

# UA: Termodinámica

<b>Horas teóricas</b>	<b>3.0</b>
Horas prácticas	1.0
Total de horas	4.0
Créditos institucionales	7.0
Título del material	Propiedades de las sustancias puras
Tipo de unidad de aprendizaje	curso
Carácter de la unidad de aprendizaje	obligatoria
Núcleo de formación	Sustantivo
Programa educativo	Ingeniería Mecánica
Espacio académico	Facultad de Ingeniería
Responsable de la elaboración	Juan Carlos Posadas Basurto

# Índice

	Página
Presentación	1
Estructura de la unidad de aprendizaje	2
Contenido de la presentación	7
Introducción	10
Termodinámica	11
Sistemas termodinámicos	13
Sistemas cerrados	14
Sistema abierto	15
Generalidades	16
Caja negra	17
Enfoques macroscópico y microscópico	18

---

	Página
Propiedades termodinámicas	19
Propiedades específicas	20
Volumen específico molar	21
Identificación de las propiedades	22
Propiedades como función de punto	23
Diferencial exacta	24
Función de trayectoria	25
Sustancia de trabajo	26
Sustancia pura	27
Sustancia simple compresible	28
Determinación de las propiedades	29

---

	Página
Regla de las propiedades	30
Estado y proceso termodinámico	31
Equilibrio termodinámico	32
Proceso de cuasiequilibrio	33
Trayectoria del proceso cuasiestático	34
Ciclo termodinámico	35
Dimensiones y unidades	36
Prefijos y conversiones comunes	38
Bibliografía	39

# Presentación

- La unidad de aprendizaje Termodinámica es obligatoria y se sugiere cursarla en el quinto período. No tiene Unidad de Aprendizaje antecedente.
- El propósito de la Unidad de Aprendizaje es que el discente identifique los procesos termodinámicos para su análisis mediante balances de energía utilizando los conceptos, principios y métodos de la termodinámica.
- Es importante que al final del curso el discente sea capaz de analizar ciclos termodinámicos ya que en la Unidad de Aprendizaje consecuente, Ingeniería Térmica, se analizan ciclos de potencia y refrigeración.

# Estructura de la unidad de aprendizaje

1. Propiedades de las sustancias puras.
  - 1.1 Definición de sistemas, estado termodinámico, propiedad, proceso, ciclo, sistema simple compresible.
  - 1.2 Sustancia pura y fases.
  - 1.3 Procesos de cambio de fase en sustancias puras.
  - 1.4 Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase.
  - 1.5 Cálculo de propiedades termodinámicas usando tablas.
  - 1.6 Cálculo de propiedades termodinámicas con el modelo de gas ideal.
  - 1.7 Factor de compresibilidad.
  - 1.8 Ecuaciones de Estado .

## 2. Energía y primera ley de la termodinámica.

### 2.1 Energía de un sistema .

### 2.2 Energía transferida mediante trabajo de expansión o compresión.

### 2.3 Energía transferida por calor.

### 2.4 Energía interna y entalpía.

### 2.5 Calores específicos a volumen constante y a presión constante

### 2.6 Balance de masa y el volumen de control.

### 2.7 Balance de energía para un volumen de control

### 2.8 Análisis de energía para volúmenes de control en estado estacionario.

### 2.9 Análisis de varios dispositivos de interés en ingeniería

- 3. Segunda Ley de la termodinámica.
  - 3.1 Introducción a la segunda ley de la termodinámica.
  - 3.2 Máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor.
  - 3.3 Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Clausius.
  - 3.4 Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Kelvin-Planck
  - 3.5 Procesos reversibles e irreversibles.
  - 3.6 Corolarios de Carnot.
  - 3.7 Escala Kelvin de temperatura
  - 3.8 Rendimiento y ciclo de Carnot.
  - 3.9. Coeficiente de desempeño, el refrigerador de Carnot y la bomba de calor.



