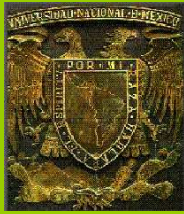
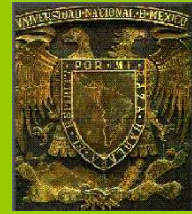


*FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN*



*UNAM*

*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA*

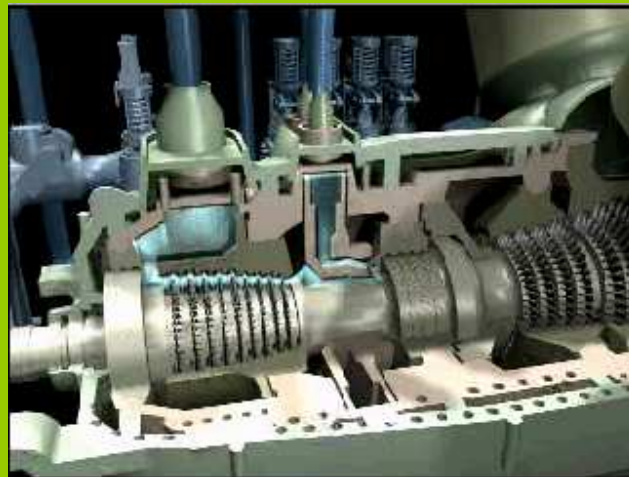


*LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS*

---

---

***LABORATORIO DE TERMODINÁMICA***



---

---

***M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.***

# ÍNDICE

	<b>Pag.</b>
INTRODUCCIÓN.....	1
1. HISTORIA DE LA TERMODINÁMICA Y DE LOS SISTEMAS DE UNIDADES. ...	3
2. VARIABLES Y MEDICIONES EN UN SISTEMA TERMODINÁMICO.....	9
3. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS.....	12
4. PRESIÓN Y LEY DE LOS GASES .....	17
5. LEY DE JOULE .....	23
6. LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA .....	28
7. CARTA PSICROMÉTRICA .....	33
8. CALOR LATENTE Y CALOR SENSIBLE .....	42
9. COMBUSTIÓN .....	45
10. USO DE LAS TABLAS DE VAPOR Y DIAGRAMA DE MOLLIER .....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	61

## INTRODUCCIÓN

Si se busca una definición sencilla de termodinámica se puede encontrar que la termodinámica es la rama de la física que estudia la energía, la transformación entre sus distintas manifestaciones, como el calor, y su capacidad para producir un trabajo. La termodinámica está íntimamente relacionada con la mecánica estadística, de la cual se pueden derivar numerosas relaciones termodinámicas. Es importante tener en mente que la termodinámica estudia los sistemas físicos a nivel macroscópico, mientras que la mecánica estadística suele hacer una descripción microscópica de los mismos.

Debe quedar claro que la termodinámica es una ciencia y, quizá la herramienta más importante en la ingeniería, ya que se encarga de describir los procesos que implican cambios en temperatura, la transformación de la energía, y las relaciones entre el calor y el trabajo.

La termodinámica es una ciencia factual que se encarga de estudiar hechos o acontecimientos auxiliándose de la observación y la experimentación por lo que tiene que apelar al examen de la evidencia empírica para comprobarlos.

Así, la termodinámica puede ser vista como la generalización de una enorme cantidad de evidencia empírica.

Esta ciencia es extremadamente general: no hay hipótesis hechas referentes a la estructura y al tipo de materia de la cual nos ocupamos. Tal vez una de las razones por las que la termodinámica es tan difícil de estudiar sea que la teoría empleada para describir los fenómenos es muy general y que puede ser aplicable a sistemas de estructura muy elaborada con todas las formas de propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas complejas.

En el estudio termodinámico es común idealizar los sistemas para que sus propiedades mecánicas y eléctricas sean lo más triviales posibles. Cuando el contenido esencial de la termodinámica se ha desarrollado, es una cuestión simple extender el análisis a sistemas con estructuras mecánicas y eléctricas relativamente complejas. La cuestión esencial es señalar que las restricciones en los tipos de sistemas considerados no son limitaciones básicas sobre la generalidad de la teoría termodinámica, y sólo se adoptan meramente para la simplificación expositiva.

Quizá la complicación principal del análisis termodinámico como herramienta en ingeniería se deba a que es práctica común restringir los estudios a sistemas simples, definidos como sistemas que son macroscópicamente homogéneos, isotrópicos, y desprovistos de carga eléctrica, que son lo suficientemente grandes para que los efectos de frontera puedan ser ignorados, y que no se encuentran bajo la acción de campos eléctricos, magnéticos o gravitacionales. Nada más lejos de la realidad.

**Nota:**

Adaptado de: **Notas del curso termodinámica para ingeniería** de Oscar A. Jaramillo Salgado  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO Centro de Investigación en Energía,  
Temixco Morelos.

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 1

### HISTORIA DE LA TERMODINÁMICA Y DE LOS SISTEMAS DE UNIDADES.

#### **Objetivo:**

Conocer la historia de la termodinámica y de los sistemas de unidades.

#### **Introducción:**

Termodinámica es la rama de la Física que estudia los cambios de magnitudes de los sistemas a nivel macroscópico. Estudiando generalmente los cambios de temperatura, presión y volumen.

#### **Historia**

El hombre es capaz de modificar el medio ambiente que lo rodea, mediante conocimientos y energía. Con el tiempo el hombre aprendió que mucho de los fenómenos de su interés, se repetían con regularidad en el tiempo y espacio, y la falta de entendimiento de estos fenómenos y la necesidad de adaptarse a las circunstancias, dio origen a la búsqueda de respuestas, para sacar provecho y beneficio de dichos fenómenos, empezando a diseñar herramientas sólidas que le permitiesen el uso más eficiente de su fuerza física, a utilizar a favor la fuerza de los animales, y descubriendo métodos para encender fuego, por medio de procedimientos para su mantenimiento y control. Se tienen indicios de que el hombre (aproximadamente 3500 a.C.) utilizaba el fuego para fundir metales como cobre estaño y hierro, para su defensa y podíamos decir que este era un principio de lo que más adelante se llamaría Termodinámica.

Un momento culminante donde se trató de generalizar los conocimientos, fue en la antigua Grecia del siglo V a.C. mediante la especulación filosófica, perdurando aproximadamente 2 milenios, hasta el Renacimiento en el siglo XV.



*Figura 1.1. Eolípila de Herón de Alejandría*

Para intentar hablar de cómo surgió la Termodinámica como un gran campo de estudio, se debería partir de la revolución científica que tuvo lugar en el Siglo XVI con la llegada de la filosofía experimentalista, dando un desarrollo a las ciencias existentes hasta nuestros días.

Como muchas disciplinas la Termodinámica ha surgido de los procedimientos, que llevaron a la construcción de elementos que son útiles en el desarrollo de la vida del hombre.

El origen fue sin lugar a dudas, el querer utilizar el movimiento producido por la energía del vapor de agua, para poder sustituir el trabajo manual, por una máquina que facilitaba su realización haciéndolo más fácil y con mayor rapidez, pegándole directamente a la economía, lo que le dio que se profundizarán en conocimientos, realizando leyes y principios que regían las operaciones realizadas con el vapor, para actividades como succionar agua de una mina, con rendimientos insignificantes, hoy se trata de lograr las máximas potencias con un mínimo de contaminación y un máximo de economía.

Los orígenes de la Termodinámica nacen de la experiencia y de hallazgos casuales que se fueron perfeccionando con el paso del tiempo. Históricamente se cuenta que en 1629 Giovanni Branca diseñó una máquina capaz de realizar un movimiento en base al impulso que producía sobre una rueda el vapor que salía por un caño.

La primera aplicación del trabajo mediante la fuerza del vapor se encuentra en la máquina de fuego de Savery, que consistía en un cilindro mediante una cañería a la fuente de agua que se deseaba bombear, el cilindro se llenaba de vapor de agua, se cerraba la llave de ingreso y luego se enfriaba, cuando el vapor se condensaba se producía un vacío que permitía el ascenso del agua.

Otra máquina que tenía más elementos móviles, es la llamada máquina de vapor de Thomas Newcomen construida en 1792, ésta innovación consistió en un cilindro vacío para mover un pistón que a su vez proveía movimiento a un brazo de palanca que actuaba sobre una bomba de las llamadas aspirante-impelente. La máquina de Newcomen fue perfeccionada por un Ingeniero inglés llamado John Smeaton, pero aún no se sabía cómo medir las magnitudes presentes en los procesos del funcionamiento de la máquina de vapor y su cuantificación, que fue introducida más adelante por James Watt. Watt se propuso a estudiar la magnitud del calor puesto en el funcionamiento de la máquina que permitiría estudiar su rendimiento, sus estudios lo llevaron a encontrar que la máquina de Newcomen solo utilizaba el 33% del vapor consumido para realizar el trabajo. Los aportes de Watt son muchos, todos ellos apuntaron al logro de un mayor rendimiento, inventó el prensaestopa que mantiene la presión mientras se mueve el vástago del pistón, introdujo la bomba de vacío, en 1769 patentó la máquina de efecto doble, creó el manómetro para medir la presión del vapor y un indicador que podía dibujar la evolución presión-volumen del vapor en el cilindro a lo largo de un ciclo. Con el objetivo de establecer una medida de la potencia, realizó experiencias para definir el llamado caballo de fuerza, determinó que un caballo podía desarrollar una potencia equivalente a levantar 76kg a la altura de un metro en un segundo.

En 1819 Robert Fulton puso en funcionamiento el primer barco de vapor de éxito comercial, el Clermont, que solo instaló una máquina de vapor en un barco. El Britannia fue el primer barco de vapor inglés, que entro en uso en 1840, desplazaba 1150 toneladas y contaba con una máquina de 740 caballos de fuerza, alimentada por 4 calderas, alcanzando una velocidad de 14km/h.

George Stephenson fue el primero en instalar una máquina de vapor sobre un vehículo terrestre dando inicio a la era del ferrocarril, en 1814 logró arrastrar una carga de 30 toneladas en una pendiente. En 1829 la locomotora llamada Rocket recorrió 19km en 53 minutos, siendo todo un record.

Sadi Carnot es el fundador de la Termodinámica como disciplina teórica, realizando trabajos que después de 25 años con el físico Lord Kelvin tomó en cuenta las propuestas hechas por él. Carnot fue el que desarrollo el concepto de proceso cíclico de las máquinas de vapor y que todo dependía de dejar caer calor desde una fuente de alta temperatura hasta un depósito a baja

temperatura. Posteriormente Clausius y Kelvin fundadores de Termodinámica teórica, ubicando el principio de Carnot, dando lugar al segundo principio de la Termodinámica.

James Prescott Joule se convenció rápidamente que el trabajo y el calor eran manifestaciones de una misma cosa. A partir de sus investigaciones comenzó a debilitar la teoría del calórico, en especial a los trabajos de Lord Kelvin quien junto a Clausius terminaron de establecer las bases teóricas de la termodinámica como disciplina independiente. En el año 1850 Clausius descubrió la existencia de la entropía y enunció el segundo principio:

*Es imposible que una máquina térmica que actúa por sí sola sin recibir ayuda de ningún agente externo, transporte calor de un cuerpo a otro que está a mayor temperatura.*

En 1851 Lord Kelvin publicó un trabajo en el que compatibilizaba los estudios de Carnot, basados en el calórico, con las conclusiones de Joule, el calor es una forma de energía, compartió las investigaciones de Clausius y reclamó para sí el postulado del primer principio que enunciaba así:

*Es imposible obtener, por medio de agentes materiales inanimados, efectos mecánicos de cualquier porción de materia enfriándola a una temperatura inferior a la de los objetos que la rodean.*

Lord Kelvin también estableció un principio que actualmente se conoce como el primer principio de la termodinámica. Y junto a Clausius derrotaron la teoría del calórico.

Hoy se ha llegado a un interesante perfeccionamiento de las máquinas térmicas, sobre una teoría basada en las investigaciones de Clausius, Kelvin y Carnot, cuyos principios están todavía en vigencia, la variedad de máquinas térmicas va desde las grandes calderas de las centrales nucleares hasta los motores cohete que impulsan los satélites artificiales, pasando por el motor de explosión, las turbinas de gas, las turbinas de vapor y los motores de retropropulsión, etc.

### **Sistemas de unidades:**

Es un conjunto de unidades de medida, del cual se derivan las demás medidas de unidades.

Existen varios sistemas de unidades:

- Sistema Internacional de Unidades o SI : es el sistema más usado, sus unidades básicas son :
  - El metro
  - El kilogramo



- El segundo
- El ampere
- El Kelvin
- La candela
- El mol

El Sistema Internacional ha adoptado una serie de prefijos para manejar la información de una manera más eficaz. Siendo múltiplos y submúltiplos:

Prefijo	Símbolo	Valor Numérico	Prefijo	Símbolo	Valor Numérico
<b>Tera</b>	<b>T</b>	$10^{12}$	deci	d	$10^{-1}$
<b>Giga</b>	<b>G</b>	$10^9$	centi	c	$10^{-2}$
<b>Mega</b>	<b>M</b>	$10^6$	mili	m	$10^{-3}$
<b>Kilo</b>	<b>K</b>	$10^3$	micro	$\mu$	$10^{-6}$
<b>Hecto</b>	<b>H</b>	$10^2$	nano	n	$10^{-9}$
<b>Deca</b>	<b>D</b>	$10^1$	pico	p	$10^{-12}$

### CUESTIONARIO.

1.- Efectué las siguientes conversiones:

a) 242 lb a miligramos b)  $68.3 \text{ cm}^3$  a litros.

2.- ¿Cuántos minutos tarda en llegar la luz del sol a la tierra? La distancia del sol a la tierra es de 93 millones de millas y sabemos que la velocidad de la luz es de 300000 km/s

3.- El contenido “normal” de plomo en la sangre humana es de aproximadamente 0.40 partes por millón (es decir, 0.40 g de plomo por millón de gramos de sangre) Un valor de 0.80 partes por millón (ppm) se considera peligroso. ¿Cuántos g de plomo están contenidos en 6000 g de sangre (la cantidad en un adulto promedio) si el contenido de plomo es de 0.62ppm

4.- Un trozo de plata metálica que pesa 194.3 gramos se coloca en una probeta que contiene 242.0 ml de agua. La lectura en la probeta es ahora de 260.5 ml. Calcule la densidad de la lata con esos datos.

5.- Una hoja de papel aluminio de  $1.0 \text{ pies}^2$  y una masa de 3.636 g ¿Cuál es el espesor del papel en mm?

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 2

### VARIABLES Y MEDICIONES EN UN SISTEMA

### TERMODINÁMICO

#### **Objetivo:**

- Conocer las variables más importantes involucradas en un proceso, sistema o equipo.
- Una vez identificada la variable, seleccionar el instrumento primario de medición
- Censar y medir la variable, conociendo el principio de operación del instrumento

#### **Introducción:**

Un sistema termodinámico es una parte del Universo que se aísla para su estudio. El sistema termodinámico es parte de la tierra, se da en el agua, en el viento y en las reacciones físicas y químicas, por eso se dice que es un sistema universal, porque se da en todos lados, es globalmente proporcional.

