c/e}{c/e})_{\text{gas}} = -P_1 V_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$${}_1W_2 \frac{c/e}{c/e})_{\text{gas}} = -(1.4 \times 10^6)(0.3) \ln (0.6/0.3)$$

$${}_1W_{2\frac{c}{e}})_{\text{gas}} = -291,121.8 \text{ (J)}$$

Sustituyendo resultados en la Ec. (1)

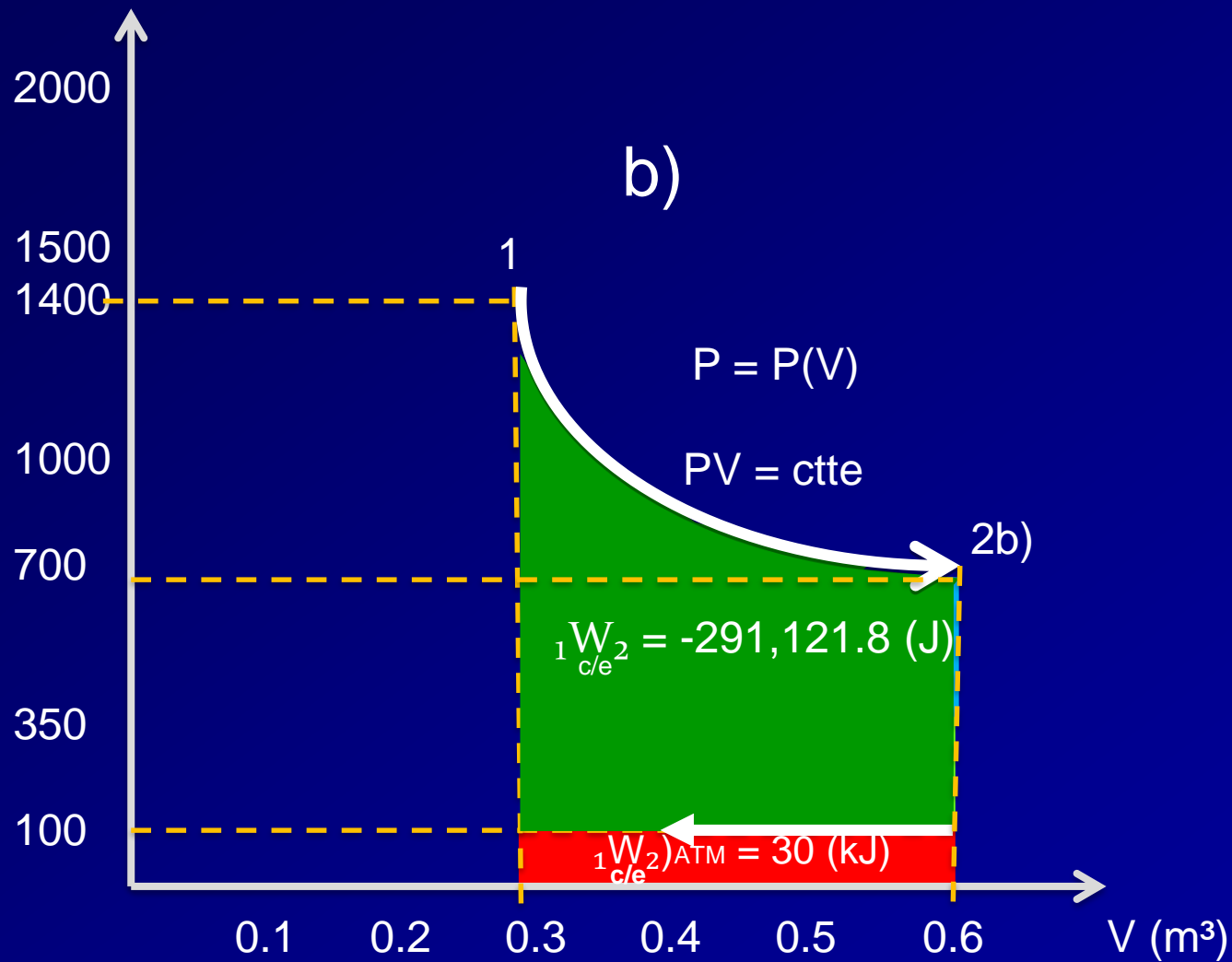
$${}_1W_{2)F} = -(-291,121.8) - 30,000$$

$$\text{b) } {}_1W_{2)F} = 261,121.8 \text{ (J)}$$

Para graficar el proceso b)

$$P_1V_1 = P_2V_2 \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$P_2 = 1,400 \text{ (kPa)} (0.3/0.6) = 700 \text{ (kPa)}$$



$$c) \quad PV^2 = \text{ctte} \rightarrow P = \frac{\text{ctte}}{V^2}$$

Sustituyendo:

$${}_1W_2)_{\text{gas}} = - \int_1^2 \frac{\text{ctte}}{V^2} dV = -\text{ctte} \int_1^2 V^{-2} dV = \frac{-\text{ctte}V^{-2+1}}{-1} \Big|_1^2$$

$${}_1W_2)_{\text{gas}} = P_1 V_1^2 \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right)$$

$$\frac{{}_1W_{2)_{\text{gas}}}}{c/e} = (1.4 \times 10^6)(0.3)^2 \begin{pmatrix} \underline{1} & - \underline{1} \\ 0.6 & 0.3 \end{pmatrix}$$

$$\frac{{}_1W_{2)_{\text{gas}}}}{c/e} = -210,000 \text{ (J)}$$

Sustituyendo en la Ec. (1)