## 4. Entropía.

4.1 Desigualdad de Clausius.

4.2 Principio del incremento de entropía.

4.3 Obtención de valores de entropía en sustancias puras.

4.4 Procesos isoentrópicos.

4.5 Balance de entropía para sistemas cerrados.

4.6 Rendimientos isoentrópicos de turbinas, toberas, compresores y bombas.

4.7. Transferencia de calor y trabajo en procesos de flujo estacionario internamente reversible.

## 5. Exergía.

5.1 Introducción a la exergía.

5.2 Definición de exergía, trabajo reversible e irreversibilidad.

5.3 Eficiencia exergética (segunda ley).

5.4 Cambio de exergía de un sistema.

5.5 Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa.

5.6. Balance de exergía en un sistema cerrado

# Contenido de la presentación

- Comprende el inciso 1.1 del tema 1, propiedades de las sustancias puras, de la estructura de la Unidad de Aprendizaje.
- Inicia con una introducción a la aplicación de Termodinámica en las primeras máquinas de potencia.
- Se definen las diferentes regiones (sistemas) donde se analizan las propiedades de la sustancia de trabajo (sustancia pura).
- Se muestran los dos enfoques de termodinámica: estadística y clásica.
- Se definen las propiedades termodinámicas.

- Se define la sustancia de trabajo
- Se definen estado y proceso termodinámicos. Se plantea el proceso de cuasiequilibrio.
- Se definen los ciclos termodinámicos.
- Se repasan las dimensiones y unidades.
- Al final se incluye un apartado de referencias para que tanto el docente como el discente profundicen en los temas de interés.

Propiedades de las sustancias puras: definiciones

# Termodinámica

# Introducción (Smith, Ness & Abbott, 1997)

- La ciencia de la termodinámica nació en el siglo diecinueve como una necesidad de describir el funcionamiento de las máquinas de vapor y de establecer límites a lo que podían hacer.
- De observaciones se dieron principios considerados válidos para las máquinas y se generalizaron en postulados, los cuales se conocen ahora como la primera y segunda leyes de la termodinámica.
- Así, la termodinámica forma parte, junto con la mecánica y el electromagnetismo, del conjunto de leyes básicas de la física.

# Termodinámica

- La Termodinámica es una herramienta analítica teórica y práctica que interpreta fenómenos naturales desde el punto de vista de las relaciones de materia y energía.
- La palabra Termodinámica fue usada por vez primera en 1850 por W. Thomson (Lord Kelvin) como combinación de los vocablos griegos termo (calor) y dinamos (potencia o fuerza).
- La Termodinámica estudia el intercambio de energía en sus diversas formas, su interacción con los equipos, las propiedades de la materia y el uso racional de la energía.