Este aislamiento se puede llevar a cabo de una manera real, en el campo experimental, o de una manera ideal, cuando se trata de abordar un estudio teórico.

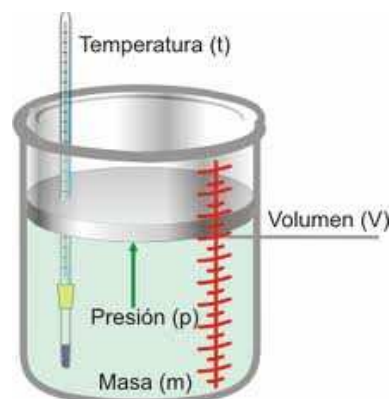
- *Un sistema abierto:* es cuando existe un intercambio de masa y de energía con los alrededores.
- *Un sistema cerrado:* es cuando no existe un intercambio de masa con el medio circundante, solo se puede dar un intercambio de energía.
- *Un sistema aislado:* es cuando no existe el intercambio ni de masa y energía con los alrededores.



Un instrumento de medición es un aparato que se usa para comparar magnitudes físicas mediante un proceso de medición. Como unidades de medida se utilizan objetos y sucesos previamente establecidos como estándares o patrones y de la medición resulta un número que es la relación entre el objeto de estudio y la unidad de referencia. Los instrumentos de medición son el medio por el que se hace esta conversión.

Dos características importantes de un instrumento de medida son la precisión y la sensibilidad.

Los físicos utilizan una gran variedad de instrumentos para llevar a cabo sus mediciones. Desde objetos sencillos como reglas y cronómetros hasta microscopios electrónicos y aceleradores de partículas



### CUESTIONARIO.

- 1.- Diga cuáles son las variables más importantes en un proceso físico-químico.
- 2.- ¿Cuáles son los principales tipos de manómetros?
- 3.- Explique el principio de funcionamiento del manómetro en U o de columna líquida.
- 4.- Con ayuda de un esquema muestre las principales partes de un manómetro de Bourdon
- 5.- Mencione los principales tipos de termómetros
- 6.- Mencione los principales tipos de medidores de nivel
- 7.- Mencione los medidores de flujo más usuales y su principio de funcionamiento
- 8.- ¿En que consiste el análisis Orsat?
- 9.- ¿Para qué sirve un tacómetro?
- 10.- Si la presión barométrica es de 950 mbar, determine la presión absoluta en bars para cada uno de los casos siguientes:
  - a) Presión de vacío igual a 12 cm de Hg
  - b) Presión manométrica igual a 10 bar
  - c) Presión absoluta de 5 cm de Hg.
  - d) Presión de vacío de 20 cm de H<sub>2</sub>O

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 3

### PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

#### Objetivo:

- Determinar algunas propiedades termodinámicas (densidad, viscosidad)
- Analizar los métodos para determinarlas
- Entender cuales son variables intensivas y variables extensivas

#### Introducción:

Las variables termodinámicas se pueden clasificar en extensivas e intensivas. Las variables extensivas se caracterizan por su aditividad, en el sentido de que su valor en el sistema es la suma de sus valores en cualquier conjunto de subsistemas en que el sistema se divida. Son pues variables globales. El volumen y la cantidad de materia son ejemplos de variables extensivas

Las variables intensivas son variables locales, que se caracterizan por estar definidas en cada pequeña región del sistema. En un sistema en equilibrio, las variables intensivas tienen el mismo valor en todo el espacio de una misma fase. La temperatura y la presión son ejemplos de variables intensivas. Las variables intensivas, como la temperatura, T o la presión P, que caracterizan el equilibrio termodinámico, tienen el mismo valor en todo el sistema, con independencia del número de fases que existan en el mismo.

En el caso de sustancias puras es frecuente expresar las variables extensivas dividiéndolas por el número de moles. Se denominan entonces variables molares. Si se dividen las variables extensivas por la masa, se obtienen las denominadas variables específicas.

La densidad o densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. Su unidad en el Sistema Internacional es el kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), aunque frecuentemente se expresa en  $\text{g/cm}^3$ . La densidad es una magnitud intensiva

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

$\rho$  es la densidad,

$m$  es la masa y

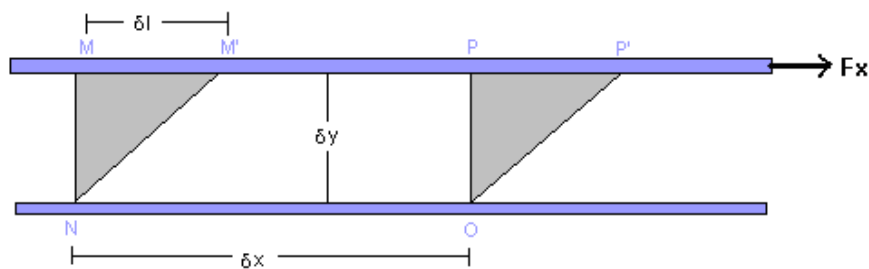
$V$  es el volumen del cuerpo

### Densidad relativa

La densidad relativa de una sustancia es la relación existente entre su densidad y la de otra sustancia de referencia; en consecuencia, es una magnitud adimensional (sin unidades)

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$$

**Viscosidad**, propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan una cierta resistencia a fluir; los fluidos de baja viscosidad fluyen con facilidad. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes de fluido determina su viscosidad, que se mide con un recipiente (viscosímetro) que tiene un orificio de tamaño conocido en el fondo. La velocidad con la que el fluido sale por el orificio es una medida de su viscosidad. En realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones.



*Figura 3.1. Deformación de un elemento de fluido*

Los materiales viscosos tienen la característica de ser pegajosos, como los aceites o la miel. Si se vuelcan, no se derraman fácilmente, sino que se pegotean. Lo contrario ocurre con el agua, que tiene poca viscosidad. La sangre también posee poca viscosidad, pero más que el agua. La unidad de viscosidad es el Poise.

Coefficiente de viscosidad dinámico, designado como  $\eta$  o  $\mu$ . En unidades en el SI:

$$[\mu] = [\text{Pa}\cdot\text{s}] = [\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]; \text{ otras unidades:}$$

$$1 \text{ Poise} = 1 [\text{P}] = 10^{-1} [\text{Pa}\cdot\text{s}] = [10^{-1} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}]$$

Gas (a 0 °C): <input type="text"/>	Viscosidad dinámica [ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] <input type="text"/>
Hidrógeno	8,4
Aire	17,4
Xenón	21,2
Agua (20°C)	1002

Coefficiente de viscosidad cinemático, designado como  $\nu$ , y que resulta ser igual al cociente del coeficiente de viscosidad dinámico entre la densidad  $\nu = \mu/\rho$ . (En unidades en el SI:  $[\nu] = [\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$ . En el sistema cegesimal es el Stoke(St).

Se habla de viscosidad ISO para aceites industriales y viscosidad SAE para aceites de uso automotriz. Los términos de viscosidad ISO y SAE no implican ninguna combinación de aditivos ni propósito específico. Solamente refieren a la viscosidad. A veces se utiliza las medidas de viscosidad SUS (SSU), Redwood, Engler, e otros. Estos sistemas de medición de viscosidad pueden ser convertidos al cSt por formulas matemáticas.

## Material y equipo

- Tres probetas graduadas
- Balanza
- Pelotas de goma
- 250 ml de diferentes líquidos (agua, alcohol, etc)
- Cronometro

## Desarrollo

1. Con ayuda de una de las probetas y de la balanza de obtiene la densidad de cada uno de los líquidos.

Y se llena la tabla siguiente:



Sustancia	Peso	Volumen	densidad
Agua			
Alcohol			
aceite			

2.- A continuación se vierte cada uno de los líquidos en las probetas.

3.- Se deja caer la pelota en cada probeta y con ayuda del cronometro se mide el tiempo que tarda en llegar hasta el fondo.

4.- Se calcula la viscosidad dinámica con ayuda de la ecuación siguiente:

$$\mu = \frac{2(R)^2 g(\rho_s - \rho_L)t}{9L} \dots\dots\dots \text{Ec de Stokes}$$

**Donde:**

$\mu$ =viscosidad cinemática [(g/cm-s)]

**R**= Diámetro de la esfera [cm]

**g**= aceleración de la gravedad [980 cm/s<sup>2</sup>]

$\rho_s$  = Densidad del material de la esfera [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_L$  = Densidad del liquido [g/cm<sup>3</sup>]

**L**= Altura de caída de la esfera [cm]

**t**= Tiempo de caída [segundos]

Y con la información obtenida se llena la tabla siguiente:

LIQUIDO	R (cm)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_L$ (g/cm <sup>3</sup> )	d (cm)	t (s)	$\mu$ (g/cm-s)
Agua						
Alcohol						
Aceite						
Detergente						

**CUESTIONARIO.**

- 1.- ¿Qué se entiende por variable intensiva y por variable extensiva?
- 2.- ¿Qué método usaría para medir la densidad de un sólido irregular pequeño, por ejemplo, una piedra?
- 3.- ¿Qué relaciones existen entre las viscosidades absoluta y relativa y cuales son las unidades en el sistema métrico en que se reporta cada una de ellas?
- 4.- ¿Qué son los grados API y para que sustancias se utilizan principalmente?
- 5.- Defina los conceptos de peso específico, gravedad específica y densidad
- 6.- Describa los aparatos mas utilizados para medir la viscosidad de un líquido
- 7.- Explique el funcionamiento del viscosímetro Saybolt Universal
- 8.- ¿Qué masa tendrá una sustancia que tiene una densidad de  $53.2 \text{ kg/m}^3$  si ocupa un volumen de  $35 \text{ m}^3$ ?
- 9.- En una fábrica de cemento polvorienta e insalubre había  $2.6 \times 10^9$  partículas/m<sup>3</sup> ( $\rho_{\text{rel}} = 3$ ), considerando que las partículas son esferas de 2 micras de diámetro determine la masa del polvo:
  - a) En un cuarto de  $20 \times 15 \times 8 \text{ m}$
  - b) El inhalado en cada respiración promedio de  $400 \text{ cm}^3$  en volumen.

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 4

### PRESIÓN Y LEY DE LOS GASES

#### Objetivo:

- Fijar el concepto de presión, volumen y deducir las relaciones entre presión, volumen y temperatura para un sistema gaseoso con comportamiento ideal.

#### Introducción:

La presión es la magnitud que relaciona la fuerza con la superficie sobre la que actúa, es decir, equivale a la fuerza que actúa sobre la unidad de superficie. Cuando sobre una superficie plana de área  $A$  se aplica una fuerza normal  $F$  de manera uniforme, la presión  $P$  viene dada por:

$$P = \frac{F}{A}$$

#### Presión absoluta y relativa

En determinadas aplicaciones la presión se mide no como la presión absoluta sino como la presión por encima de la presión atmosférica, denominándose presión relativa, presión normal, presión de gauge o presión manométrica. Consecuentemente, la presión absoluta es la presión atmosférica más la presión manométrica (presión que se mide con el manómetro).

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

En la tabla 4.1 se presentan algunas unidades de presión y sus factores de conversión.

**Tabla 4.1. Unidades de presión y sus factores de conversión.**

	Pascal	bar	N/mm <sup>2</sup>	kp/m <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	atm	Torr
<b>1 Pa (N/m<sup>2</sup>)=</b>	1	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	0,102	0,102×10 <sup>-4</sup>	0,987×10 <sup>-5</sup>	0,0075
<b>1 bar (daN/cm<sup>2</sup>) =</b>	100000	1	0,1	1020	1,02	0,987	750
<b>1 N/mm<sup>2</sup> =</b>	10 <sup>6</sup>	10	1	1,02×10 <sup>5</sup>	10,2	9,87	7500
<b>1 kg/m<sup>2</sup> =</b>	9.81	9,81×10 <sup>-5</sup>	9,81×10 <sup>-6</sup>	1	10 <sup>-4</sup>	0,968×10 <sup>-4</sup>	0,0736
<b>1 kg/cm<sup>2</sup> =</b>	98100	0,981	0,0981	10000	1	0,968	736
<b>1 atm (760 Torr) =</b>	101325	1,01325	0,1013	10330	1,033	1	760
<b>1 Torr (mmHg) =</b>	133	0,00133	1,33×10 <sup>-4</sup>	13,6	0,00136	0,00132	1

### Gases ideales

La ley de los gases ideales es la ecuación de estado del gas ideal, un gas hipotético formado por partículas puntuales, sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos (conservación de momento y energía cinética). Los gases reales que más se aproximan al comportamiento del gas ideal son los gases monoatómicos en condiciones de baja presión y alta temperatura.

Empíricamente, se observan una serie de relaciones entre la temperatura, la presión y el volumen que dan lugar a la ley de los gases ideales, deducida por primera vez por Émile Clapeyron en 1834.

La ecuación que describe normalmente la relación entre la presión, el volumen, la temperatura y la cantidad (en moles) de un gas ideal es:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

$P$ = Presión

$V$ = Volumen

$n$ = Moles de Gas

$R$ = Constante universal de los gases ideales

$T$ = Temperatura absoluta

### Ecuación general de los gases ideales

Partiendo de la ecuación de estado:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Se tiene que:

$$\frac{P \cdot V}{n \cdot T} = R$$

Donde R es la constante universal de los gases ideales, luego, para dos estados del mismo gas, 1 y 2:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{n_1 \cdot T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{n_2 \cdot T_2} = R$$

Para una misma masa gaseosa (por tanto, el número de moles «n» es constante), se puede afirmar que existe una constante directamente proporcional a la presión y volumen del gas, e inversamente proporcional a su temperatura.

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Como la cantidad de sustancia podría ser dada en masa en lugar de moles, a veces es útil una forma alternativa de la ley del gas ideal. El número de moles (n) es igual a la masa (m) dividido por la masa molar (M):

$$n = \frac{m}{M}$$

y sustituyendo  $n$ , se obtiene:

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

Donde:

$$P = \rho \frac{R}{M}T$$

Esta forma de la ley del gas ideal es muy útil porque se vincula la presión, la densidad  $\rho = m/V$ , y la temperatura en una fórmula única, independiente de la cantidad del gas considerado.

### **Ley de Boyle-Mariotte**

También llamado proceso isotérmico. Afirma que, a temperatura y cantidad de gas constante, el volumen de un gas es inversamente proporcional a su presión:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot n_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2 \cdot n_2} \\ n = \text{Constante} \\ T = \text{Constante} \end{array} \right\} \longrightarrow P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

### Leyes de Charles y Gay-Lussac

En 1802, Louis Gay Lussac publica los resultados de sus experimentos, basados en los que Jacques Charles hizo en el 1787. Se considera así al proceso isobárico para la Ley de Charles, y al isocoro (o isostérico) para la ley de Gay Lussac.