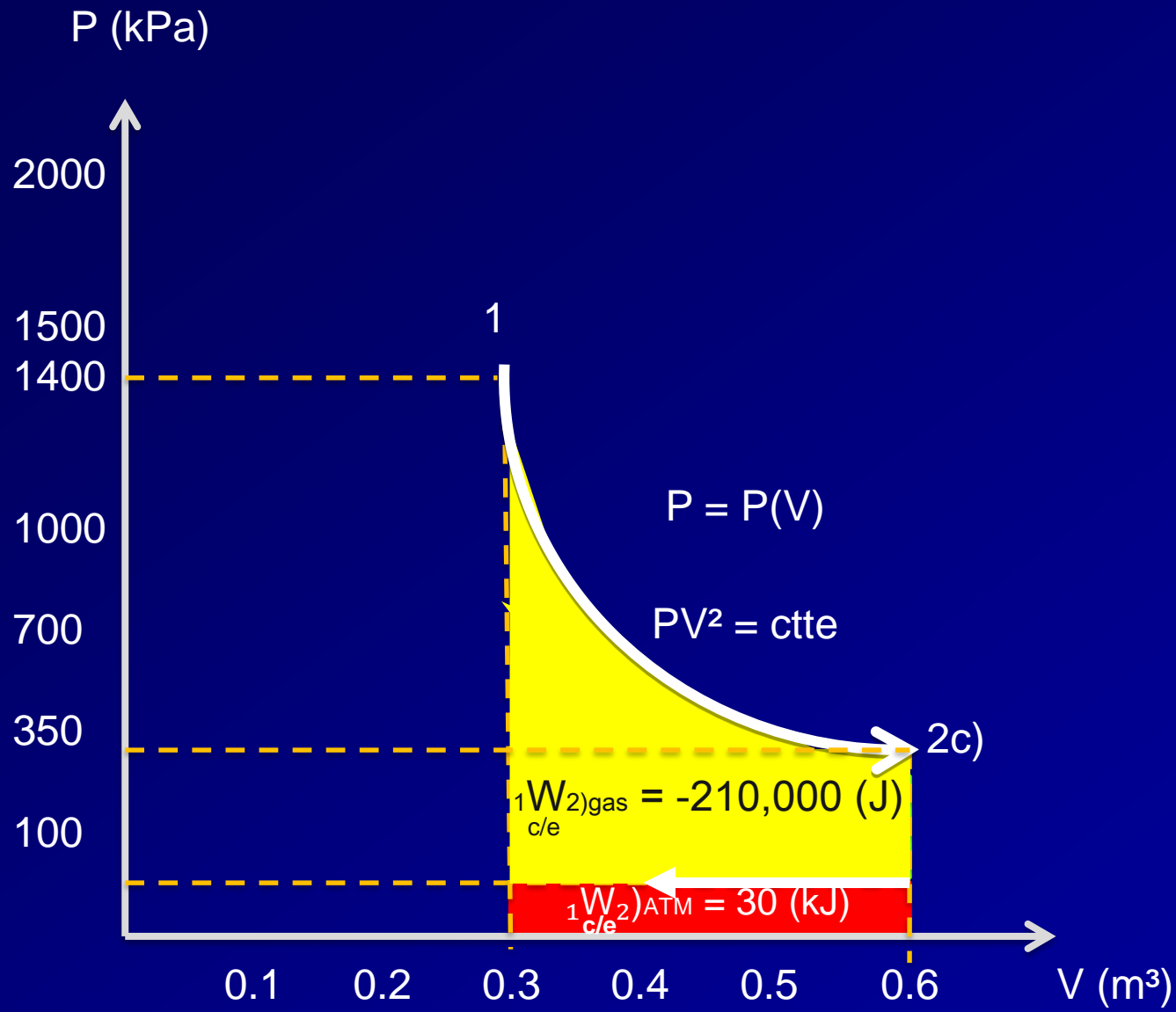
$$\frac{{}_1W_{2)_{\text{F}}}}{c/e} = -(-210,000) - 30,000 = 180,000 \text{ (J)}$$

Para graficar el proceso c)

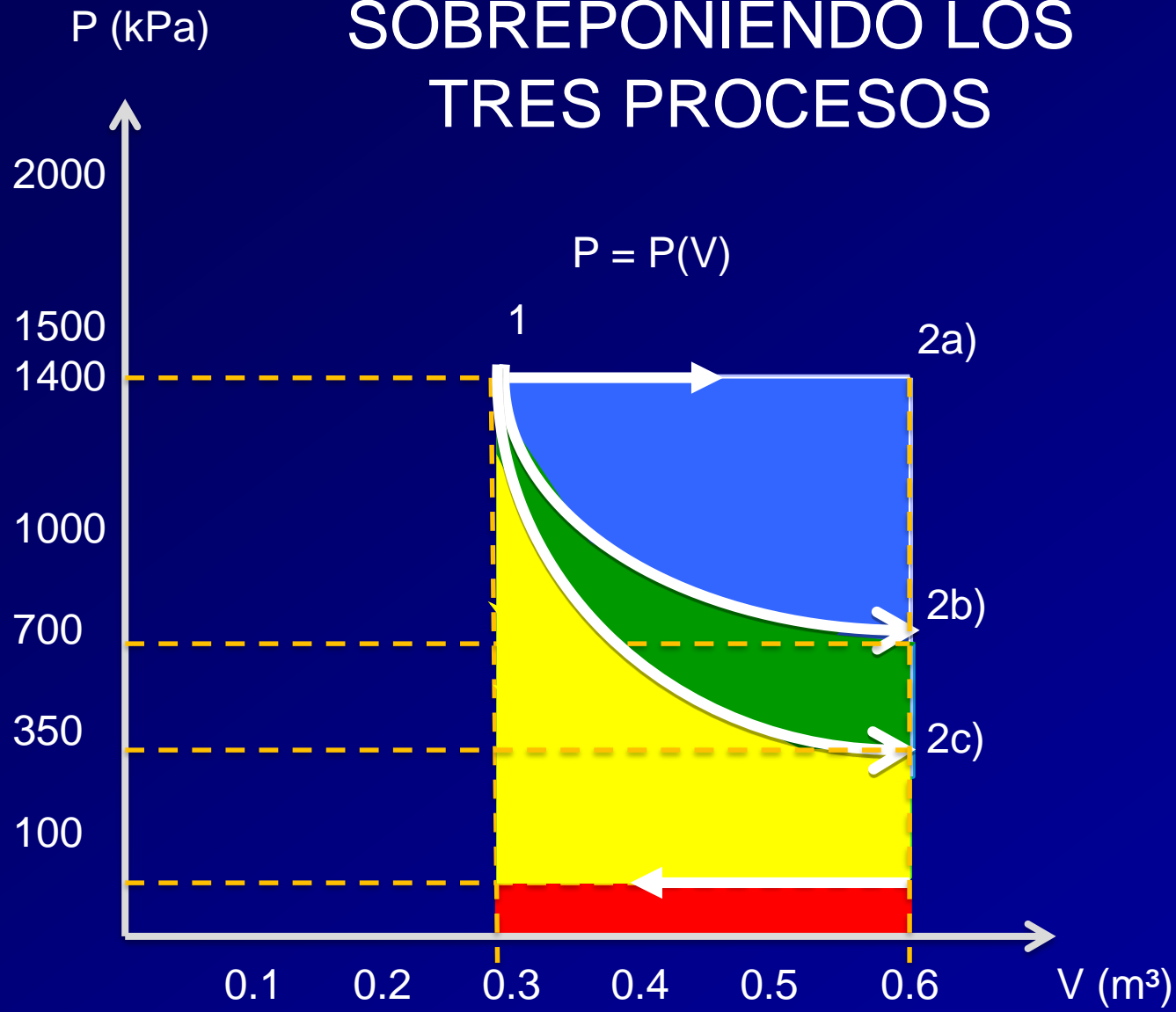
$$P_2 V_2^2 = P_1 V_1^2; \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

$$P_2 = (1,400)(0.5)^2 = 350 \text{ (kPa)}$$

c)



SOBREPONIENDO LOS TRES PROCESOS



PROCESO

Cuando hay transferencia de energía a un sistema termodinámico se presentan variaciones en las propiedades termodinámicas, de acuerdo a una relación o regla de comportamiento que define una trayectoria o proceso.

PROCESO. Es la sucesión de cambios de estado de la sustancia de trabajo de un sistema termodinámico debido a la transferencia de energía en forma de calor y/o de trabajo, dando como resultado que las propiedades termodinámi-

cas observen un comportamiento que se rige bajo una regla matemática que caracteriza la trayectoria del proceso que describe la sustancia de trabajo de un estado termodinámico inicial a otro final.