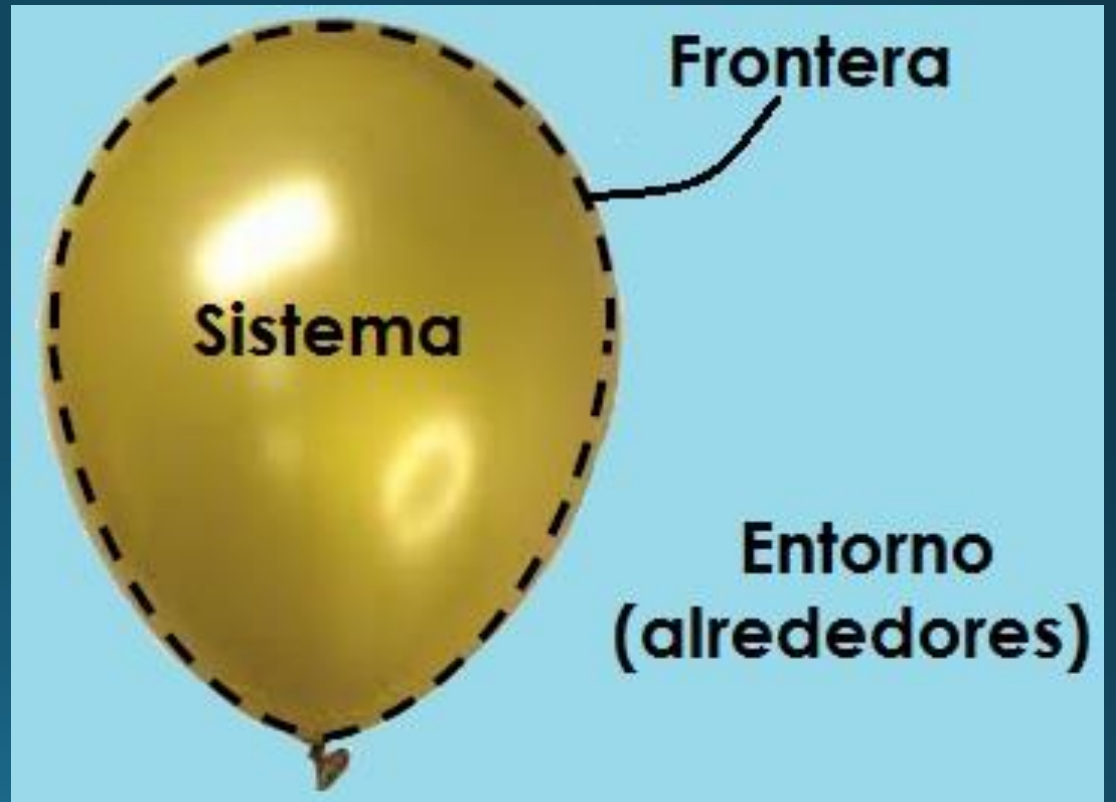
(Joel, 1996)

- Gran parte del estudio de la ingeniería termodinámica se refiere al trabajo que producen o utilizan máquinas tales como motores, turbinas y compresores junto con las sustancias utilizadas.
- Su desarrollo ha dado la capacidad de crear una sociedad industrial moderna que no podría sobrevivir sin las máquinas térmicas (Motores de gasolina o diésel, turbinas de gas, turbinas de vapor).
- Pero esto plantea muchas cuestiones éticas como la explotación de recursos naturales finitos y la contaminación atmosférica masiva.
- El estudio de la ingeniería termodinámica sigue siendo esencial.



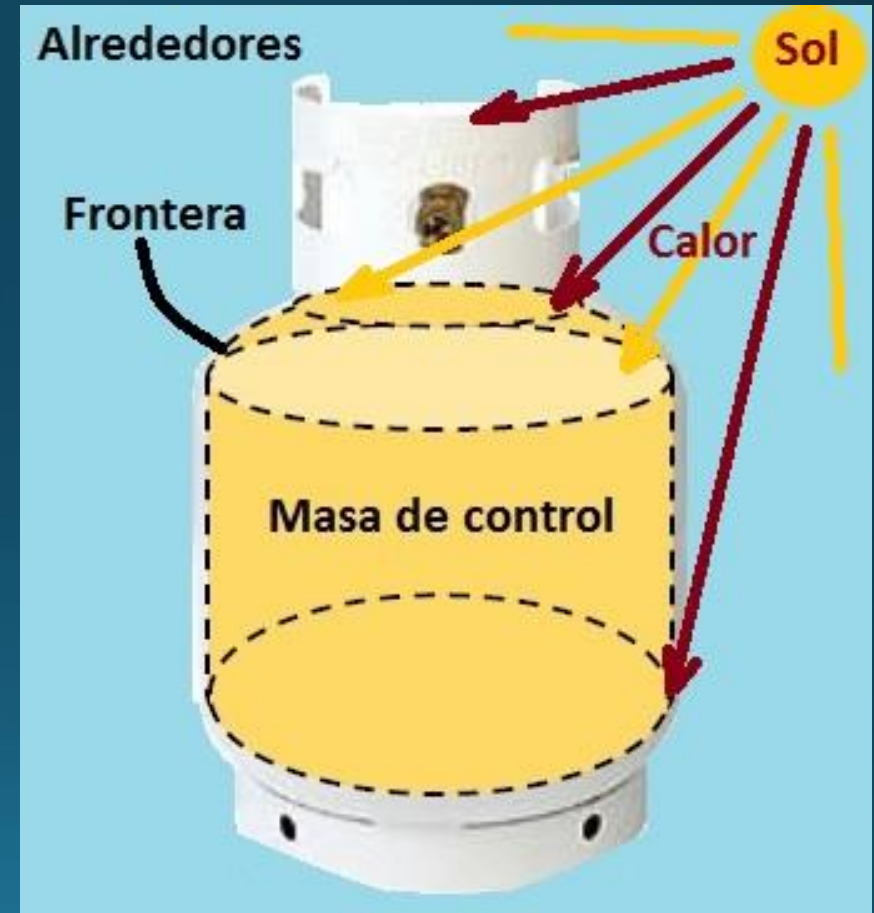
# Sistemas termodinámicos (Cengel, 2009)