#### Proceso isobárico ( Charles)

$$\left. \begin{array}{l} \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot n_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2 \cdot n_2} \\ n = \text{Constante} \\ P = \text{Constante} \end{array} \right\} \longrightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

#### Proceso isocoro ( Gay Lussac)

$$\left. \begin{array}{l} \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot n_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2 \cdot n_2} \\ n = \text{Constante} \\ V = \text{Constante} \end{array} \right\} \longrightarrow \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

### Ley de Avogadro

La Ley de Avogadro fue expuesta por Amedeo Avogadro en 1811 y complementaba a las de Boyle, Charles y Gay-Lussac. Asegura que en un proceso a presión y temperatura constante (isobaro e isoterma), el volumen de cualquier gas es proporcional al número de moles presente, de tal modo que:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot n_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2 \cdot n_2} \\ T = \text{Constante} \\ P = \text{Constante} \end{array} \right\} \longrightarrow \frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$$

### Material y equipo

- Termómetro de Hg graduado.
- Botellas de plástico o metal
- Calorímetro
- Vaso de precipitados
- 2 globos
- Vernier
- Un litro de agua.

### Procedimiento

1. Se toman los datos iniciales como son: temperatura del medio ambiente (inicial) y las medidas de las botellas.
- 2.- Se vierte un litro de agua dentro del calorímetro
- 3.- A continuación se sustituye la tapa de una botella por un globo y se coloca dentro del calorímetro
- 4.- Se conecta a la red eléctrica el calorímetro y se calienta el líquido hasta que empieza hervir, midiendo la temperatura del mismo.
- 5.- Se mantiene tal estado durante tres minutos aproximadamente, para dar tiempo a que el aire contenido dentro de la botella alcance la misma temperatura.
- 6.- Se mide el diámetro alcanzado por el globo.

**CUESTIONARIO.**

- 1.- ¿Qué es la presión? Ponga un ejemplo.
- 2.- Defina las presiones:
  - a) Atmosférica
  - b) Barométrica
  - c) Absoluta
- 2.- ¿Cuáles son las unidades comunes en que se expresa la presión?
- 3.- Explique las Leyes de Boyle y la de Charles para los gases y haga las gráficas correspondientes.
- 4.- ¿Qué es el coeficiente de expansión térmica?
- 5.- Bajo qué condiciones un gas se comporta como gas ideal.
- 6.- ¿Qué es la constante universal de los gases R?
- 7.- ¿Cuáles son las líneas isotermas y las isobaras?
- 8.- ¿Qué Ley se cumple en cada experimento?
- 9.- ¿Cuál es la cantidad de aire aproximada (en g) contenida por la botella?
- 10.- ¿Cuál es el volumen final ocupado por el aire en el primer experimento?
- 11.- Calcule el diámetro final del globo (suponiendo que es totalmente esférico) y compárelo con el medido en la práctica.
- 12.- En el segundo experimento, calcule la presión a la que esta sometida la botella.
- 13.- ¿Cuál es el volumen en ml que ocupa un gas ideal si 0.039 moles se encuentran a una temperatura de 2762.11 K y a una presión de 1018 mmHg
- 14.- La presión manométrica en la llanta de un automóvil es de 305 kPa cuando su temperatura es de 15°C. Después de correr a alta velocidad, el neumático se calentó y la presión subió a 360 kPa. ¿Cuál es la temperatura del gas de la llanta? Considere una presión barométrica de 101 kPa.
- 15.- Un gas a temperatura y presión ambiente esta contenida en un cilindro por medio de un pistón, el cual es empujado de modo que el volumen se reduce a una 1/8 parte de su valor inicial. Después de que la temperatura del gas ha vuelto a ser igual a la del ambiente. ¿Cuál es la presión manométrica del gas? La presión atmosférica local es de 740 mm de Hg.



# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 5

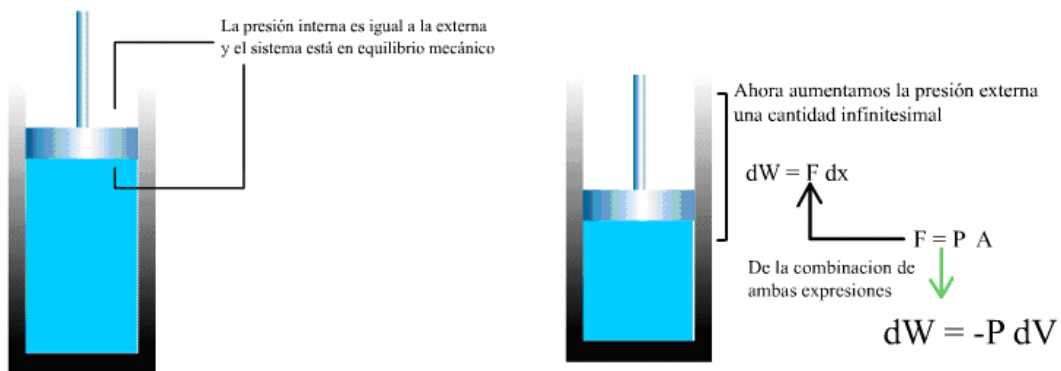
### LEY DE JOULE

#### Objetivo:

- Revisar los conceptos de trabajo, calor, energía y Primera Ley de la Termodinámica.

#### Introducción:

El trabajo en termodinámica se define de la misma forma que en mecánica clásica: Cuando una parte del medio ejerce una fuerza sobre el sistema y este se mueve una distancia  $dx$  desde el punto de aplicación de la fuerza, entonces el medio ha realizado un trabajo sobre el sistema  $dW = F dx$ ,  $F$  puede ser una fuerza mecánica, eléctrica o magnética figura 5.1.



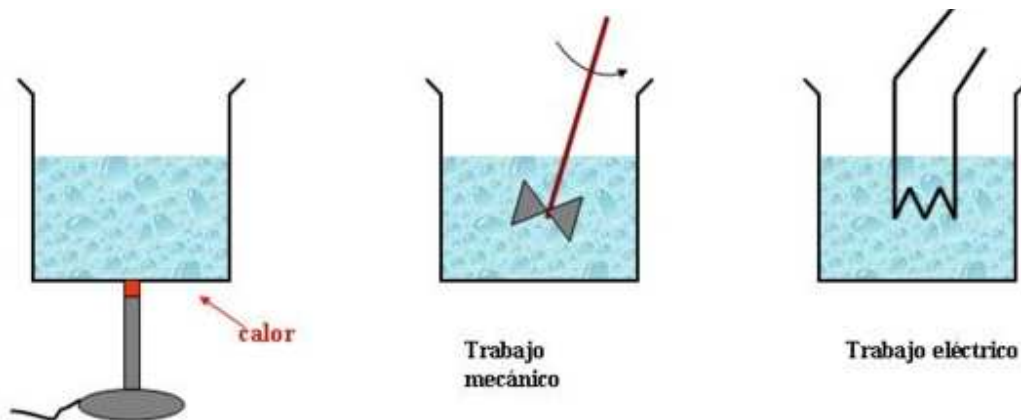
*Figura 5.1. Realización de trabajo en un sistema*

El calor representa la cantidad de energía que un cuerpo transfiere a otro como consecuencia de una diferencia de temperatura. Aun cuando no sea posible determinar el contenido total de energía calorífica de un cuerpo, puede medirse la cantidad que se toma o se cede al ponerlo en contacto con otro a diferente temperatura. Esta cantidad de energía en tránsito de los cuerpos de mayor temperatura a los de menor temperatura es lo que se entiende por calor.

Un sistema termodinámico posee una cierta energía que llamamos energía interna ( $U$ ), debida a la propia constitución de la materia (enlaces de la moléculas, interacciones entre ellas, choques térmicos...). Por lo tanto, la energía total de un sistema es la suma de su energía interna, su energía potencial, su energía cinética, y la debida al hecho de encontrarse sometido a la acción de cualquier campo. (No obstante consideraremos sistemas sencillos que no se encuentran sometidos a ningún campo externo, ni siquiera el gravitatorio).

Puesto que la energía interna del sistema se debe a su propia naturaleza, a las partículas que lo constituyen y la interacción entre ellas, la energía interna es una propiedad extensiva del sistema. Sus unidades son unidades de energía, el joule.

La energía interna de un sistema se puede modificar de varias maneras equivalentes, realizando un trabajo o transfiriendo energía en forma de calor como se muestra en la figura 5.2.



*Figura 5.2. Calor y trabajo son formas equivalentes de variar la energía del sistema termodinámico.*

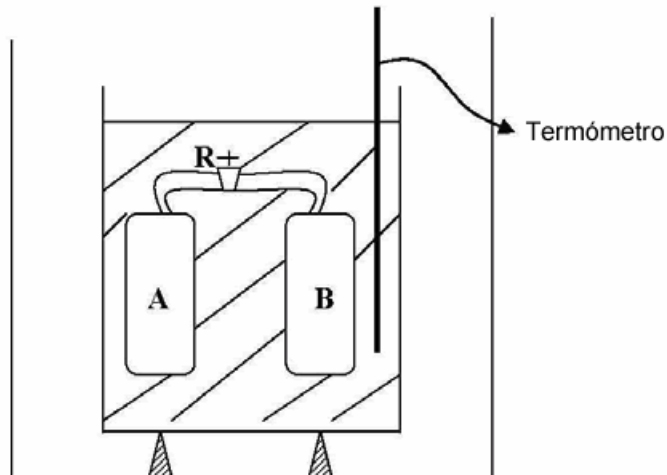
Si se hace variar la energía interna del sistema, la primera ley de la termodinámica dice, que esta variación viene acompañada por la misma variación de energía, pero de signo contrario en los alrededores. De modo que la energía total del sistema más el entorno, permanece constante. **La energía del Universo permanece constante. La energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma.**

La forma de expresar esta ley, centrándonos en el estudio del sistema, es:

$$\Delta U = Q + W$$

En el año 1844, Joule efectuó experiencias con los gases dejándolos expandir en el vacío.

El experimento consistió en colocar dos recipientes A y B, que pueden comunicarse entre sí operando el robinete R, sumergidos en un calorímetro de agua, cuya temperatura puede medirse con el termómetro t.



Se inicia el experimento colocando una masa de gas en A y haciendo el vacío en B. Todo el conjunto tendrá la temperatura del agua del calorímetro. Abriendo el robinete R, el gas encerrado en A se expande hasta ocupar el volumen de los recipientes A y B. Midiendo la temperatura del agua del calorímetro, se puede constatar que la temperatura no ha variado. Esto indica que el calor intercambiado entre el gas y el agua es cero  $Q = 0$ . Como el gas se expande en el vacío, es decir que no lo hace contra fuerzas exteriores, y además las paredes del recipiente A y B son rígidas, el trabajo de expansión  $W_e$  también será cero,  $W_e = 0$ .

Como el proceso debe cumplir el primer principio de la Termodinámica se puede aplicar la ecuación:  $Q = \Delta U + W_e$  y teniendo en cuenta que tanto  $Q$  como  $W_e$  son nulos:

$\Delta U = 0$  es decir que no hay variación de energía interna en el proceso.

Caloría es la cantidad de energía térmica necesaria para elevar  $1^\circ\text{C}$ , 1 gramo de agua desde una temperatura de  $14.5^\circ\text{C}$

Joule demostró que no sólo la energía térmica permite elevar la temperatura, sino cualquier otra forma de energía suministrada a un sistema puede realizar el mismo efecto.

En esta práctica se mide el equivalente eléctrico, transformando la energía eléctrica en térmica.

Si se introduce una resistencia eléctrica en un recipiente con una cierta cantidad de agua, se sabe que la potencia consumida por la resistencia es:

$$\text{Pot} = V \cdot I$$

De acuerdo a la Ley de Ohm:

$$V = IR \Rightarrow I = \frac{V}{R}$$

Por lo tanto:

$$\text{Pot} = \frac{V^2}{R}$$

La energía eléctrica  $W$  suministrada al calorímetro al cabo de un tiempo  $t$ , es:

$$W = \frac{V^2}{R} t \quad [\text{Joules}]$$

Donde:

$V$  = Voltaje de línea,

$R$  = resistencia del calorímetro en ohms,

$t$  = tiempo en segundos.

Esta energía se transforma en calor.

Por otro lado, si la temperatura inicial es  $T_1$  y la final  $T_2$ , entonces:

$$Q = c \cdot m (T_2 - T_1) \quad [\text{cal}]$$

Donde:

$Q$  es la energía térmica suministrada al agua,

$c$  es el calor específico del agua (1 cal/g K),

$m$  la masa en gramos del agua

De ese modo el equivalente,  $J_e$ , del calor, es:

$$J_e = \frac{W}{Q}$$

### Material y equipo.

- Calorímetro
- Termómetro de mercurio
- Vaso de precipitados
- Multímetro
- Cronometro

**CUESTIONARIO.**

- 1.- Defina los conceptos de calor y trabajo
- 2.- ¿Qué es una función de trayectoria y una propiedad de estado? Dé un ejemplo de cada una.
- 3.- ¿Qué es un proceso reversible y que un proceso irreversible?
- 4.- ¿Cómo definiría UD. la eficiencia de un proceso y por qué?
- 5.- ¿Bajo que condiciones el calor puede ser positivo o negativo para un sistema?
- 6.- ¿Qué dice de manera general la Primera Ley de la Termodinámica?
- 7.- ¿A qué se debe que un trabajo pueda ser de expansión o de compresión para una misma cantidad de gas y una temperatura constante?
- 8.- ¿El valor calculado coincide con el encontrado en la bibliografía?
- 9.- Por una secadora de pelo circula una corriente de 10 A y tiene una bobina calefactora con una resistencia igual a  $22 \Omega$ . Calcule el calor disipado en 2 minutos. Si el costo de la energía es de \$2.00 el kW-h ¿Cuánto cuesta la electricidad que usó en esta aplicación?

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 6

### LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA

#### Objetivo:

- Revisar conceptos de Entalpía y calor específico  $C_p$ .
- Determinar entalpía de fusión
- Establecer la Ley Cero de la Termodinámica

#### Introducción:

La **Entalpía** también llamada contenido de calor, y calculada en joules en el sistema internacional de unidades o también en kcal o, si no, dentro del sistema anglo: "BTU", es una función de estado, (lo que quiere decir que, sólo depende de los estados inicial y final) que se define como la suma de la energía interna de un sistema termodinámico y el producto de su volumen por su presión.

La entalpía total de un sistema *no* puede ser medida directamente, al igual que la energía interna, en cambio, la variación de entalpía de un sistema sí puede ser medida experimentalmente. El cambio de la entalpía del sistema causado por un proceso llevado a cabo a presión constante, es igual al calor absorbido por el sistema durante dicho proceso.

La entalpía ( $H$ ) es la suma de la energía interna ( $U$ ), energía que posee una sustancia debida al movimiento y posición de sus partículas a nivel atómico, y la energía mecánica asociada a la presión ( $p$ ).

$$H = U + pV$$

La mayoría de los procesos se realizan a presión constante, por lo que resulta adecuado definir una nueva función de estado, la entalpía ( $H$ ), que se define según la ecuación;

$$H \equiv U + PV$$

Donde:

- $H$  es la entalpía (en joules).
- $U$  es la energía interna (en joules).
- $p$  es la presión del sistema (en pascales).