CICLO

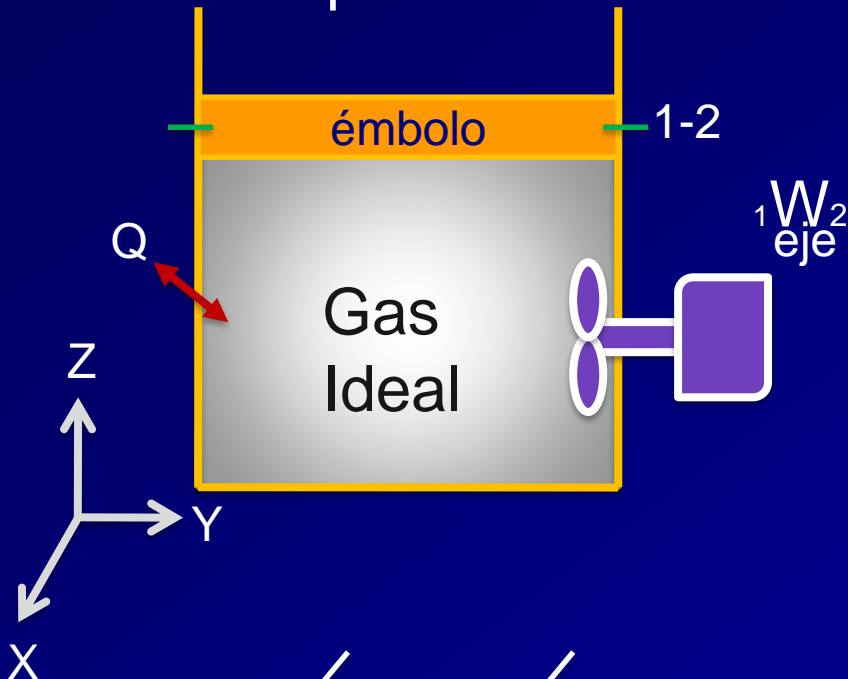
Si la sustancia de trabajo de un sistema termodinámico recibe y pierde energía con diferentes mecanismos de transferencia de calor y de trabajo, el sistema termodinámico realiza diversos procesos, con la característica de que el estado final del último proceso coincide con el es-

tado inicial del primero, se tiene un ciclo.

CICLO: Es la sucesión de procesos que describe una sustancia de trabajo de un sistema termodinámico, en el cual el estado termodinámico inicial del primer proceso es igual al estado termodinámico final del último proceso.

PROCESO A VOLUMEN CONSTANTE (ISOMÉTRICO O ISOCÓRICO ($V = \text{ctte}$))

El pistón no se
desplaza



$${}_1Q_2 + \underset{\text{c/e}}{{}_1W_2} + \underset{\text{eje}}{{}_1W_2} = U_2 - U_1$$

$$\underset{\text{c/e}}{{}_1W_2} = - \int_1^2 P dV = 0$$

$${}_1Q_2 + \underset{\text{eje}}{{}_1W_2} = U_2 - U_1 \text{ (J)}$$

$$\frac{P_1 \cancel{V}_1}{T_1} = \frac{P_2 \cancel{V}_2}{T_2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Aplicación de la 1ª Ley de la Termodinámica en sistemas cerrados

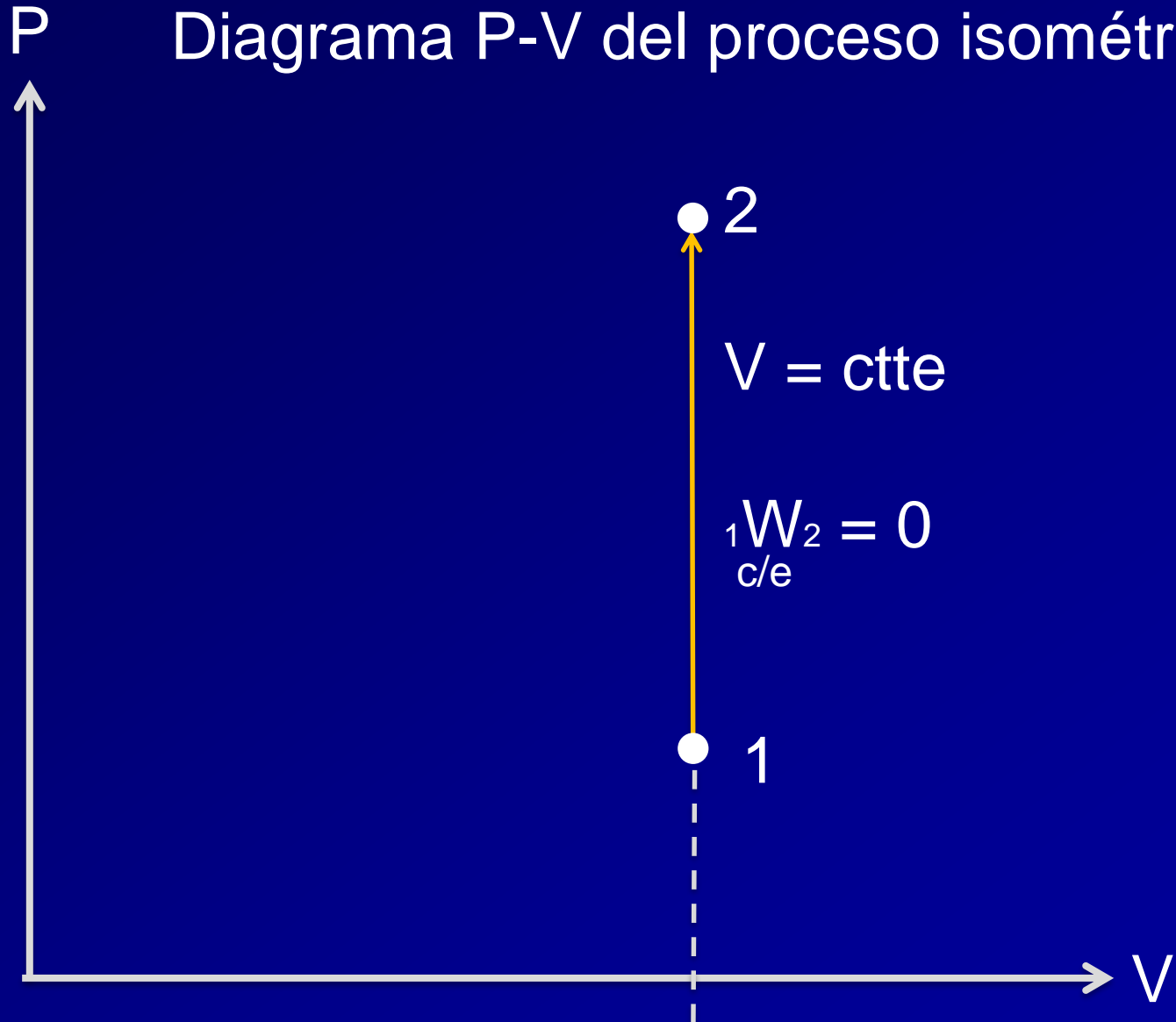
Ecuación

$${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E_{12})_{\text{SIST}} = \Delta \overset{0}{\cancel{E}}C_{12} + \Delta \overset{0}{\cancel{E}}P_{12} + \Delta U_{12}$$