- Un sistema termodinámico, o sistema, es una cantidad de materia o una región en el espacio elegida para su análisis.
- La masa o región fuera del sistema son los alrededores.
- La superficie real o imaginaria que separa al sistema de sus alrededores se llama frontera.



# Sistema cerrado

- En un sistema cerrado (masa de control) la cantidad de masa es constante y no cruza su frontera.
- Calor y trabajo pueden cruzar la frontera.
- El volumen puede cambiar y ser flexible.
- Cuando las energías tampoco cruzan la frontera, se trata de un sistema aislado



# Sistema abierto

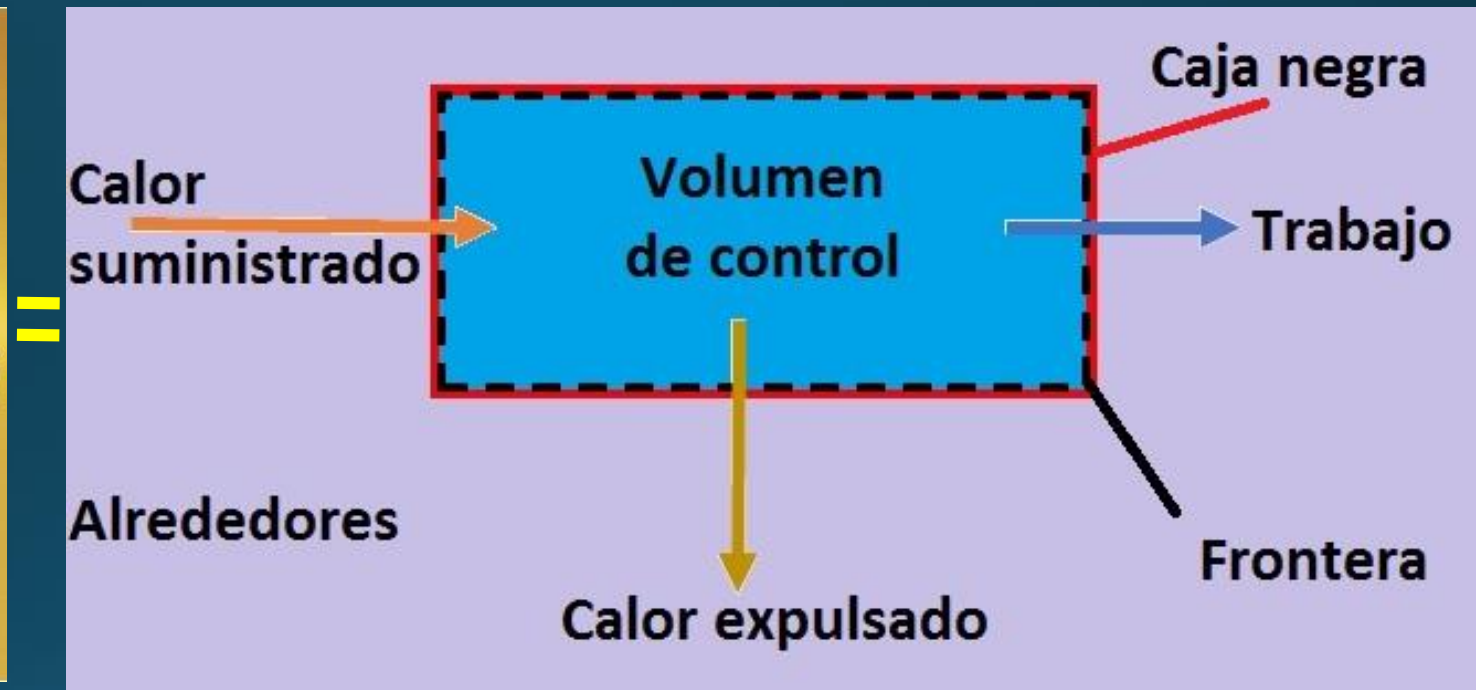
- Un sistema abierto (volumen de control) es una región elegida apropiadamente en el espacio.
- Su frontera, real o imaginaria, es atravesada por energías y masa.
- Se selecciona el volumen de control apropiado para hacer más sencillo el análisis.