- $V$  es el volumen del sistema (en metros cúbicos).

De la definición se deduce que sus unidades son unidades de energía, el Julio. La entalpía es una propiedad extensiva del sistema, puesto que la energía interna y el volumen lo son. La entalpía es una función de estado, y como tal depende de la  $P$  y la  $T$ , su variación sólo depende del estado inicial y final, y no de la trayectoria seguida por el sistema en el proceso termodinámico.

$$\Delta H = H_f - H_i$$

**Según el Primer Principio en forma diferencial:**

$$dU = q + w = q - P_{\text{ext}}dV$$

- si el proceso ocurre a  $V$  constante

$$dU = q_v$$

$$\Delta U = Q_v$$

- si el proceso ocurre a  $P$  constante

$$\Delta U = Q_p - P_{\text{ext}}(V_2 - V_1)$$

$$Q_p = (U_2 - U_1) + P_{\text{ext}}(V_2 - V_1) = (U_2 + PV_2) + (U_1 + PV_1) = H_2 - H_1 = \Delta H$$

*Luego, la variación de entalpía para un sistema que realiza un proceso a presión constante, es el calor absorbido o cedido por el sistema.*

**Calor específico:** es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius). En general, el valor del calor específico depende de dicha temperatura inicial. Se le representa con la letra  $c$  (minúscula).

Como el calor no es una función de estado, habrá que definir que tipo de proceso se realiza cuando se quiera saber que transferencia de energía en forma de calor es necesaria para variar la temperatura del sistema.

- Si el proceso se realiza a **presión constante** se define la **capacidad calorífica a presión constante** como:

$$C_p = \frac{q_p}{dT}$$

- Si el proceso se realiza a **volumen constante** se define la **capacidad calorífica a volumen constante** como:

$$C_v = \frac{q_v}{dT}$$

Puesto que:

$$Q_v = \Delta U \text{ y } Q_p = \Delta H$$

Se tiene que:

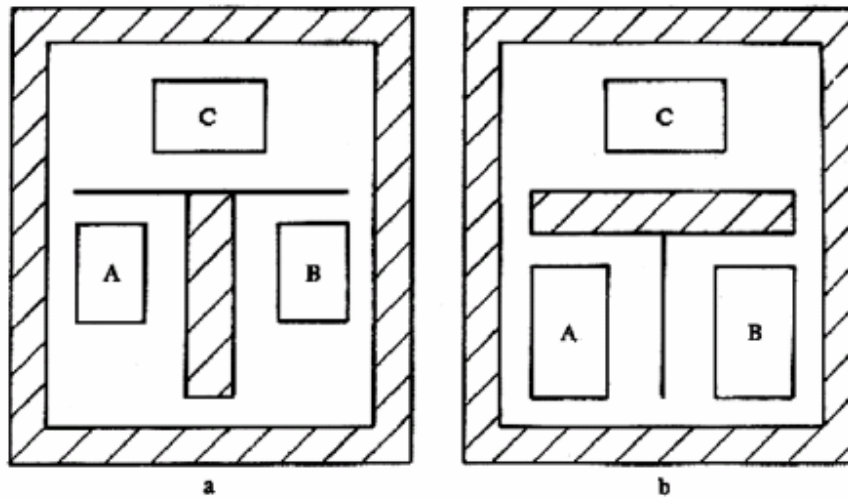
$$C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \text{ y } C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

**Entalpía de fusión:** o calor de fusión es la cantidad de energía necesaria para hacer que un mol de un elemento que se encuentre en su punto de fusión pase del estado sólido al líquido, a presión constante. Cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno. Es una magnitud de termodinámica (H), cantidad de energía que se puede intercambiar. Unidades: kJ/mol

**Ley cero de la termodinámica:** La Ley cero de la termodinámica dice que si se tienen dos cuerpos llamados A y B, con diferente temperatura uno de otro, y los ponemos en contacto, en un tiempo determinado t, estos alcanzarán la misma temperatura, es decir, tendrán ambos la misma temperatura. Si luego un tercer cuerpo, que llamaremos C se pone en contacto con A y B, también alcanzará la misma temperatura y, por lo tanto, A, B y C tendrán la misma temperatura mientras estén en contacto.

De este principio podemos inducir el de temperatura, la cual es una condición que cada cuerpo tiene y que el hombre ha aprendido a medir mediante sistemas arbitrarios y escalas de referencia (escalas termométricas).





**Figura 6.1. Ley Cero de la termodinámica**

Se define calor específico  $c$  como la cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de sustancia para que eleve su temperatura en un grado centígrado. En el caso particular del agua  $c$  vale  $1 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$  ó  $4186 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$ .

En calorimetría se utiliza el calorímetro para aislar los materiales que serán puestos en contacto térmico y al medir masas y cambios de temperatura se puede determinar el calor específico de un material. Partiendo de un análisis de las transferencias de energía en forma de calor que se presentan dentro del calorímetro, se puede determinar el calor específico. Por ejemplo si en este proceso están involucrados dos materiales  $a$  y  $b$ , y si la energía en forma de calor que transfiere  $a$  es completamente absorbida por  $b$ , entonces:

$$\text{Energía cedida por } a = \text{Energía absorbida por } b$$

Relación que se puede expresar como:

$$Q_{\text{agua}} = Q_{\text{metal}}$$

Por lo tanto:

$$m_{\text{agua}} \cdot c_{\text{agua}} \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{equilibrio}}) = m_{\text{metal}} \cdot c_{\text{metal}} \cdot (T_{\text{equilibrio}} - T_{\text{inicial}})$$

Despejando el calor específico del metal se obtiene:

$$c_{\text{metal}} = \frac{(m_{\text{agua}} \cdot c_{\text{agua}} \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{equilibrio}}))}{m_{\text{metal}} \cdot (T_{\text{equilibrio}} - T_{\text{inicial}})}$$

Donde:

$m$  = masa del agua en gramos

$m$  = masa del metal en gramos

$T_{\text{final}}$  = temperatura a la que se calienta el agua

$T_{\text{inicial}}$  = temperatura del metal (ambiente)

$T_{\text{equilibrio}}$  = Temperatura que alcanza el agua después de introducir el metal

### **Material y equipo**

- Calorímetro
- Termómetro de mercurio
- Vaso de precipitados
- Cronometro
- Pieza de acero
- Pieza de aluminio
- Pieza de bronce.

### **CUESTIONARIO.**

- 1.- ¿Qué es la entalpía y por qué se dice que es una función de estado?
- 2.- Calcule el calor específico de cada uno de los metales
- 3.- Compare el valor obtenido con el que aparece en la bibliografía especializada
- 4.- ¿Por qué no cambia la temperatura durante un cambio de estado? Explique brevemente.
- 5.- ¿En qué consiste la Ley Cero de la Termodinámica y por qué cree que es útil?

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 7

### CARTA PSICROMÉTRICA

#### **Objetivo:**

- El alumno será capaz de manejar un diagrama psicrométrico, como un auxiliar para diversos cálculos que se utilizan en instalaciones de aire acondicionado.

#### **Introducción.**

Se denomina **aire** a la mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre, que permanecen alrededor de la Tierra por la acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta, es particularmente delicado, fino y etéreo, y si está limpio transparente en las distancias cortas y medias. El aire está compuesto principalmente por nitrógeno, oxígeno y argón. El resto de los componentes, entre los cuales se encuentran los gases de efecto invernadero, son el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nítrico y ozono, entre otros. Otro tipo de sustancias pueden estar presente en pequeñas cantidades como polvo, polen y esporas, y ceniza volcánica. También es detectable la presencia de elementos vertidos a la atmósfera en forma de contaminante como el cloro y sus compuestos, flúor, mercurio y compuestos de azufre.

En la tabla 7.1 se presenta la composición química de la atmósfera por volumen.

**Tabla 7.1. Composición de la atmósfera libre de vapor de agua, por volumen**

Gas	Volumen (%)
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.084%
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.946%
Argón (Ar)	0.9340%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0.039%
Neón (Ne)	0.001818%
Helio (He)	0.000524%
Metano (CH <sub>4</sub> )	0.000179%
Criptón (Kr)	0.000114%
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0.000055%
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	0.00003%
Monóxido de carbono (CO)	0.00001%
Xenón (Xe)	0.000009%
Ozono (O <sub>3</sub> )	0 a $7 \times 10^{-6}$ %
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.000002%
Yodo (I <sub>2</sub> )	0.000001%
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	trazas
<b>No incluido en aire seco:</b>	
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	~0,40% en capas altas de la atmósfera, normalmente 1% a 4% en la superficie

Así, la Psicrometría se define como la medición del contenido de humedad del aire.

Ampliando la definición a términos más técnicos, psicrometría es la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. Ampliando aún más, incluiríamos el método de controlar las propiedades térmicas del aire húmedo. Lo anterior, se puede llevar a cabo a través del uso de tablas psicrométricas o de la carta psicrométrica.

En una carta psicrométrica se encuentran todas las propiedades del aire, de las cuales las de mayor importancia son las siguientes:

1. Temperatura de bulbo seco (*bs*).
2. Temperatura de bulbo húmedo (*bh*).
3. Temperatura de punto de rocío (*pr*)
4. Humedad relativa (*hr*).
5. Humedad absoluta (*ha*).
6. Entalpía (*h*).
7. Volumen específico.

### **Temperatura de Bulbo Seco**

El confort humano y la salud, dependen grandemente de la temperatura del aire. En el acondicionamiento de aire, la temperatura del aire indicada es normalmente la temperatura de «bulbo seco» (*bs*), tomada con el elemento sensor del termómetro en una condición seca.

Es la temperatura medida por termómetros ordinarios en casa.

### **Temperatura de Bulbo Húmedo**

Básicamente, un termómetro de bulbo húmedo no es diferente de un termómetro ordinario, excepto que tiene una pequeña mecha o pedazo de tela alrededor del bulbo. Si esta mecha se humedece con agua limpia, la evaporación de esta agua disminuirá la lectura (temperatura) del termómetro. Esta temperatura se conoce como de «bulbo húmedo» (*bh*). Si el aire estuviese saturado con humedad (100% *hr*), la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco. Sin embargo, la *hr* normalmente es menor de 100% y el aire está parcialmente seco, por lo que algo de la humedad de la mecha se evapora hacia el aire. Esta evaporación de la humedad de la mecha, provoca que la mecha y el bulbo del termómetro se enfríen, provocando una temperatura más baja que la del bulbo seco.

Mientras más seco esté el aire, más rápida será la evaporación de la humedad de la mecha. Así que, la lectura de la temperatura del bulbo húmedo, varía de acuerdo a qué tan seco esté el aire.

La precisión de la lectura del bulbo húmedo, depende de qué tan rápido pase el aire sobre el bulbo. Las velocidades hasta de 1,500 m/min (90 km/h), son mejores pero peligrosas, si el termómetro se mueve a esta velocidad. También, el bulbo húmedo deberá protegerse de superficies que radien calor (sol, radiadores, calentadores eléctricos, calderas, etc.). Se pueden tener errores hasta del 15% si el movimiento de aire es muy lento, o si hay mucha radiación presente.

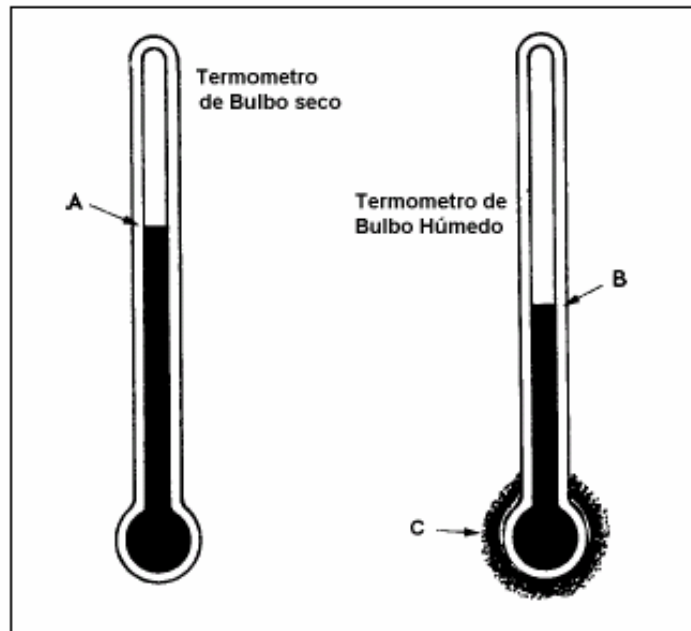


Tabla 40.7. Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo

**Figura 7.1. Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo**

### El Punto de Rocío

Es el valor al que debe descender la temperatura del aire para que el vapor de agua existente comience a condensarse.

El punto de rocío puede calcularse directamente con los datos de temperatura y humedad relativa existentes en un momento dado. Esos datos pueden provenir de los informes meteorológicos emitidos radialmente, o registrados por instrumental.

La capacidad de la atmósfera para recibir vapor de agua se relaciona con los conceptos de humedad absoluta y humedad relativa:

- **humedad absoluta**

Es la cantidad de agua presente en el aire por unidad de masa de aire seco. Es un concepto que no influye en la comodidad humana.

- **humedad relativa**

Es el cociente en la humedad absoluta y *la cantidad máxima de agua que admite el aire por unidad de volumen*. Se mide en tantos por ciento y está normalizada de forma que la humedad relativa máxima posible es el 100%.

Una humedad relativa del 100% significa un ambiente en el que no cabe más agua. El cuerpo humano no puede transpirar y la sensación de calor puede llegar a ser asfixiante. Corresponde a

un ambiente húmedo. Una humedad del 0% corresponde a un ambiente seco. Se transpira con facilidad.

Cuando la humedad alcanza el valor del 100% se producen fenómenos de condensación que observamos en la vida diaria. El fenómeno del rocío en las mañanas de invierno se debe a que la humedad relativa del aire ha alcanzado el 100% y el aire no admite ya más agua. Entonces el agua condensa en forma líquida en superficies metálicas, hojas, flores etc. También se alcanza el 100% de humedad cuando usamos agua muy caliente en un recinto cerrado como por ejemplo un cuarto de baño. El agua caliente se evapora fácilmente y el aire de la habitación alcanza con rapidez el 100% de humedad. El resultado es de todos conocidos... se empañan (se humedecen) los espejos del lavabo.

Estos dos fenómenos son diferentes pero ilustran las dos formas en que puede aumentar la humedad de un recinto:

- Por disminución de la temperatura ambiental
- Por aumento de la cantidad de agua en el ambiente

El primero de los fenómenos se relaciona con el concepto de *temperatura de rocío*. Si se mantiene la cantidad de agua del ambiente constante y se disminuye la temperatura llega un momento en que se alcanza una humedad relativa del 100%. Ese momento es el *punto de rocío* y su temperatura la *temperatura de rocío*. Esto es justamente lo que ocurre en las madrugadas de invierno. La temperatura desciende tanto que llega al punto de rocío, en ese momento la humedad relativa del 100% hace que el agua se condense en las superficies.