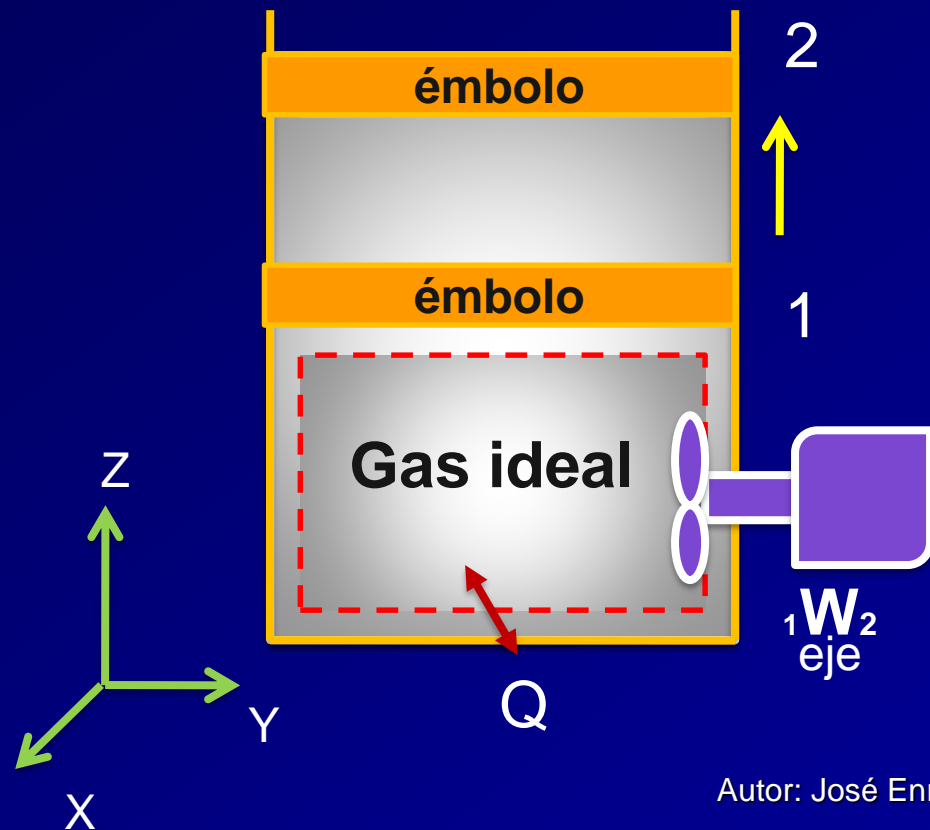
$${}_1W_2 = - \int P d\overset{0}{\cancel{V}} = 0$$

c/e

Diagrama P-V del proceso isométrico



PROCESO A PRESIÓN CONSTANTE. (ISOBÁRICO)



$$\delta Q + \delta W = dE)_{\text{sist.}}$$

$$dE)_{\text{sist.}} = dE^0_C + dE^0_P + dU$$

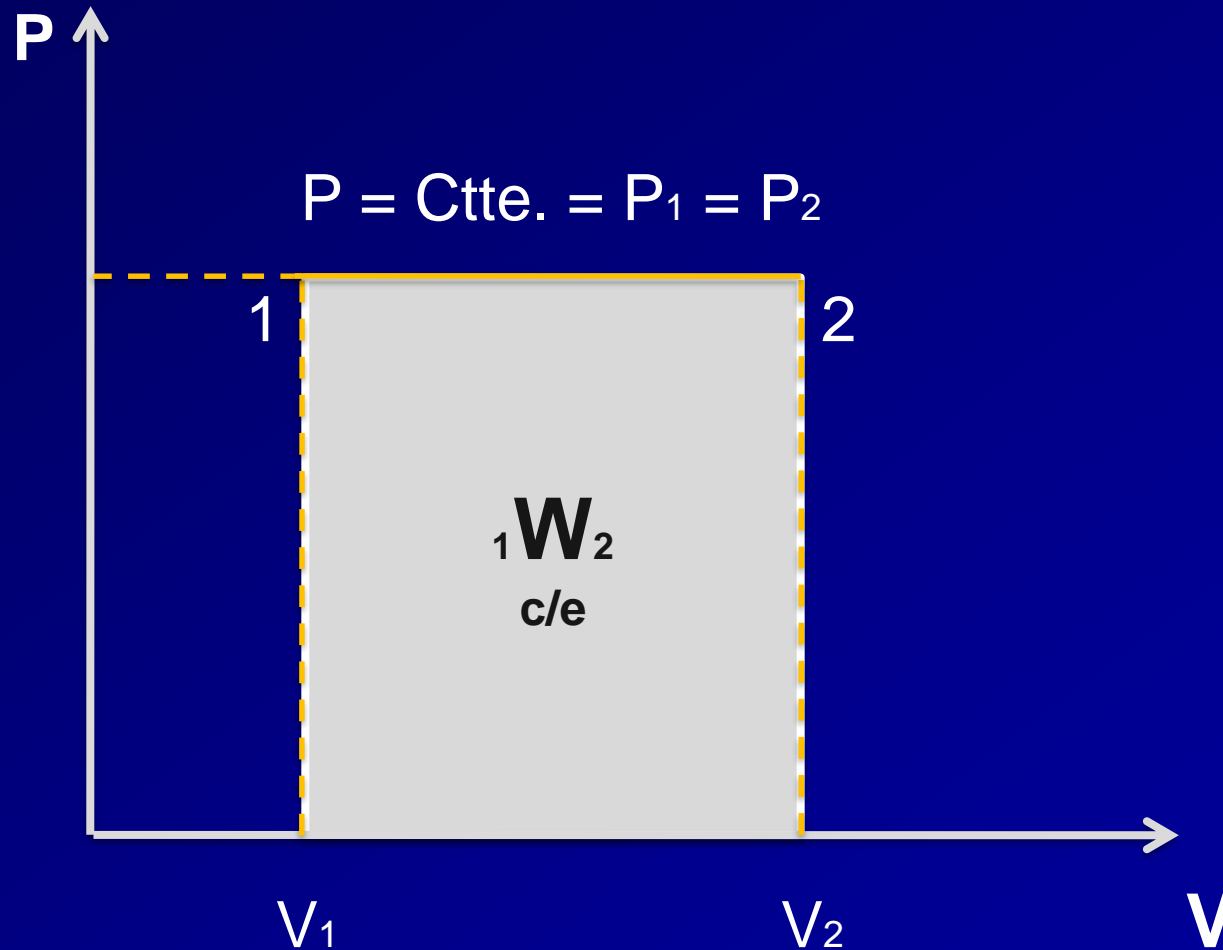
$$\delta Q + \delta W = dU \dots (1)$$

$$\text{Si } \delta W = \delta W_{\text{c/e}} + \delta W_{\text{eje}}$$

$$\delta W_{\text{c/e}} = -PdV \text{ integrando}$$

La integral : ${}_1W_2_{c/e} = - \int_1^2 PdV$ representa el

área bajo la curva en un diagrama P-V



De la ecuación

$$\int_1^2 \frac{dW}{c/e} = - \int_1^2 P dV$$

$${}_1W_2 = -P(V_2 - V_1) \text{ (J) } \dots(2)$$

Integrando la Ec. (1)