# Generalidades (Moran, Shapiro, Munson, & DeWitt, 2003)

- Cuando se usan los términos masa de control y volumen de control, el límite del sistema se refiere como una superficie de control.
- La elección del límite del sistema se rige por dos consideraciones:
  1. lo que se conoce acerca de un posible sistema, particularmente en sus límites, y
  2. el objetivo del análisis.
- Con frecuencia el sistema a considerar se señala con una línea punteada en un diagrama.
- La interacción entre el sistema y los alrededores es de importancia para la termodinámica (Reynolds & Perkins, 1977).





## Caja negra (Balmer, 2011)

Uno de los aspectos de la termodinámica es su enfoque de caja negra para el análisis de sistemas. No es necesario saber lo que ocurre dentro de la caja, sólo es necesario observar los límites de la caja y ver qué, y cuánto, los cruza.

# Enfoques macroscópico y microscópico

- Los sistemas se pueden estudiar desde un punto de vista macroscópico o microscópico.
- El enfoque macroscópico se refiere al comportamiento total o global de la materia para evaluar aspectos importantes del comportamiento del sistema a partir de las observaciones.
- El enfoque microscópico se refiere directamente a la estructura de la materia. El objetivo es caracterizar estadísticamente el comportamiento medio de las partículas que componen un sistema de interés y relacionar esta información con el comportamiento macroscópico observado del sistema.

# Propiedades termodinámicas

- Una propiedad termodinámica es una característica macroscópica de un sistema termodinámico a la que se puede asignar un valor numérico en un momento dado sin conocer el comportamiento anterior (historia) del sistema.
- Las propiedades termodinámicas pueden ser extensivas e intensivas. Las propiedades extensivas (Masa y volumen) dependen del tamaño o extensión del sistema y pueden cambiar con el tiempo.
- Las propiedades intensivas (Presión y temperatura) son independientes del tamaño o extensión del sistema y pueden variar de un lugar a otro dentro del sistema en cualquier momento.