Cualquier objeto de una habitación que tenga una temperatura menor que la temperatura de rocío presenta condensación en sus paredes por este fenómeno. Así ocurre por ejemplo cuando sacamos una lata de refresco de un refrigerador y la colocamos en una mesa. Su temperatura es, seguramente, menor que la de rocío y observamos como la lata se empaña de humedad.

Las personas que usan lentes conocen perfectamente qué ocurre cuando, en una fría mañana de invierno, se introducen súbitamente en un recinto cerrado y caliente (por ejemplo en un autobús). La temperatura de los cristales de las gafas es muy baja y menor que la temperatura de rocío del recinto. Los cristales se empañan rápidamente hasta que se calientan y se sitúan a la temperatura del recinto.

### **Aire acondicionado**

Un sistema de aire acondicionado, es aquel equipo, que procesa el aire ambiente, enfriándolo, limpiándolo, controlando de manera simultánea, la humedad del mismo, al momento de salir por el aire acondicionado. Todo este proceso se lleva a cabo, por la circulación del aire. Ingresando en la recámara del aire acondicionado y luego expulsándolo. Aquello se logra, por medio de un termómetro, el que se regula con un termostato, que es manejado de manera manual por su dueño. Con lo cual, este indicará, a que temperatura desea que salga el aire refrigerado. Todo este circuito, funciona por medio de un condensador, donde se encuentran diversos tubos, los cuales son enfriados por medio de un líquido refrigerante. Como se mencionó anteriormente, el aire ingresa a la recámara central, es enfriado y luego expulsado. Eso sí, parte del aire que ingresa, también es expulsado por la parte de atrás del aire acondicionado. Por lo mismo, es que cuando se instala uno, se puede observar que parte de este, da hacia el exterior del edificio u casa.

Desde el punto de vista constructivo, las máquinas para aire acondicionado pueden clasificarse en:

1. Máquinas de pared
2. Máquinas directamente enfriadoras del aire, que luego es llevado frío y retornado caliente por conductos a la unidad que está colocada en el exterior.
3. Máquinas que están divididas en dos unidades, una exterior que produce y bombea el refrigerante líquido a otra interior conocida como consola donde se evapora el refrigerante y se intercambia el calor con el aire del local.
4. Máquinas exteriores, enfriadoras de agua, esta agua luego se bombea por tuberías y se usa para enfriar el aire localmente en intercambiadores de calor distribuidos por toda la edificación.

Cada una de estas máquinas de aire acondicionado encuentran su campo de aplicación en dependencia del volumen y tipo de edificación a servir, así por ejemplo, las máquinas de pared están reservadas al enfriamiento de un solo local, si además este tiene, alguna pared que comunique al exterior, mientras que las máquinas de los casos 2 y 3 se usan para acondicionar el aire de toda una vivienda o una planta completa de un edificio de pocos pisos de altura. Los sistemas por enfriamiento de agua se reservan para edificios de muchos pisos donde el relativo poco diámetro de los conductos de agua, así como su facilidad de bombeo, hace mas viable el proyecto.



Las partes más importantes de una unidad de aire acondicionado son

### **Condensador**

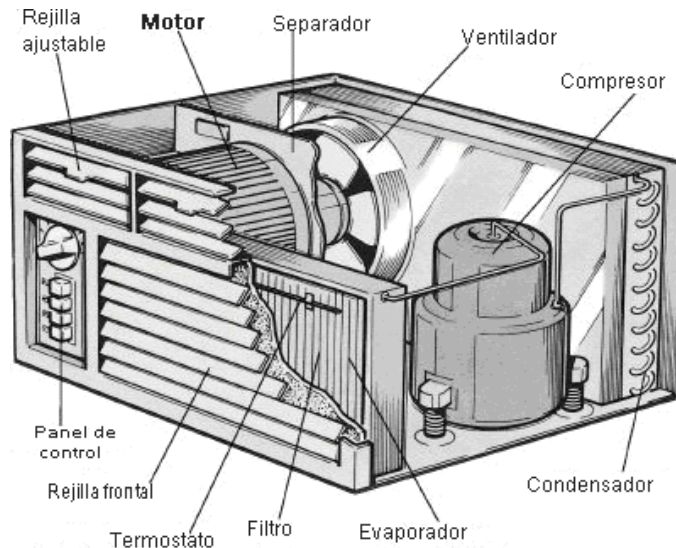
El condensador casaa unas pocas partes. Es un lugar exterior, y se debe instalar en un lugar fresco y sombreado. Si no, tendrá que trabajar más duro y sus costos de electricidad aumentar.

### **Compresor de aire**

Las bombas de compresor de aire del gas refrigerante de los componentes internos del edificio en el compresor fuera de la casa. A medida que aumenta la presión, también lo hace la temperatura, por lo que el refrigerante es enviado a la bobina de condensación.

### **Bobina de condensación**

Esta parte permite que el gas a expandirse y enfriarse. El exceso de calor se sopla a través de las bobinas al exterior por un ventilador. El refrigerante está en constante movimiento a través de las bobinas.



*Figura 7.2. Componentes de un sistema de aire acondicionado*

### **Ventilador**

Esta es una de las partes más importantes del sistema de aire acondicionado. Sin ella, el aire de su habitación se mantiene caliente. Si ve que hay algunos problemas con el acondicionador, luego la primera a echar un vistazo al ventilador.

**Cinturones**

Los cinturones deben ser controlados regularmente. Si están sueltos, entonces se necesitará más tiempo para que el aire fresco. Si ves que se están agrietados, debe reemplazarlos.

**Filtros**

Sin estos elementos, los alérgenos al aire libre puede contaminar su hogar. Esto es muy peligroso para aquellos que sufren de alergias. También hacen su hogar más saludable al mantener la humedad en la bahía. Ellos necesitan ser limpiados constantemente y reemplazada una vez un par de meses.

**Termostato**

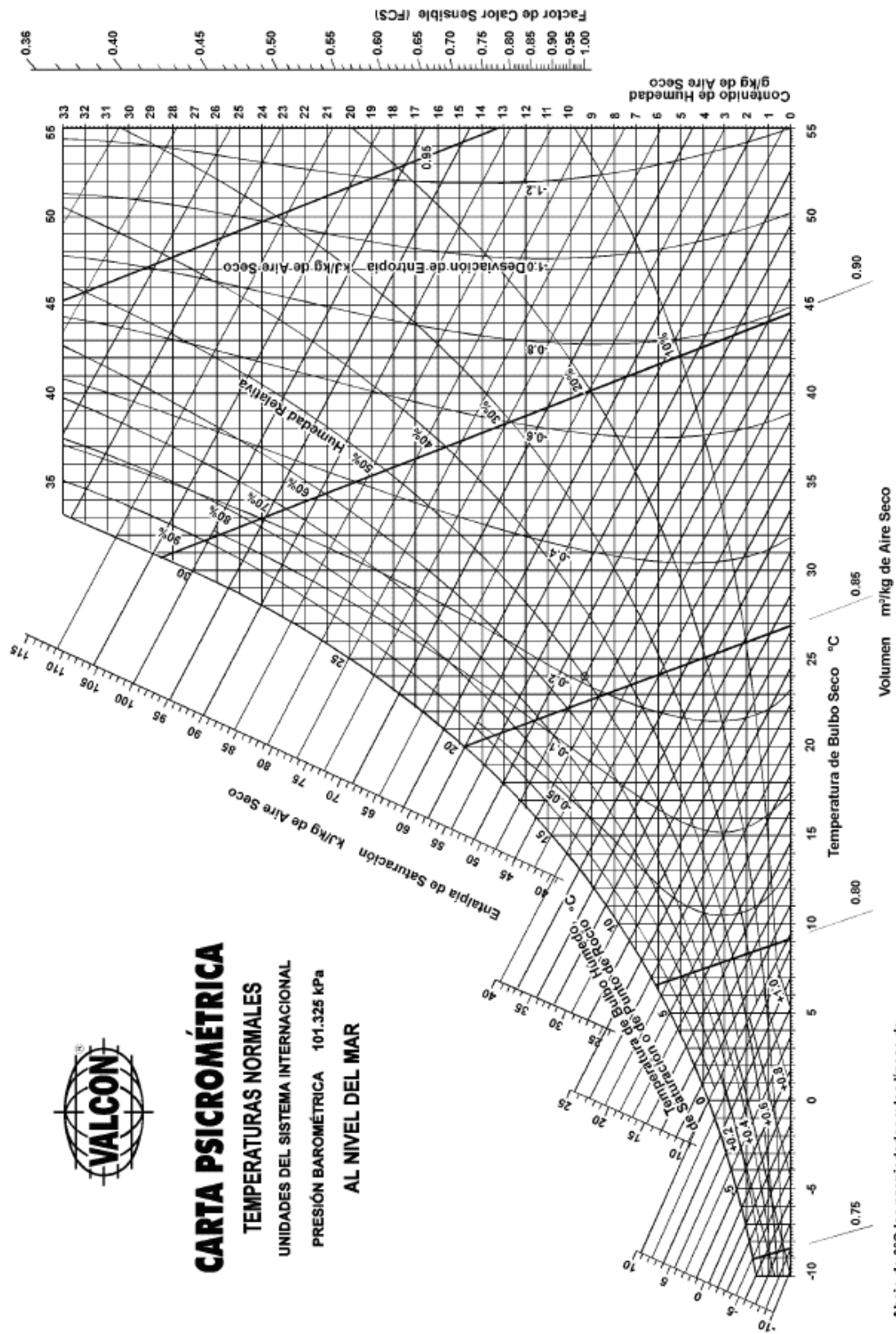
Esta parte le permite elegir la temperatura de su deseo. Asegúrese de que muestra la temperatura interior. Esto le ayudará a ver la velocidad del aire acondicionado y ver si hay algún problema.

**Material y equipo:**

- Ventilador
- Termómetro
- Gasa humedecida con agua
- Cronometro

**CUESTIONARIO.**

- 1.- ¿Cuál es la composición química del aire atmosférico?
- 2.- ¿Qué es la temperatura o punto de rocío?
- 3.- ¿Qué es un proceso psicrométrico?
- 4.- ¿Cuántos tipos de procesos psicrométricos existen?
- 5.- ¿En que industria se utiliza el aire acondicionado?
- 6.- ¿Tiene alguna relación el acondicionamiento de aire con al refrigeración? ¿por qué?
- 7.- Describa el ciclo de Carnot invertido.
- 8.- ¿Qué es el aire saturado?
- 9.- ¿Cuál es el principio de funcionamiento de un higrómetro de cabello?
- 10.- ¿Qué es un proceso de humidificación?



# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 8

### CALOR SENSIBLE Y CALOR LATENTE

#### Objetivo:

- Obtener el calor sensible y el calor latente del agua

#### Introducción

El **calor latente**  $Q_L$  es el necesario aportar para que una masa  $m$  de cierta sustancia cambie de fase y es igual a:

$$Q_L = mL$$

Donde  $L$  se denomina calor latente de la sustancia y depende del tipo de cambio de fase.

Despejando a  $L$  se obtiene:

$$L = Q_L / m$$

Sabiendo que:

$$W = Q_L = \frac{V^2}{R} t$$

Sustituyendo; se obtiene

$$L = \frac{V^2}{R \cdot m} t$$

**Calor sensible**,  $Q_s$ , es aquel que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado.

Si el proceso se efectúa a presión constante:

$$Q_s = m \cdot C(T_2 - T_1)$$

Donde  $m$  es la masa del metal en gramos

Despejando a C

$$C = \frac{Q_x}{m(T_2 - T_1)}$$

Sabiendo que:

$$W = Q_x = \frac{V^2}{R} t$$

Sustituyendo se obtiene:

$$C = \frac{V^2}{R \cdot m(T_2 - T_1)} t$$

En la tabla 8.1 se proporcionan los datos referentes a los cambios de estado de algunas sustancias.

**Tabla 8.1.**

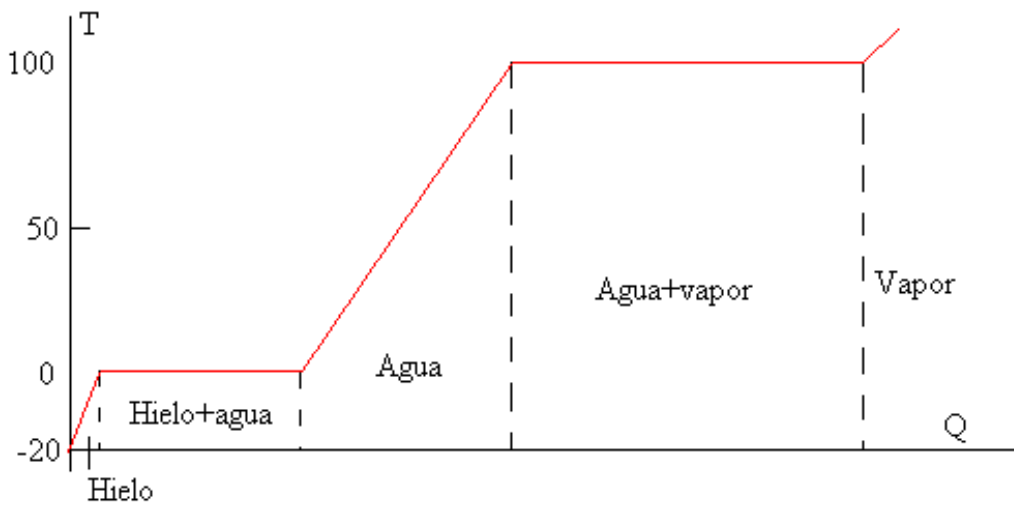
Sustancia	T fusión °C	$L_f \cdot 10^3$ (J/kg)	T ebullición °C	$L_v \cdot 10^3$ (J/kg)
Hielo (agua)	0	334	100	2260
Alcohol etílico	-114	105	78.3	846
Acetona	-94.3	96	56.2	524

Calor específico del hielo  $c_h = 2090$  J/(kg K)

Calor de fusión del hielo  $L_f = 334 \cdot 10^3$  J/kg

Calor específico del agua  $c = 4190$  J/(kg K) = 1 cal/(g°C)

Calor de vaporización del agua  $L_v = 2260 \cdot 10^3$  J/kg



### Material y equipo:

- Calorímetro
- Termómetro de mercurio
- Vaso de precipitados
- Multímetro
- Cronómetro

### CUESTIONARIO

- 1.- ¿Qué es el calor latente y cuál el calor sensible?  
¿Cómo determinaría cada uno de ellos?
- 2.- ¿Qué es la capacidad calorífica, calor específico a presión constante y en qué unidades se mide?
- 3.- Mencione tres calores latentes.
- 4.- Calcule el calor sensible del agua
- 5.- Calcule el calor latente
- 6.- Compare el valor obtenido del calor latente con el que aparece en la tabla
- 7.- Calcule el calor específico del agua (C) en cal y en Joules.

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 9

### COMBUSTIÓN

#### **Objetivo:**

- Plantear, desarrollar y calcular el balance de materia de una reacción de combustión.