$$\int_1^2 dQ + \int_1^2 \frac{dW}{c/e} + \int_1^2 dW_{eje} = \int_1^2 dU$$

$${}_1Q_2 - P(V_2 - V_1) + W_{eje} = U_2 - U_1$$

$${}_1Q_2 + W_{eje} = U_2 - U_1 + P_2V_2 - P_1V_1 \text{ (J)}$$

Para simplificar, se sustituye $H = U + PV$

$${}_1Q_2 + {}_1W_{eje} = H_2 - H_1 \text{ (J)}$$

De la entalpía específica y de la ecuación del Gas Ideal:

$$h = u + Pv = u + RT;$$

Se observa que:

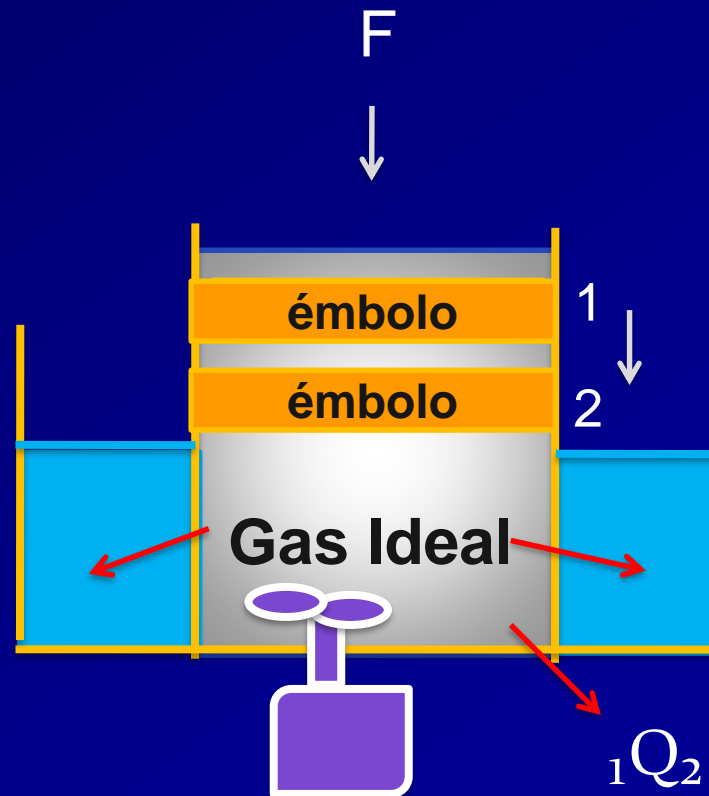
$$h = h(T)$$

$$\left. \begin{array}{l} P_1 V_1 = mRT_1 \\ P_2 V_2 = mRT_2 \end{array} \right\} \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = mR; \text{ ya que } P = \text{ctte.}$$

Por tanto:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

PROCESO A TEMPERATURA CONSTANTE (ISOTÉRMICO ($T = \text{ctte.}$))



Balance de Energía en el proceso a Temperatura Constante ($T = \text{ctte.}$)

$${}_1Q_2 + {}_1W_{\text{c/e}2} + {}_1W_{\text{eje}2} = U_2 - U_1 = 0 \text{ (J)... (1)}$$

Ya que, si $T = \text{ctte}$ y $U = U(T)$

(Ley de Joule)

$$U = \text{ctte} \dots U_2 - U_1 = 0$$

$${}_1W_{\text{c/e}2} = - \int_1^2 P dV ; \text{ su resolución requiere conocer la función de } P = P(V)$$

$${}^1W_2 = - \int_1^2 P dV; \quad P = P(V)$$

$$P_1V_1 = mRT_1 = mRT_2 = P_2V_2$$

$$PV = \text{ctte};$$

$$P = \frac{\text{ctte}}{V}$$

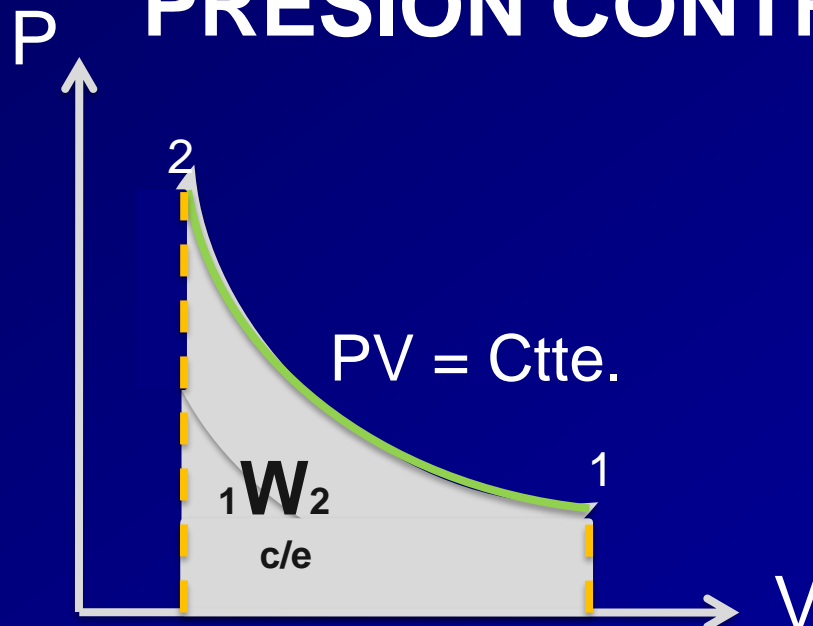
Sustituyendo en la ecuación del W

$${}^1W_2 = - \int_1^2 \frac{\text{ctte}}{V} dV = - \text{ctte} \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = -mRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$${}_1W_2 = - mRT \ln \frac{V_2}{V_1} = - P_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = - P_2V_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \text{ (J)}$$