# Propiedades específicas

(Moran, Shapiro, Munson, & DeWitt, 2003)

- Una propiedad específica es una propiedad extensiva dividida entre la masa.
- Las sustancias continuas son propiedades intensivas en un punto. En cualquier instante la densidad  $\rho$  en un punto se define como

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V'} \left( \frac{m}{V} \right)$$

- Donde  $V'$  es el volumen más pequeño para considerar la materia un continuo y un punto. La masa asociada se determina por la integración

$$m = \int_{V'}^V \rho dV$$



# Volumen específico molar

(Moran, Shapiro, Munson, & DeWitt, 2003)

- El volumen específico es el recíproco de la densidad  $v = 1/\rho$ .
- La cantidad de una sustancia  $n$  se puede dar en una base molar en términos de kilomol (kmol) o de libra mol (lbmol), como

$$n = m/M$$

- Donde la masa gravitacional  $m$  está en kilogramos (libra masa) y, masa molar  $M$ , en kg / kmol (lb masa/lb mol).
- A una propiedad en base molar se le coloca una raya sobre su símbolo. Por lo tanto,  $\bar{v}$  significa el volumen por cada kmol o lbmol. Además

$$\bar{v} = Mv$$

# Identificación de las propiedades

- Comúnmente, las letras mayúsculas se usan para denotar propiedades extensivas (con excepción de la masa  $m$ ) y las minúsculas para las intensivas (con excepciones de la presión  $P$  y la temperatura  $T$ ).
- Las propiedades específicas (propiedades extensivas por cada unidad de masa) se denotan con letras minúsculas.
- Algunos ejemplos de propiedades específicas son el volumen específico ( $v = V/m$ ) y la energía total específica ( $e = E/m$ ).

# Propiedades como función de punto

- Las propiedades son función de punto y las energías térmica (calor) y mecánica (trabajo) son funciones de trayectoria.
- Supóngase que la temperatura  $T$  está en función de la presión  $P$  y el volumen específico  $v$  de acuerdo a la ecuación del gas ideal.

$$T = \frac{P \cdot v}{R} = T(P, v)$$

- Donde  $R$  es una constante.  $T$  es una función de punto por que en cada punto del plano coordenado  $Pv$  existe un valor discreto de  $T$ .
- La diferencial  $dT$  de una función de punto  $T$  es una diferencial exacta.

# Diferencial exacta

$$dT = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v dP + \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_P dv$$

$$dT = M dP + N dv$$

$$\frac{\partial M}{\partial v} = \frac{\partial^2 M}{\partial v \partial P} = \frac{1}{R}$$

$$\frac{\partial N}{\partial P} = \frac{\partial^2 N}{\partial P \partial v} = \frac{1}{R}$$

- El orden de la diferenciación no afecta el resultado.

$$\frac{\partial N}{\partial P} = \frac{\partial M}{\partial v}$$

- Y el valor de la integral es independiente de la trayectoria que se siga en las coordenadas  $Pv$  al ir de  $(v_1, P_1)$  a  $(v_2, P_2)$ .

# Función de trayectoria

- Como el calor  $Q$  y el trabajo  $W$  son funciones de trayectoria, el valor depende del camino que se sigue al ir del estado 1  $(x_1, y_1)$  al estado 2  $(x_2, y_2)$  y no hay relaciones de la forma

$$Q = f(x, y)$$
$$W = f(x, y)$$

- Tampoco se puede utilizar la notación  $Q_1, Q_2, W_1, W_2$ , por que no existe un valor particular en los estados 1 y 2.
- En conclusión, las diferenciales del calor y del trabajo son inexactas  $\delta Q$  y  $\delta W$ .

# Sustancia de trabajo (Joel, 1996)

- Todos los sistemas termodinámicos requieren de alguna sustancia de trabajo para que las operaciones requeridas de cada sistema puedan realizarse.
- Las sustancias de trabajo son, en general, fluidos que son capaces de deformarse para expandirse y comprimirse fácilmente.
- El fluido de trabajo también toma parte en la transferencia de energía.