#### **Introducción:**

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia o mezcla de sustancias llamada combustible con el oxígeno. Es característica de esta reacción la formación de una llama, que es la masa gaseosa incandescente que emite luz y calor, que esta en contacto con la sustancia combustible.

La reacción de combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o bien con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno, llamada comburente, siendo el aire atmosférico el comburente más habitual.

La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas entre las cuales las más comunes son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Se denominan en forma genérica productos, humos o gases de combustión. Es importante destacar que el combustible solo reacciona con el oxígeno y no con el nitrógeno, el otro componente del aire. Por lo tanto el nitrógeno del aire pasará íntegramente a los productos de combustión sin reaccionar.



#### **Tipos de gases producidos en la combustión y sus consecuencias**

Los gases emitidos por un motor de combustión interna de gasolina son, principalmente, de dos tipos: inofensivos y contaminantes. Los primeros están formados, fundamentalmente, por nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua e hidrógeno. Los segundos o contaminantes están formados, fundamentalmente, por el monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y plomo.



*Figura 9.1. Humos en el escape de un automóvil*

### **Inofensivos**

El nitrógeno es un gas inerte que se encuentra presente en el aire que respiramos en una concentración del 79%. Debido a las altas temperaturas existentes en el motor, el nitrógeno se oxida formando pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno, aunque sea un gas inerte a temperatura ambiente.

El oxígeno es uno de los elementos indispensables para la combustión y se encuentra presente en el aire en una concentración del 21%. Si su mezcla es demasiado rica o demasiado pobre, el Oxígeno no podrá oxidar todos los enlaces de Hidrocarburos y será expulsado con el resto de los gases de escape.

El vapor de agua se produce como consecuencia de la combustión, mediante la oxidación del hidrógeno, y se libera junto con los gases de escape.

El dióxido de carbono producido por la combustión completa del carbono no resulta nocivo para los seres vivos y constituye una fuente de alimentación para las plantas verdes, gracias a la fotosíntesis. Se produce como consecuencia lógica de la combustión, es decir, cuanto mayor es su concentración, mejor es la combustión. Sin embargo, un incremento desmesurado de la concentración de Dióxido de Carbono en la atmósfera puede producir variaciones climáticas a gran escala (el llamado efecto invernadero).



### **Contaminantes**

El monóxido de carbono, en concentraciones altas y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la Hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo, en carboxihemoglobina, incapaz de cumplir esa función. Por eso, concentraciones superiores de CO al 0.3 % en volumen resultan mortales.

La falta de oxígeno en la combustión hace que ésta no se produzca completamente y se forme monóxido de carbono en lugar de Dióxido de Carbono. En un vehículo, la aparición de mayores concentraciones en el escape de CO indican la existencia de una mezcla inicial rica o falta de oxígeno.

Los hidrocarburos, dependiendo de su estructura molecular, presentan diferentes efectos nocivos.

El benceno, por ejemplo, es venenoso por sí mismo, y la exposición a este gas provoca irritaciones de piel, ojos y conductos respiratorios; si el nivel es muy alto, provocará depresiones, mareos, dolores de cabeza y náuseas. El Benceno es uno de los múltiples causantes de cáncer. Su presencia se debe a los componentes

incombustibles de la mezcla o a las reacciones intermedias del proceso de combustión, las cuales son también responsables de la producción de Aldehídos y Fenoles.

La presencia simultánea de Hidrocarburos, Oxidos de Nitrógeno, rayos ultravioleta y la estratificación atmosférica conduce a la formación del smog fotoquímico, de consecuencias muy graves para la salud de los seres vivos.

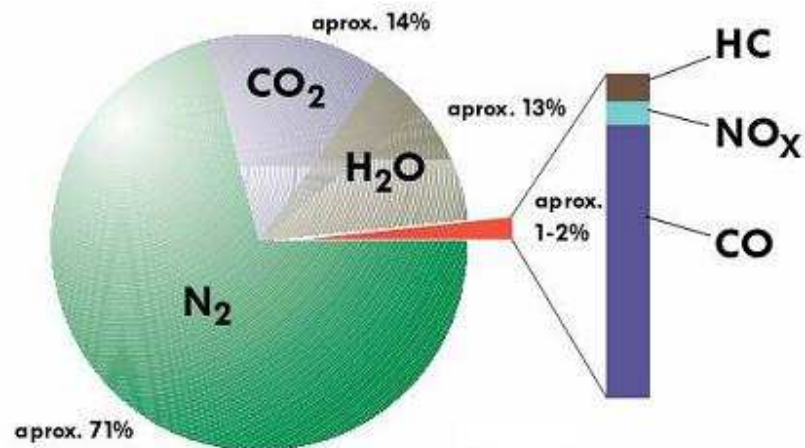
Los óxidos de Nitrógeno no sólo irritan la mucosa sino que en combinación con los Hidrocarburos contenidos en el smog y con la humedad del aire producen ácidos Nitrosos, que posteriormente caen sobre la tierra en forma de lluvia ácida y contaminan grandes áreas, algunas veces situadas a cientos de kilómetros del lugar de origen de la contaminación.

El plomo es el metal más peligroso contenido en los aditivos del combustible. Inhalado puede provocar la formación de á coágulos o trombos en la sangre, de gravísimas consecuencias patológicas. Se encuentra presente en las gasolinas en forma de tetra-etilo de Plomo y se utiliza en su producción para elevar su índice de octano y, también, en motorizaciones antiguas como

lubricante de los asientos de válvulas. En las gasolinas sin plomo se ha sustituido este metal por otros componentes menos contaminantes que también proporcionan un alto índice de octano.

### Composición de los gases de escape en motores de gasolina

En la figura 10.2 se muestra la composición química típica de los gases de escape en un motor a gasolina



*Figura 9.2. Composición química típica de los gases de escape en un motor a gasolina*

En las tablas 10.1, 10.2 y 10.3 se proporciona el poder calorífico y otras propiedades de los combustibles fósiles más utilizados

Tabla 9.1.

COMBUSTIBLE	FORMULA	PESO MOLECULAR	PODER CALORIFICO MAYOR (MJ/Kg)	PODER CALORIFICO MENOR (MJ/Kg)
Hidrógeno gas	H <sub>2</sub>	2	143.4	120.9
Metano	CH <sub>4</sub>	16	55.8	50.2
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	50.6	46.5
Butano		58	49.5	45.6
Fuel Oil			44.0	41.8
Petroleo			44.0	41.8
Keroseno	CH <sub>2</sub>	14	43.0	39.8
Fuel oil residual (pesado)			44-45	37-42
Orimulsión			43.0	40.0
Diesel			42.0	38.5
Carbono	C	12	28.0	28.0
Gas ciudad			32.0	
Coque			26-35	
Antraccita			29.9	
Hulla			26-32	

Tabla 9.2.

Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Aceite de esquistos	-----	38830	Fuel-oil n°1	40600	42695
Alcohol comercial	23860	26750	Fuel-oil n°2	39765	41860
Alquitrán de hulla	-----	37025	Gasóleo <sup>1)</sup>	42275	43115
Alquitrán de madera	36420	-----	Gasolina <sup>2)</sup>	43950	46885
Etanol puro <sup>4)</sup>	26790	29720	Petróleo bruto	40895	47970
Metanol <sup>4)</sup>	19250	-----	Queroseno <sup>3)</sup>	43400	46500

Tabla 9.3.

Combustible	Densidad kg/m <sup>3</sup>	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	Densidad kg/m <sup>3</sup>	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Gas natural	(*)	39900	44000	Gas de agua	0'711	14000	16000
Gas de hulla	0'50		46900	Gas ciudad	0'650	26000	28000
Gas de coquería	0'56	31400	35250	Gas de agua carburado	0'776	26400	27200
Gas de aire	----	10000	12000	Propano	506 (l) 1'85 (g)	46350	50450
Hidrógeno	0'0899	120011	141853	Butano	580 (l) 2'4 (g)	45790	49675

**CUESTIONARIO.**

- 1.- ¿Qué se entiende por combustión?
- 2.- Generalmente, ¿cuáles son los productos de combustión de los motores?
- 3.- Si se quema 1 kmol de butano, establezca:
  - a) La ecuación de combustión.
  - b) La relación aire/combustible ideal
  - c) Los moles de  $N_2$  presentes
- 4.- ¿Por qué es inconveniente un exceso de aire en un proceso de combustión?
- 5.- ¿Qué se entiende por:
  - a) Temperatura de inflamación
  - b) Temperatura de ignición.
- 6.- ¿Qué es la potencia calorífica de un combustible?
- 7.- Describa el ciclo Otto
- 8.- Describa el ciclo Diesel
- 9.- ¿Por qué no son necesarias las bujías en un motor Diesel?
- 10.- Diga si es más eficiente el motor Diesel o gasolina.
- 11.- ¿Para qué sirve un turboalimentador?
- 12.- ¿Qué tipos de combustión existen?

# LABORATORIO DE TERMODINÁMICA

## PRACTICA NO. 10

### USO DE LAS TABLAS DE VAPOR Y DIAGRAMA DE MOLLIER

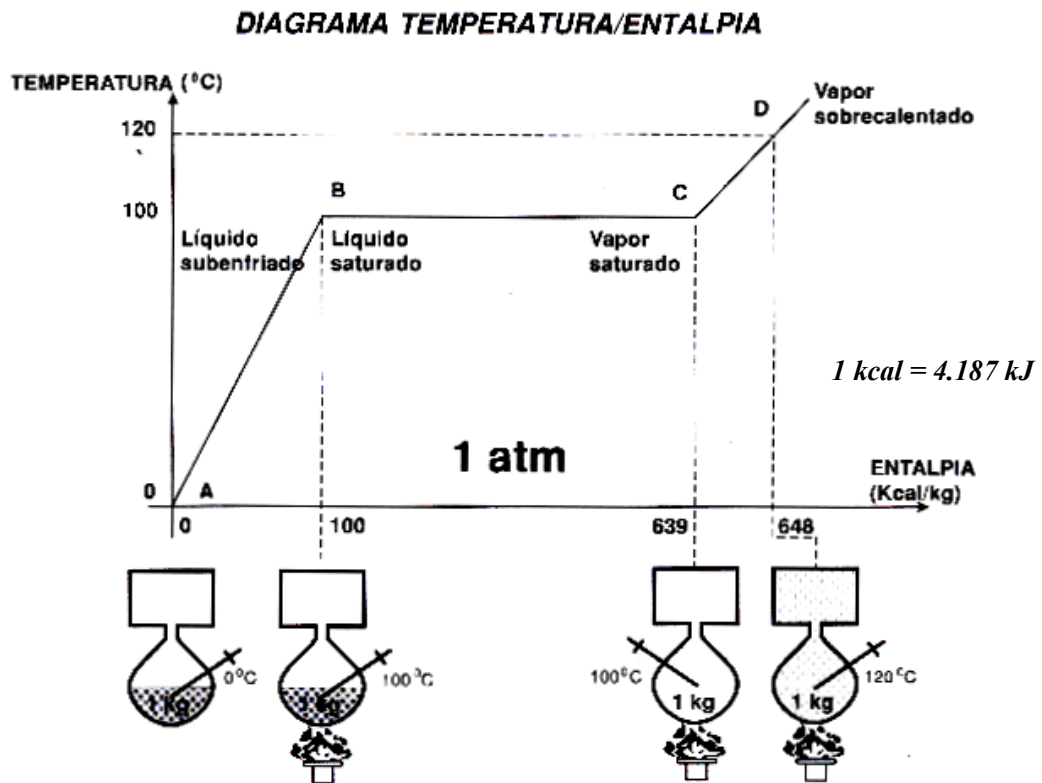
#### **Objetivo:**

- El alumno será capaz de utilizar las tablas de vapor y el diagrama de Mollier para vapores.

#### **Introducción:**

El conocimiento y evaluación de las propiedades termodinámicas del agua y del vapor de agua en sus distintos estados es fundamental para la resolución de los problemas en los que esta sustancia se encuentra implicada. De todas ellas, la entalpía es la más importante, ya que la mayoría de los procesos efectúan a presión constante.

Para poder evaluarla es preciso tomar un nivel de referencia, asignándose un valor de entalpía igual a cero al agua líquida en las condiciones de punto triple, es decir a  $0.01^{\circ}\text{C}$ . A efectos prácticos, puede tomarse también el nivel de referencia en  $0^{\circ}\text{C}$ , como se muestra en la figura 8.1. Debe decirse que los valores de la entalpía y otras propiedades se encuentran recogidos en tablas que se muestran mas adelante.



*Figura 10.1. Diagrama Temperatura entalpía para el agua.*

La entalpía del agua líquida saturada es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 kg de agua desde 0.01 °C hasta su temperatura de ebullición a una presión determinada. Se simboliza como  $h_f$ .

La entalpía de vaporización es la cantidad de calor necesaria para convertir 1 kg de agua líquida saturada en vapor saturado y seco. Su valor disminuye con el aumento de temperatura y se hace cero en el estado crítico. Se designa como  $h_{fg}$ .

La entalpía de un vapor saturado y seco es la suma de las dos anteriores:

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

La entalpía de un vapor de agua húmedo se define como la cantidad de calor necesaria para obtener 1 kg de vapor húmedo a partir de 1 kg de agua líquida saturada a 0.01 °C. Su valor es menor que el anterior  $h_g$ , pudiéndose escribir en función del título o calidad del vapor:

$$h = h_f + X \cdot h_{fg} = (1-X) \cdot h_f + X \cdot h_g$$

Esta ecuación es válida para el cálculo de cualquier otra propiedad termodinámica en función del título, si bien, para el caso del volumen específico de un vapor húmedo se puede simplificar, ya que la contribución de la fase líquida en el volumen total puede despreciarse, así:

$$v \approx X.v_g$$

Para el vapor de agua sobrecalentado, la entalpía puede calcularse de acuerdo a la expresión siguiente:

$$h_s = h_g + c_{p,v} (\Delta T)$$

Siendo  $c_{p,v}$  la capacidad calorífica media del vapor entre las temperaturas consideradas, y  $\Delta T$  el grado de sobrecalentamiento.

Finalmente, las propiedades del agua líquida comprimida no difieren de las del agua líquida saturada a la misma temperatura para presiones no superiores a 20 bar, aproximadamente, por lo que pueden utilizarse valores de esta última.