c/e

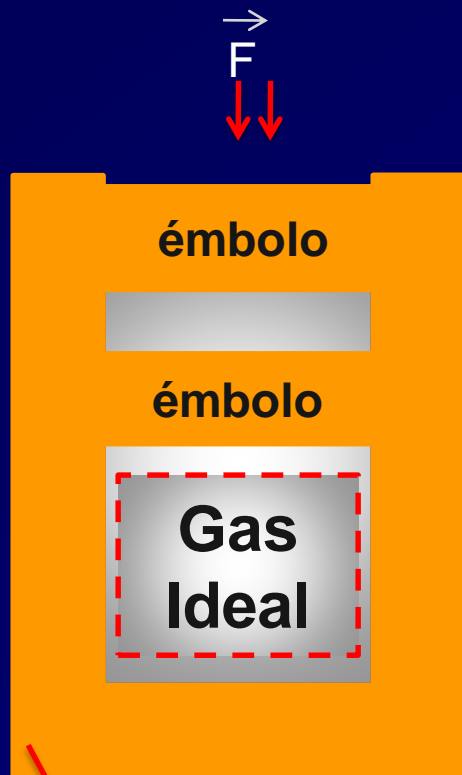
DIAGRAMA PRESIÓN CONTRA VOLUMEN



Autor: José Enrique Larios Canale

PROCESO ADIABÁTICO

$$({}_1Q_2 = 0)$$



Pared
adiabática

Proceso
cuasiestático

$$d\bar{s} \quad \cancel{dQ} + \underset{c/e}{dW} = dE = \cancel{dEC} + \cancel{dEP} + dU$$

$$\underset{c/e}{dW} = -PdV = dU = mc_v dT \dots (1)$$

Para resolver esta Ec. diferencial es necesario que «dT» esté en función de la presión y el volumen, para lo cual se empleará la Ecuación del Gas Ideal.

Diferenciando

$$PV = mRT \rightarrow PdV + VdP = mRdT$$

$$dT = \frac{PdV + VdP}{mR} = \frac{PdV + VdP}{m(c_p - c_v)}$$

Sustituyendo en la Ec. (1)

$$-PdV = \cancel{mc_v} \left(\frac{\cancel{PdV + VdP}}{\cancel{m(c_p - c_v)}} \right)$$

$$(-PdV)(c_p - c_v) = c_v(PdV + VdP)$$

$$-c_p P dV + c_v \cancel{P} dV = c_v \cancel{P} dV + c_v V dP$$

$$c_p P dV + c_v V dP = 0 = \frac{c_p \cancel{P} dV}{c_v \cancel{P} V} + \frac{c_v \cancel{V} dP}{c_v \cancel{P} V} = \frac{0}{c_v P V} = 0$$

Si definimos $c_p/c_v = k$ (índice adiabático)

$\frac{k dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$ resolviendo la ecuación diferencial

$\text{Ln } V^k + \text{Ln } P = \text{ctte} = \text{Ln } (P V^k)$; elevando a la “e”

$$P V^k = e^{\text{ctte.}} = \text{ctte}'$$

Relación de propiedades

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k ; \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1^k}{V_2^k} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$$

De la Segunda Ley de Charles

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1 T_2}{V_2 T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}$$

Así mismo:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2} \right) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-1}$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2} \right) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-k/k} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-k}{k}}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-k}{k}}$$

Balance de Energía

$${}_1W_{2 \text{ c/e}} + W_{\text{eje}} = \Delta U_{12} \text{ (J)}$$

ΔU_{12} Se evalúa por los tres métodos:

$${}_1W_{2 \text{ c/e}} = - \int_1^2 P dV; \quad \text{Si } PV^k = \text{ctte}; \quad P = \frac{\text{ctte}}{V^k}$$

Sustituyendo:

$${}_1W_2 \frac{c}{e} = - \int_1^2 \frac{ctte}{V^k} dV = - \int_1^2 ctte V^{-k} dV$$

$${}_1W_2 \frac{c}{e} = - ctte \left(\frac{V^{-k+1}}{-k+1} \right) \Bigg|_1^2 = -ctte \left(\frac{V_2^{-k+1} - V_1^{-k+1}}{-k+1} \right)$$

$${}_1W_{2 \frac{c}{e}} = \frac{P_2 V_2^k V_2^{-k+1} - P_1 V_1^k V_1^{-k+1}}{k - 1}$$

$${}_1W_{2 \frac{c}{e}} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1 \text{ (J)}}{k - 1}$$

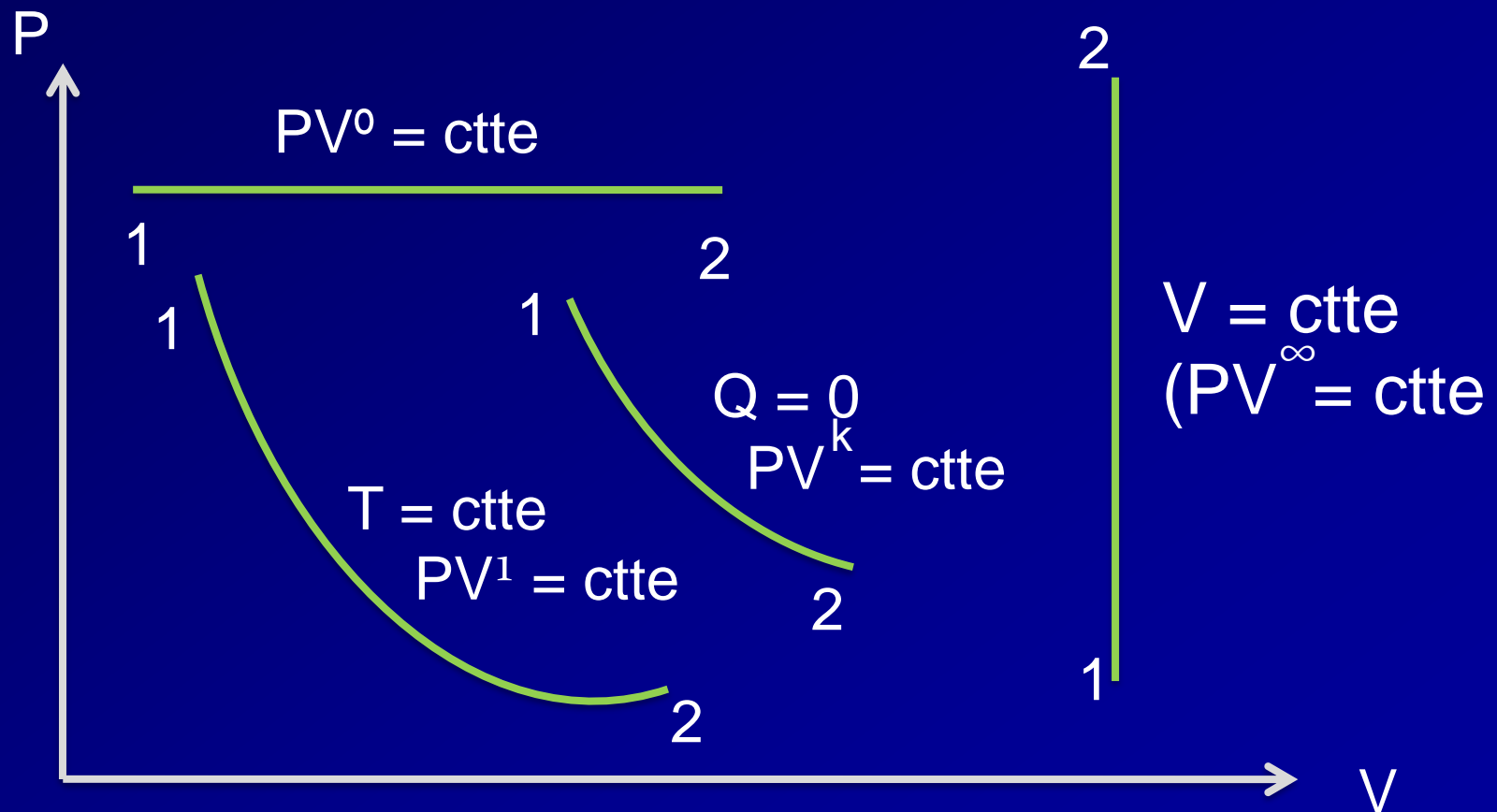
$${}_1W_{2 \frac{c}{e}} = \frac{mRT_2 - mRT_1}{k - 1}$$