# Sustancia pura

- Una sustancia pura es una sola sustancia o mezcla de sustancias que tiene la misma composición uniforme en todas partes. En otras palabras, es una sustancia homogénea y su estructura molecular no varía (Joel, 1996).
- Una sustancia pura puede existir en más de una fase (sólido, líquido, vapor), pero su composición química debe ser la misma en cada fase (Moran, Shapiro, Munson, & DeWitt, 2003).
- Una mezcla uniforme de gases puede considerarse como una sustancia pura, siempre que siga siendo un gas y no reaccione químicamente (Moran, Shapiro, Munson, & DeWitt, 2003).

# Sustancia simple compresible

(Sonntag, Borgnakke, & Wylen, 2003)

- Una sustancia simple compresible no tiene efectos de superficie, magnéticos y eléctricos.
- Los efectos provocados por los cambios de volumen debido a la expansión y compresión de la sustancia le dan la denominación de compresible.
- Si el único efecto es el de compresión, la sustancia es simple compresible.
- Un sistema simple compresible consiste de una sustancia simple compresible.



# Determinación de las propiedades

- El estado de un sistema en equilibrio es su condición descrita por los valores de sus propiedades termodinámicas.
- No todas las propiedades son independientes entre sí y el estado puede determinarse de manera exclusiva proporcionando los valores de las propiedades independientes.
- Los valores para todas las demás propiedades termodinámicas se determinan una vez que se especifica este subconjunto independiente.

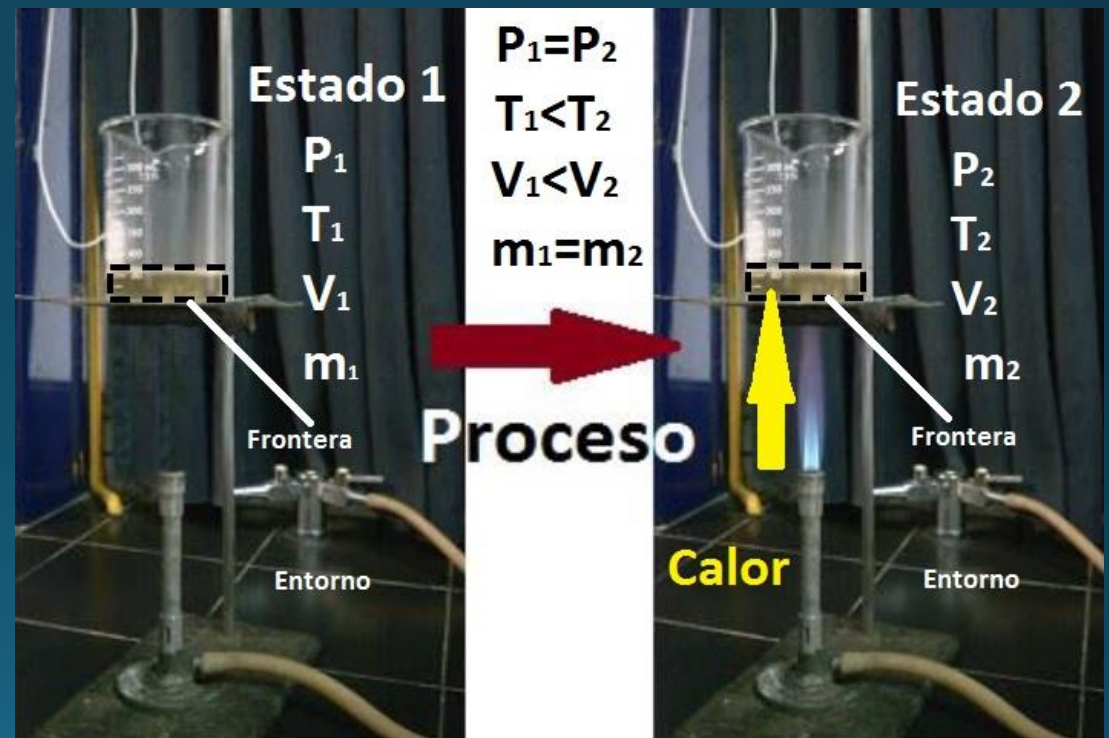
# Regla de dos propiedades (Joel,1996)

- Si se definen dos propiedades independientes de una sustancia pura, también se definen todas las demás propiedades o el estado de la sustancia.
- Si se conoce el estado de la sustancia, también se conoce la fase o mezcla de fases de la sustancia.