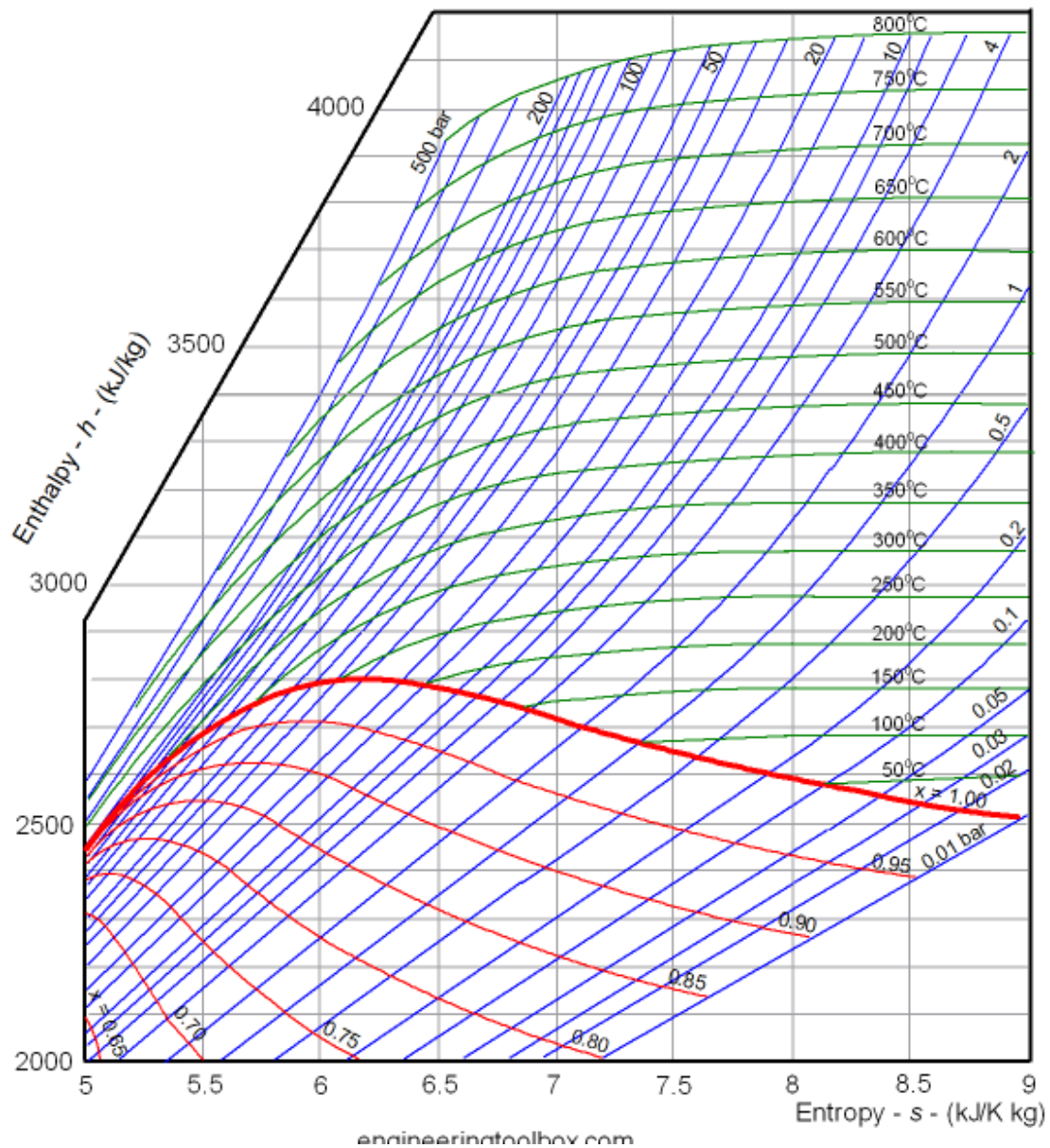
Todas estas propiedades, como ya se indicó, se encuentran recogidas en tablas, pero para el caso del agua, también lo están en forma de diagrama conocido como de Mollier, figura 10.2, el cual es un diagrama en las coordenadas entalpía-entropía, en las que se incluyen también las líneas de presión y temperatura constante, las de vapor y el líquido saturados, las de recalentamiento constante y las de volumen específico constante. Como con cualquier diagrama de propiedades, la localización de las mismas es inmediata, si bien el grado de exactitud en su uso es inferior al conseguido a partir de los datos tabulados, de todos modos, es muy empleado en todos los problemas en los que interviene el agua en sus estados líquido y vapor.

Se define al título  $x$  del vapor como:

$$x = \frac{\text{Masa Vapor saturado}}{\text{liq. + vap. satur.}}$$

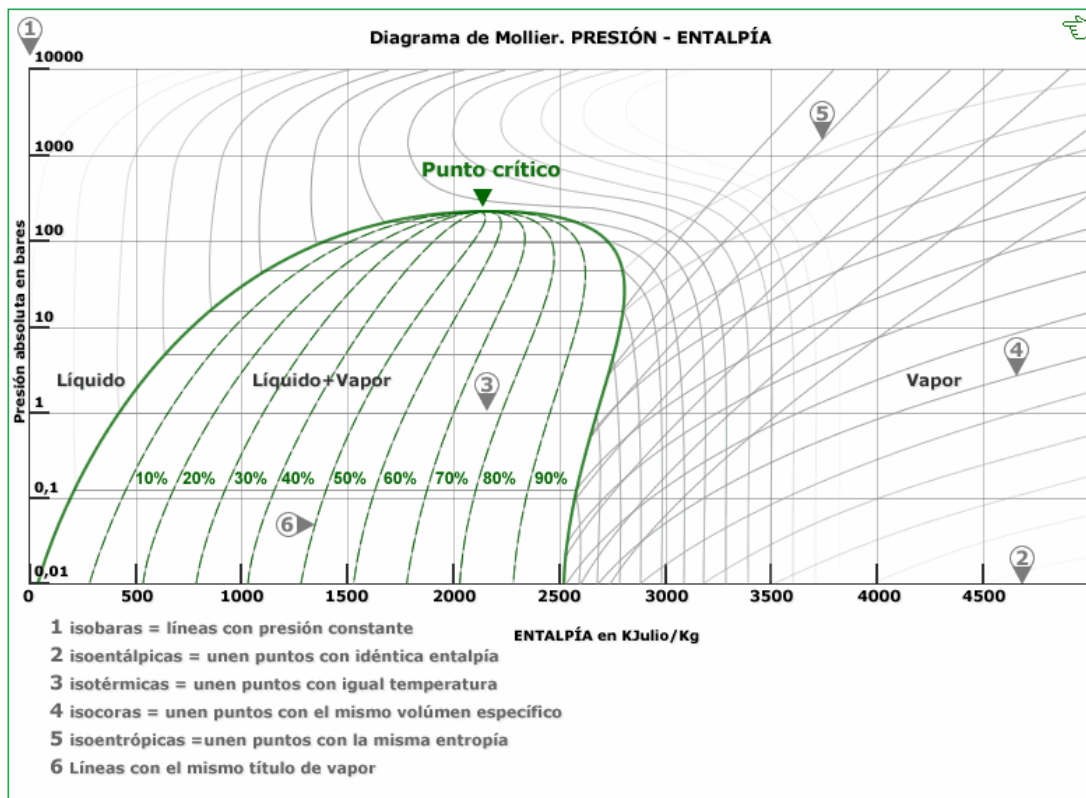
No olvidar que un líquido está saturado cuando está en equilibrio con su fase vapor. Asimismo el vapor está saturado cuando está en equilibrio con la fase líquida. Por lo tanto el concepto de título representa la fracción de vapor saturado que existe en una masa unitaria de líquido y vapor saturado.

El concepto de título *no* tiene sentido fuera de la campana de cambio de fase.



*Figura 10.2. El diagrama de Mollier es útil cuando se analiza el rendimiento cuando se analizan procesos adiabáticos de flujo estable, como es el flujo en toberas, difusores, turbinas y compresores.*





*Figura 10.3. Diagrama de Mollier Presión-entalpía*

Tabla 10.1. Vapor de agua saturado (según la presión)

P (bar)	T (C)	$v'$ (m <sup>3</sup> /kg)	$v''$ (m <sup>3</sup> /kg)	$h'$ (kJ/kg)	$h''$ (kJ/kg)	$s'$ (kJ/kgK)	$s''$ (kJ/kgK)
0.01000	6.9696	0.0010001	129.18	29.299	2513.7	0.10591	8.9749
0.01500	13.019	0.0010007	87.959	54.683	2524.7	0.19556	8.8270
0.02000	17.495	0.0010014	66.987	73.428	2532.9	0.26056	8.7226
0.02500	21.077	0.0010021	54.240	88.420	2539.4	0.31182	8.6420
0.03000	24.079	0.0010028	45.653	100.98	2544.8	0.35429	8.5764
0.03500	26.672	0.0010035	39.466	111.82	2549.5	0.39061	8.5211
0.04000	28.960	0.0010041	34.791	121.39	2553.7	0.42239	8.4734
0.04500	31.012	0.0010047	31.131	129.96	2557.4	0.45069	8.4313
0.05000	32.874	0.0010053	28.185	137.75	2560.7	0.47620	8.3938
0.05500	34.581	0.0010059	25.762	144.88	2563.8	0.49945	8.3599
0.06000	36.159	0.0010065	23.733	151.48	2566.6	0.52082	8.3290
0.06500	37.627	0.0010070	22.009	157.61	2569.3	0.54060	8.3007
0.07000	39.000	0.0010075	20.524	163.35	2571.7	0.55903	8.2745
0.07500	40.290	0.0010080	19.233	168.75	2574.0	0.57627	8.2501
0.08000	41.509	0.0010085	18.099	173.84	2576.2	0.59249	8.2273
0.08500	42.663	0.0010089	17.095	178.67	2578.3	0.60780	8.2060
0.09000	43.761	0.0010094	16.199	183.25	2580.2	0.62230	8.1858
0.09500	44.807	0.0010098	15.396	187.63	2582.1	0.63607	8.1668
0.10000	45.806	0.0010103	14.670	191.81	2583.9	0.64920	8.1488
0.20000	60.058	0.0010172	7.6480	251.42	2608.9	0.83202	7.9072
0.30000	69.095	0.0010222	5.2284	289.27	2624.5	0.94407	7.7675
0.40000	75.857	0.0010264	3.9930	317.62	2636.1	1.0261	7.6690
0.50000	81.317	0.0010299	3.2400	340.54	2645.2	1.0912	7.5930
0.60000	85.926	0.0010331	2.7317	359.91	2652.9	1.1454	7.5311
0.70000	89.932	0.0010359	2.3648	376.75	2659.4	1.1921	7.4790
0.80000	93.486	0.0010385	2.0871	391.71	2665.2	1.2330	7.4339
0.90000	96.687	0.0010409	1.8694	405.20	2670.3	1.2696	7.3943
1.0000	99.606	0.0010432	1.6939	417.50	2674.9	1.3028	7.3588
1.0000	99.606	0.0010432	1.6939	417.50	2674.9	1.3028	7.3588
1.5000	111.35	0.0010527	1.1593	467.13	2693.1	1.4337	7.2230
2.0000	120.21	0.0010605	0.88568	504.70	2706.2	1.5302	7.1269
2.5000	127.41	0.0010672	0.71866	535.34	2716.5	1.6072	7.0524
3.0000	133.52	0.0010732	0.60576	561.43	2724.9	1.6717	6.9916
3.5000	138.86	0.0010786	0.52418	584.26	2732.0	1.7274	6.9401
4.0000	143.61	0.0010836	0.46238	604.65	2738.1	1.7765	6.8955
4.5000	147.90	0.0010882	0.41390	623.14	2743.4	1.8205	6.8560
5.0000	151.83	0.0010925	0.37481	640.09	2748.1	1.8604	6.8207
5.5000	155.46	0.0010967	0.34260	655.76	2752.3	1.8970	6.7886
6.0000	158.83	0.0011006	0.31558	670.38	2756.1	1.9308	6.7592
6.5000	161.98	0.0011044	0.29259	684.08	2759.6	1.9623	6.7322
7.0000	164.95	0.0011080	0.27277	697.00	2762.8	1.9918	6.7071
7.5000	167.75	0.0011114	0.25551	709.24	2765.6	2.0195	6.6836
8.0000	170.41	0.0011148	0.24034	720.86	2768.3	2.0457	6.6616
8.5000	172.94	0.0011180	0.22689	731.95	2770.8	2.0705	6.6409
9.0000	175.35	0.0011212	0.21489	742.56	2773.0	2.0940	6.6213
9.5000	177.66	0.0011242	0.20410	752.74	2775.1	2.1165	6.6027
10.000	179.88	0.0011272	0.19436	762.52	2777.1	2.1381	6.5850
10.000	179.88	0.0011272	0.19436	762.52	2777.1	2.1381	6.5850
11.000	184.06	0.0011330	0.17745	781.03	2780.6	2.1785	6.5520
12.000	187.96	0.0011385	0.16326	798.33	2783.7	2.2159	6.5217
13.000	191.60	0.0011438	0.15119	814.60	2786.5	2.2508	6.4936
14.000	195.04	0.0011489	0.14078	829.97	2788.8	2.2835	6.4675
15.000	198.29	0.0011539	0.13171	844.56	2791.0	2.3143	6.4430
16.000	201.37	0.0011587	0.12374	858.46	2792.8	2.3435	6.4199
17.000	204.31	0.0011634	0.11667	871.74	2794.5	2.3711	6.3981
18.000	207.11	0.0011679	0.11037	884.47	2795.9	2.3975	6.3775
19.000	209.80	0.0011724	0.10470	896.71	2797.2	2.4227	6.3578
20.000	212.38	0.0011767	0.099585	908.50	2798.3	2.4468	6.3390
21.000	214.86	0.0011810	0.094938	919.87	2799.3	2.4699	6.3210

Tabla 10.2. Vapor y agua saturado (temperatura)