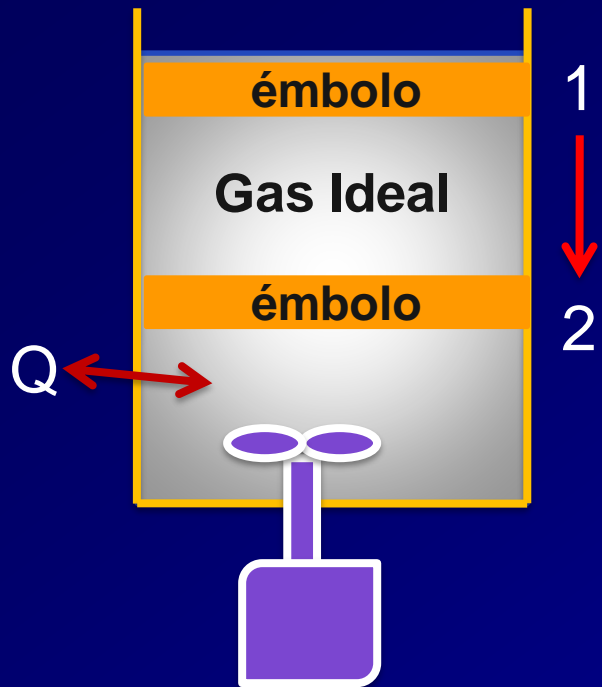
$${}_1W_{2 \frac{c}{e}} = \frac{mR (T_2 - T_1) \text{ (J)}}{k - 1}$$

PROCESO POLITRÓPICO

$$(PV^n = \text{ctte}; n \neq 0, 1, k, \infty)$$

Cualquier proceso diferente a los 4 anteriores





$${}_1Q_2 + \underset{c/e}{{}_1W_2} + \underset{eje}{W} = U_2 - U_1 \text{ (J)}$$

$$\underset{c/e}{{}_1W_2} = \int_1^2 P dV = - \int_1^2 \frac{ctte}{V^n} dV$$

$$= -ctte \int_1^2 V^{-n} dV = -ctte \left. \frac{V^{1-n}}{-n+1} \right|_1^2$$

$$= \frac{ctte (V_2^{1-n} - V_1^{1-n})}{n-1}$$

$$= \frac{P_2 V_2^n V_2^{1-n} - P_1 V_1^n V_1^{1-n}}{n-1}$$

$${}_1W_{2\text{c/e}} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{n-1} \text{ (J)}$$

$${}_1Q_2 + {}_1W_{2\text{eje}} = U_2 - U_1 - \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{n-1} \text{ (J)}$$

RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n ; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-n}{n}} = \frac{T_1}{T_2}$$

APÉNDICE

Sistema Internacional de Unidades

Estructura conceptual de un sistema de unidades.

Expresión de una dimensión derivada de una propiedad física dependiente.

Axiomas del análisis dimensional.

Sistema Internacional de Unidades (SI).

Definición de las unidades fundamentales del SI.

Nomenclatura y simbología de las unidades fundamentales.

Nomenclatura y simbología de las unidades derivadas.

Nomenclatura y simbología de las unidades suplementarias.

Prefijos para formar múltiplos y submúltiplos de las unidades del SI.

ESTRUCTURA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE UNIDADES

Cualquier sistema de unidades está estructurado a partir de la definición arbitraria y convencional de unidades de medida de propiedades físicas independientes y de la definición de sus correspondientes dimensiones fundamentales.

Si se relacionan estas propiedades físicas independientes mediante conceptos, principios y leyes de la Física, se obtienen las unidades y dimensiones derivadas. A continuación se definen los conceptos sobre los cuales se estructura un sistema de unidades.

UNIDADES FUNDAMENTALES “X”. A las unidades de las propiedades físicas independientes que se les denomina fundamentales son elegidas arbitraria y convencionalmente para estructurar un sistema de unidades.

A las unidades fundamentales se les simboliza con la letra “X” y son las unidades de medición definidas arbitrariamente para cuantificar la magnitud de propiedades físicas independientes. Por tanto, las unidades fundamentales son independientes entre sí.

UNIDAD DE MEDICIÓN FUNDAMENTAL. Se define unidad de medición “X” de una propiedad física independiente “x”, a la magnitud o valor de una propiedad física elegida convencionalmente con el mismo significado físico de la propiedad que por comparación se desea medir.

DIMENSIÓN FUNDAMENTAL. También llamada básica o primaria se denota con una letra mayúscula y expresa el aspecto cualitativo de la propiedad física independiente y la unidad que la define que, junto con el resto de las unidades fundamentales, estructuran el sistema de unidades.

UNIDADES DERIVADAS “Y”. Las unidades derivadas “Y” de un sistema de unidades son todas aquellas que se definen a partir de las unidades fundamentales de dicho sistema, relacionándolas mediante los conceptos, principios y leyes de la Física.

DIMENSIÓN DERIVADA. También llamada secundaria, se denota con una letra mayúscula y expresa el aspecto cualitativo de la propiedad física dependiente y la unidad que la define está asociada con las unidades fundamentales mediante conceptos, principios o leyes de la Física.

EXPRESIÓN DE UNA DIMENSIÓN DERIVADA DE UNA PROPIEDAD FÍSICA DEPENDIENTE

La expresión dimensional de una cantidad o variable física dependiente está dada por la relación matemática que existe entre las unidades fundamentales del sistema de unidades utilizado, lo cual define la unidad de medición de dicha cantidad física.

La expresión dimensional de una propiedad derivada «Y» tiene la forma de un polinomio de potencias:

$$Y = (X_1)^{a_1} (X_2)^{a_2} (X_3)^{a_3} \dots (X_n)^{a_n}$$

En donde $X_1, X_2, X_3, \dots X_n$ representan las dimensiones fundamentales de las propiedades físicas independientes involucradas en el modelo matemático del concepto, principio o ley de la Física que define la propiedad dependiente «Y».

Los términos $a_1, a_2, a_3, \dots a_n$ son las potencias a las cuales se encuentran elevadas las dimensiones independientes, que generalmente se les denomina dimensiones fundamentales. La dimensión «Y» al ser obtenida a partir de la relación funcional de dimensiones fundamentales se le denomina dimensión derivada.

AXIOMAS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL

1. El valor numérico de una cantidad física es igual a dicha cantidad física dividida entre su correspondiente unidad de medición.
2. La magnitud real de la cantidad física medida es independiente de las unidades en que se mida.
3. El modelo matemático que representa a un fenómeno físico deberá cumplirse independientemente de las unidades del sistema de unidades empleado.

Se tienen en uso hasta once sistemas de medición que por su estructuración se dividen en tres tipos: absolutos, técnicos y gravitacionales.

En estas notas se empleará el Sistema Internacional de Unidades (SI) que se generó a partir del Sistema MKS Absoluto y se adoptó por casi todos los países del mundo.

México es uno de los países que adoptó el Sistema Internacional de Unidades y en consecuencia en la Facultad de Ingeniería de la UNAM es el que se utiliza en la resolución de problemas.

SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

El Sistema Internacional de Unidades (SI) fue adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) en el año de 1960 y por casi todos los países del mundo.

El Sistema Internacional de Unidades es un conjunto de unidades de diferente especie cuya cualidad más importante es la coherencia y la simplicidad en la estructura conceptual de sus unidades y dimensiones.

La coherencia y homogeneidad del SI radica en que no tiene constantes o coeficientes de transformación o convertir unidades de diferente magnitud física dentro del propio Sistema Internacional de Unidades.

A continuación se definen las unidades fundamentales del Sistema Internacional de Unidades.

DEFINICIÓN DE LAS UNIDADES FUNDAMENTALES DEL SI

KILOGRAMO (kg): Es la unidad de masa y queda definida como la masa patrón de platino iridio conservado por el Buró Internacional de Pesas y Medidas en Sevres, Francia y fue aprobada por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) [1ª y 3ª 1889 y 1901].

METRO (m): Es la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo [17ª. CGPM (1983) Resolución 1].

SEGUNDO (s): Es la unidad de tiempo y queda definida por el lapso de tiempo necesario para que sucedan 9,192,631.770 periodos de la radiación correspondiente (ciclos) de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio 133. De esta manera fue definido el segundo en la 13^a Conferencia General de Pesas y Medidas efectuada en 1967 (Resolución 1).

KELVIN (K): Es la unidad de temperatura termodinámica y corresponde a la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. Aprobada por la 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1967 (Resolución 4).

AMPERE (A): Unidad de corriente eléctrica que corresponde a la cantidad de corriente constante que cuando se mantiene circulando por dos alambres conductores rectos y paralelos, de longitud infinitamente grande comparada con su sección transversal, separados por cada metro y el vacío, entre ellos se ejerce una fuerza de

2×10^{-7} Newton por cada metro de longitud de alambre conductor. Así fue aprobada por la 9ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1948 (Resolución 2).

CANDELA (cd): Queda definida como la cantidad de intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia de 540×10^{12} Hertz y cuya intensidad energética en esa dirección es $1/683$ (Watt) por esterradian [16ª CGPM (1979), Resolución 3].

MOLE (mol): Es la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales (partículas, átomos, moléculas, etc.) como átomos existentes en una muestra de 0.012 (kg) de carbono 12. Aprobadas en la 14^a Conferencia General de Pesas y Medidas (1971), Resolución 3.

Toda medición física puede expresarse con base a estas unidades o bien en sus múltiplos o submúltiplos, cuyos prefijos simplifican la expresión de la cantidad o valor de la propiedad física. A continuación se muestran las tablas con la información de las unidades del SI.

NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA DE LAS UNIDADES FUNDAMENTALES

CANTIDAD FÍSICA	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA DIMENSIÓN
Longitud	metro	m	L
Masa	kilogramo	kg	M
Tiempo	segundo	s	T
Intensidad de corriente eléctrica	Ampere	A	I

CANTIDAD FÍSICA	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA DIMENSIÓN
Temperatura termodinámica	Kelvin	K	Θ
Intensidad luminosa	candela	cd	I_L
Cantidad de sustancia	mole	mol	N

NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA DE LAS UNIDADES DERIVADAS

CANTIDAD FÍSICA	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD	DEFINICIÓN DE LA UNIDAD
Energía	Joule	J	$\text{Kg m}^2 \text{s}^{-2}$
Fuerza	Newton	N	Kg m s^{-2}
Potencia	Watt	W	$\text{Kg m}^2 \text{s}^{-3}$
Carga eléctrica	Coulomb	C	A s
Diferencia de potencial eléctrico	Volt	V	$\text{Kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-1}$
Resistencia eléctrica	Ohm	Ω	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-2}$
Capacitancia	Faraday	F	$\text{Kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^4 \text{A}^2$
Flujo magnético	Weber	Wb	$\text{Kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{A}^{-1}$
Inductancia	Henry	H	$\text{Kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{A}^{-2}$

CANTIDAD FÍSICA	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD	DEFINICIÓN DE LA UNIDAD
Densidad de flujo magnético	Tesla	T	$\text{Kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}$
Flujo luminoso	Lumen	lm	cd sr
Luminosidad	Lux	lx	cd sr m^{-2}
Frecuencia	Hertz	Hz	s^{-1}
Temperatura de uso común	grados centígrados	$^{\circ}\text{C}$	$\Theta/^{\circ}\text{C}$
Presión	Pascal	Pa	$\text{Kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$

NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA DE LAS UNIDADES SUPLEMENTARIAS

La estructura del Sistema Internacional considera dos tipos de unidades llamadas suplementarias y que sirven para la toma de medidas angulares, estas son:

CANTIDAD FÍSICA	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD	DEFINICIÓN DE LA UNIDAD
Ángulo plano	Radián	rad	$m \cdot m^{-1}$
Ángulo sólido	Esterradián	sr	$m^2 \cdot m^{-2}$

Prefijos para formar múltiplos y submúltiplos de las unidades del SI

PRE-FIJO	SÍM-BOLO	Factor por el que debe multiplicarse la unidad	Notación Exponencial
yotta	Y	1,000,000,000,000,000,000,000,000	10^{24}
zetta	Z	1,000,000,000,000,000,000,000	10^{21}
exa	E	1,000,000,000,000,000,000	10^{18}
peta	P	1,000,000,000,000,000	10^{15}
tera	T	1,000,000,000,000	10^{12}
giga	G	1,000,000,000	10^9
mega	M	1,000,000	10^6
kilo	k	1,000	10^3
hecto	h	100	10^2
deca	da	10	10^1
deci	d	0.1	10^{-1}
centi	c	0.01	10^{-2}
mili	m	0.001	10^{-3}

PRE-FIJO	SÍM-BOLO	Factor por el que debe multiplicarse la unidad	Notación Exponencial
micro	μ	0.000,001	10^{-6}
nano	n	0.000,000,001	10^{-9}
pico	p	0.000,000,000,001	10^{-12}
femto	f	0.000,000,000,000,001	10^{-15}
atto	a	0.000,000,000,000,000,001	10^{-18}
zepto	z	0.000,000,000,000,000,000,001	10^{-21}
yocto	y	0.000,000,000,000,000,000,000,001	10^{-24}

A continuación se conceptualizan algunas propiedades físicas que están relacionadas con el estudio de la Mecánica de Fluidos y la Termodinámica como son: el concepto de presión, fuerza, masa, densidad, densidad relativa y peso específico.