Temp (°C)	Presión (bar)	$v'$ (m <sup>3</sup> /kg)	$v''$ (m <sup>3</sup> /kg)	$h'$ (kJ/kg)	$h''$ (kJ/kg)	$s'$ (kJ/kgK)	$s''$ (kJ/kgK)
0.01	0.0061120	0.0010002	206.2	0	250.16	0	9.1575
1.0000	0.0065709	0.0010001	192.44	4.1767	2502.7	0.015260	9.1291
2.0000	0.0070599	0.0010001	179.76	8.3918	2504.6	0.030607	9.1027
3.0000	0.0075808	0.0010001	168.01	12.604	2506.4	0.045888	9.0765
4.0000	0.0081355	0.0010001	157.12	16.813	2508.2	0.061103	9.0505
5.0000	0.0087258	0.0010001	147.01	21.020	2510.1	0.076254	9.0248
6.0000	0.0093536	0.0010001	137.63	25.224	2511.9	0.091342	8.9993
7.0000	0.010021	0.0010001	128.92	29.426	2513.7	0.10637	8.9741
8.0000	0.010730	0.0010002	120.83	33.627	2515.6	0.12133	8.9491
9.0000	0.011483	0.0010003	113.30	37.825	2517.4	0.13624	8.9243
10.000	0.012282	0.0010003	106.30	42.021	2519.2	0.15109	8.8998
11.000	0.013130	0.0010004	99.787	46.216	2521.0	0.16587	8.8754
12.000	0.014028	0.0010005	93.719	50.409	2522.9	0.18061	8.8513
13.000	0.014981	0.0010007	88.064	54.601	2524.7	0.19528	8.8274
14.000	0.015990	0.0010008	82.793	58.792	2526.5	0.20990	8.8037
15.000	0.017058	0.0010009	77.875	62.981	2528.3	0.22446	8.7803
16.000	0.018188	0.0010011	73.286	67.170	2530.2	0.23897	8.7570
17.000	0.019384	0.0010013	69.001	71.357	2532.0	0.25343	8.7339
18.000	0.020647	0.0010014	64.998	75.544	2533.8	0.26783	8.7111
19.000	0.021983	0.0010016	61.256	79.729	2535.6	0.28218	8.6884
20.000	0.023393	0.0010018	57.757	83.914	2537.4	0.29648	8.6660
21.000	0.024882	0.0010021	54.483	88.098	2539.3	0.31073	8.6437
22.000	0.026453	0.0010023	51.418	92.282	2541.1	0.32493	8.6217
23.000	0.028111	0.0010025	48.548	96.465	2542.9	0.33908	8.5998
24.000	0.029858	0.0010028	45.858	100.65	2544.7	0.35318	8.5781
25.000	0.031699	0.0010030	43.337	104.83	2546.5	0.36722	8.5566
26.000	0.033639	0.0010033	40.973	109.01	2548.3	0.38123	8.5353
27.000	0.035681	0.0010035	38.754	113.19	2550.1	0.39518	8.5142
28.000	0.037831	0.0010038	36.672	117.37	2551.9	0.40908	8.4933
29.000	0.040092	0.0010041	34.716	121.55	2553.7	0.42294	8.4725
30.000	0.042470	0.0010044	32.878	125.73	2555.5	0.43675	8.4520
31.000	0.044969	0.0010047	31.151	129.91	2557.3	0.45052	8.4316
32.000	0.047596	0.0010050	29.526	134.09	2559.2	0.46424	8.4113
33.000	0.050354	0.0010054	27.998	138.27	2561.0	0.47792	8.3913
34.000	0.053251	0.0010057	26.560	142.45	2562.8	0.49155	8.3714
35.000	0.056290	0.0010060	25.205	146.63	2564.5	0.50513	8.3517
36.000	0.059479	0.0010064	23.929	150.81	2566.3	0.51867	8.3321
37.000	0.062823	0.0010068	22.727	154.99	2568.1	0.53217	8.3127
38.000	0.066328	0.0010071	21.593	159.17	2569.9	0.54562	8.2935
39.000	0.070002	0.0010075	20.524	163.35	2571.7	0.55903	8.2745
40.000	0.073849	0.0010079	19.515	167.53	2573.5	0.57240	8.2555
41.000	0.077878	0.0010083	18.563	171.71	2575.3	0.58573	8.2368
42.000	0.082096	0.0010087	17.664	175.89	2577.1	0.59901	8.2182
43.000	0.086508	0.0010091	16.814	180.07	2578.9	0.61225	8.1998
44.000	0.091124	0.0010095	16.011	184.25	2580.6	0.62545	8.1815
45.000	0.095950	0.0010099	15.252	188.43	2582.4	0.63861	8.1633
46.000	0.10099	0.0010104	14.534	192.62	2584.2	0.65173	8.1453
47.000	0.10627	0.0010108	13.855	196.80	2586.0	0.66481	8.1275
48.000	0.11177	0.0010112	13.212	200.98	2587.8	0.67785	8.1098
49.000	0.11752	0.0010117	12.603	205.16	2589.5	0.69085	8.0922

→ Continuación ..

Temp (°C)	Presión (bar)	v' (m <sup>3</sup> /kg)	v'' (m <sup>3</sup> /kg)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kgK)	s'' (kJ/kgK)
50.000	0.12352	0.0010121	12.027	209.34	259.13	0.70381	8.0748
51.000	0.12978	0.0010126	11.481	213.52	2593.1	0.71673	8.0576
52.000	0.13631	0.0010131	10.963	217.71	2594.8	0.72961	8.0404
53.000	0.14312	0.0010136	10.472	221.89	2596.6	0.74245	8.0234
54.000	0.15022	0.0010141	10.006	226.07	2598.3	0.75526	8.0066
55.000	0.15762	0.0010146	9.5643	230.26	2600.1	0.76802	7.9898
56.000	0.16533	0.0010151	9.1448	234.44	2601.8	0.78075	7.9732
57.000	0.17336	0.0010156	8.7466	238.62	2603.6	0.79344	7.9568
58.000	0.18171	0.0010161	8.3683	242.81	2605.3	0.80610	7.9404
59.000	0.19041	0.0010166	8.0089	246.99	2607.1	0.81871	7.9242
60.000	0.19946	0.0010171	7.6672	251.18	2608.8	0.83129	7.9081
61.000	0.20888	0.0010177	7.3424	255.37	2610.6	0.84384	7.8922
62.000	0.21867	0.0010182	7.0335	259.55	2612.3	0.85634	7.8764
63.000	0.22885	0.0010188	6.7396	263.74	2614.0	0.86882	7.8607
64.000	0.23943	0.0010193	6.4598	267.93	2615.8	0.88125	7.8451
65.000	0.25042	0.0010199	6.1935	272.12	2617.5	0.89365	7.8296
66.000	0.26183	0.0010204	5.9399	276.30	2619.2	0.90602	7.8142
67.000	0.27368	0.0010210	5.6984	280.49	2621.0	0.91835	7.7990
68.000	0.28599	0.0010216	5.4682	284.68	2622.7	0.93064	7.7839
69.000	0.29876	0.0010222	5.2488	288.87	2624.4	0.94291	7.7689
70.000	0.31201	0.0010228	5.0395	293.07	2626.1	0.95513	7.7540
71.000	0.32575	0.0010234	4.8400	297.26	2627.8	0.96733	7.7392
72.000	0.34000	0.0010240	4.6496	301.45	2629.5	0.97949	7.7246
73.000	0.35478	0.0010246	4.4680	305.64	2631.2	0.99161	7.7100
74.000	0.37009	0.0010252	4.2945	309.84	2632.9	1.0037	7.6955
75.000	0.38595	0.0010258	4.1289	314.03	2634.6	1.0158	7.6812
76.000	0.40239	0.0010265	3.9708	318.22	2636.3	1.0278	7.6670
77.000	0.41941	0.0010271	3.8197	322.42	2638.0	1.0398	7.6528
78.000	0.43703	0.0010277	3.6752	326.62	2639.7	1.0517	7.6388
79.000	0.45527	0.0010284	3.5372	330.81	2641.3	1.0637	7.6249
80.000	0.47414	0.0010291	3.4052	335.01	2643.0	1.0756	7.6111
81.000	0.49367	0.0010297	3.2789	339.21	2644.7	1.0874	7.5973
82.000	0.51387	0.0010304	3.1581	343.41	2646.4	1.0993	7.5837
83.000	0.53476	0.0010311	3.0425	347.61	2648.0	1.1111	7.5702
84.000	0.55635	0.0010317	2.9318	351.81	2649.7	1.1229	7.5567
85.000	0.57867	0.0010324	2.8258	356.01	2651.3	1.1346	7.5434
86.000	0.60173	0.0010331	2.7244	360.22	2653.0	1.1463	7.5302
87.000	0.62556	0.0010338	2.6271	364.42	2654.6	1.1580	7.5170
88.000	0.65017	0.0010345	2.5340	368.63	2656.3	1.1696	7.5040
89.000	0.67558	0.0010352	2.4447	372.83	2657.9	1.1813	7.4910
90.000	0.70182	0.0010360	2.3591	377.04	2659.5	1.1929	7.4781
91.000	0.72890	0.0010367	2.2770	381.25	2661.2	1.2044	7.4653
92.000	0.75684	0.0010374	2.1982	385.46	2662.8	1.2160	7.4526
93.000	0.78568	0.0010381	2.1227	389.67	2664.4	1.2275	7.4400
94.000	0.81541	0.0010389	2.0502	393.88	2666.0	1.2389	7.4275
95.000	0.84608	0.0010396	1.9806	398.09	2667.6	1.2504	7.4151
96.000	0.87771	0.0010404	1.9137	402.30	2669.2	1.2618	7.4027
97.000	0.91030	0.0010411	1.8496	406.52	2670.8	1.2732	7.3904
98.000	0.94390	0.0010419	1.7879	410.73	2672.4	1.2846	7.3783
99.000	0.97852	0.0010427	1.7287	414.95	2674.0	1.2959	7.3661
100.00	1.0142	0.0010435	1.6718	419.17	2675.6	1.3072	7.3541



Tabla 10.3. Vapor sobrecalentado.

T (°C)	P=0.1 bar				P=0.5 bar				P=1 bar				P=4 bar				
	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
Tsat	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2400	2483.2	2645.2	7.5930	1.6939	2505.6	2674.9	7.3588	0.46238	2553.1	2738.1	6.8955	
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3610	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306	
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148	0.53433	2647.2	2860.9	7.1723	
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6892	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804	
200	21.826	2661.3	2879.6	8.9049	4.8206	2735.1	2976.1	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677	
250	24.136	2736.1	2977.4	9.1015	5.2840	2811.6	3075.8	8.5386	2.6388	2810.6	3074.5	8.2172	0.77264	2964.9	3273.9	7.9002	
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933	
400	31.063	2969.3	3279.9	9.6094	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8361	1.00560	3301.0	3703.2	8.4580	
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	8.0576	3303.3	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0998	1.12150	3479.0	3927.6	8.7012	
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1630	8.9812	3480.6	3929.7	9.6625	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424	1.23730	3663.9	4158.8	8.9273	
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4060	9.9047	3665.3	4160.4	9.8882	4.9519	3665.0	4160.2	9.5681	1.35300	3855.7	4396.9	9.1394	
800	49.527	3665.3	4160.6	10.6310	10.8280	3856.8	4388.2	10.1000	5.4137	3856.6	4389.0	9.7800	1.46860	4054.3	4641.7	9.3396	
900	54.142	3856.9	4388.3	10.8430	11.7510	4055.1	4642.7	10.3000	5.8754	4055.0	4642.6	9.9800	1.58400	4256.5	4890.2	9.5256	
1000	58.758	4055.2	4642.8	11.0430	12.6740	4257.4	4891.1	10.4859	6.3370	4257.3	4891.0	10.1659	1.69960	4467.0	5146.8	9.7060	
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	13.5970	4467.8	5147.7	10.6662	6.7990	4467.7	5147.6	10.3463	1.81510	4683.5	5409.5	9.8780	
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	14.5210	4683.6	5409.6	10.8382	7.2600	4683.5	5409.5	10.5183					
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811													

T (°C)	P=0.1 bar				P=0.5 bar				P=1 bar				P=4 bar			
	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2400	2483.2	2645.2	7.5930	1.6939	2505.6	2674.9	7.3588	0.46238	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63401	2571.0	2761.2	7.0791	0.63401	2571.0	2761.2	7.0791	0.71642	2651.0	2865.9	7.3131
200	1.09050	2654.6	2870.7	7.5081	0.71642	2651.0	2865.9	7.3131	0.71642	2651.0	2865.9	7.3131	0.79644	2728.9	2967.9	7.5180
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79644	2728.9	2967.9	7.5180	0.79644	2728.9	2967.9	7.5180	0.87534	2807.0	3069.6	7.7037
300	1.31620	2808.8	3072.1	7.8941	0.87534	2807.0	3069.6	7.7037	0.87534	2807.0	3069.6	7.7037	0.95424	2886.1	3171.3	7.8784
400	1.54930	2967.1	3277.0	8.2236	1.03150	2966.0	3275.5	8.0347	1.03150	2966.0	3275.5	8.0347	1.11040	3045.1	3370.0	8.2034
500	1.78140	3131.4	3487.7	8.5152	1.18670	3130.6	3486.6	8.3271	1.18670	3130.6	3486.6	8.3271	1.26530	3114.1	3678.7	8.5081
600	2.01300	3302.2	3704.8	8.7792	1.34140	3301.6	3704.0	8.5914	1.34140	3301.6	3704.0	8.5914	1.42030	3183.1	3986.8	8.7930
700	2.24430	3479.9	3928.8	9.0220	1.49580	3479.5	3928.2	8.8344	1.49580	3479.5	3928.2	8.8344	1.57470	3252.1	4294.9	9.0379
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65000	3664.3	4159.3	9.0604	1.65000	3664.3	4159.3	9.0604	1.72990	3321.2	4603.0	9.2828
900	2.70660	3856.3	4397.6	9.4598	1.80420	3856.0	4397.3	9.2724	1.80420	3856.0	4397.3	9.2724	1.88310	3390.3	4911.1	9.5277
1000	2.93750	4054.8	4642.3	9.6599	1.95820	4054.5	4642.0	9.4726	1.95820	4054.5	4642.0	9.4726	2.03700	3459.6	5219.2	9.7726
1100	3.16800	4257.0	4890.7	9.8458	2.11210	4256.8	4890.4	9.6585	2.11210	4256.8	4890.4	9.6585	2.19090	3528.9	5527.3	9.9975
1200	3.39900	4467.5	5147.3	10.0262	2.26610	4467.2	5147.1	9.8389	2.26610	4467.2	5147.1	9.8389	2.34490	3598.2	5835.4	10.2224
1300	3.63000	4683.2	5409.3	10.1982	2.42010	4683.0	5409.0	10.0110	2.42010	4683.0	5409.0	10.0110	2.49890	3667.5	6143.5	10.4475

**CUESTIONARIO.**

- 1.- ¿ A qué se llama vapor recalentado?
- 2.- ¿Qué es entalpía de líquido y de vaporización?
- 3.- ¿Cómo puede determinarse el título de un vapor?
- 4.- ¿Cómo varía la entropía de un vapor cuando se expande en una máquina da vapor?
- 5.- ¿Cuáles propiedades varían al comprimirse los líquidos?
- 6.- ¿Cómo varía la entropía del vapor de agua húmedo con respecto al seco?
- 7.- Dibuje en coordenadas T-S el proceso de transformación de agua a vapor a una presión constante. Especifique las regiones de saturación y recalentado.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **1. Termodinámica**

Kenneth Wark

Ed. Mc Graw Hill. Sexta Edición

### **2. Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística**

*Francis W* Sears, Salinger Gerhard L

### **3. Notas del curso termodinámica para ingeniería**

Oscar A. Jaramillo Salgado

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO Centro de Investigación en Energía

Mayo 3, 2008

### **4. Introducción a la termodinámica con aplicaciones de ingeniería**

Jorge A Rodríguez.

### **5. Basic Thermodynamics For Engineers**

Smith H.J and Harris J.W

Macdonald & Co (1963)

### **6. Thermodynamics: An Engineering Approach with Student Resource DVD.**

Yunus A. Cengel and Michael A. Boles.

McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 6th edition (September 22, 2006).

### **7. Fundamentals of Engineering Thermodynamics.**

Michael J. Moran and Howard N. Shapiro.

Wiley; 5th edition (June 11, 2003).

### **8. Analysis and design of energy systems**

B.K. Hodge, Robert P. Taylor c1990

9. <http://materias.fi.uba.ar/6720/unidad11.PDF>

10. <http://joule.qfa.uam.es/beta-2.0/temario/tema1/tema1.php>

11. <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Termodinamica/Termo.pdf>