# Estado y proceso termodinámico

(Moran, Shapiro, Munson, & DeWitt, 2003)

- Un estado termodinámico es la descripción de un sistema por sus propiedades.
- En un estado estable o permanente ninguna de sus propiedades termodinámicas cambia con el tiempo.
- Cuando cualquiera de las propiedades cambia, el estado cambia y el sistema sufre un proceso termodinámico.



(Parada, 2011)

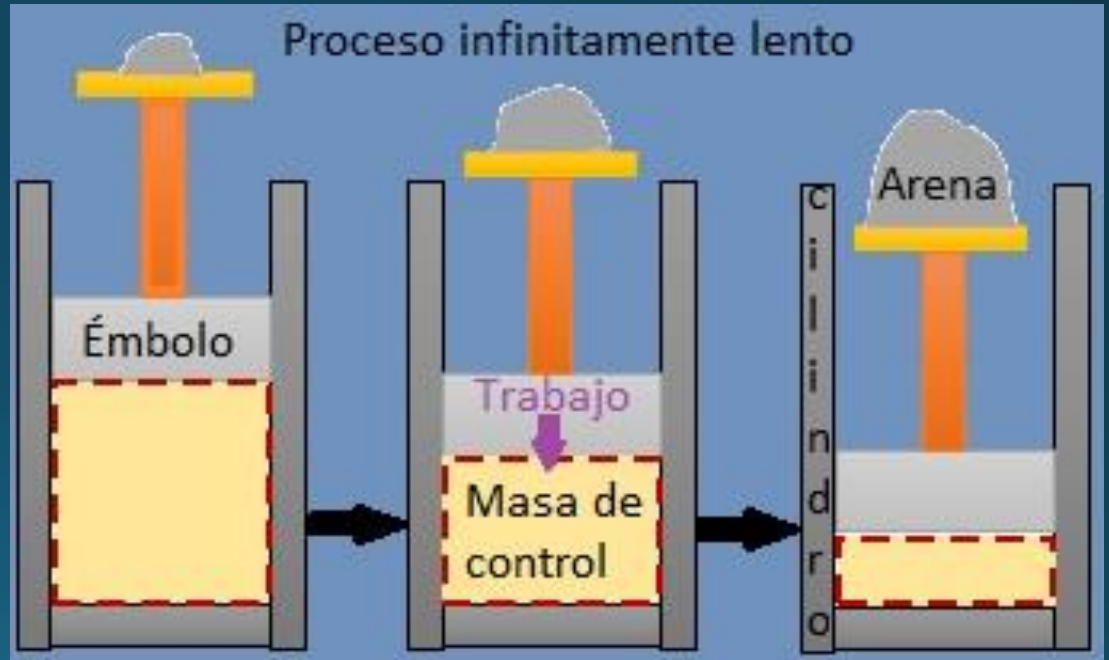
# Equilibrio termodinámico (Cengel & Boles, 2009).

- La termodinámica trata con estados de equilibrio donde no hay potenciales desbalanceados (o fuerzas impulsoras) dentro del sistema. No experimenta cambios cuando es aislado de sus alrededores.
- Un sistema está en equilibrio termodinámico cuando satisface las condiciones de equilibrio térmico, mecánico, químico y de fase.
- Un sistema está en equilibrio térmico si tiene la misma temperatura en toda su masa o volumen, mecánico si con el tiempo no hay cambio de presión en alguno de sus puntos, químico si no ocurren reacciones químicas, de fase cuando la masa de cada fase alcanza un nivel de equilibrio y así permanece.

# Proceso de cuasiequilibrio

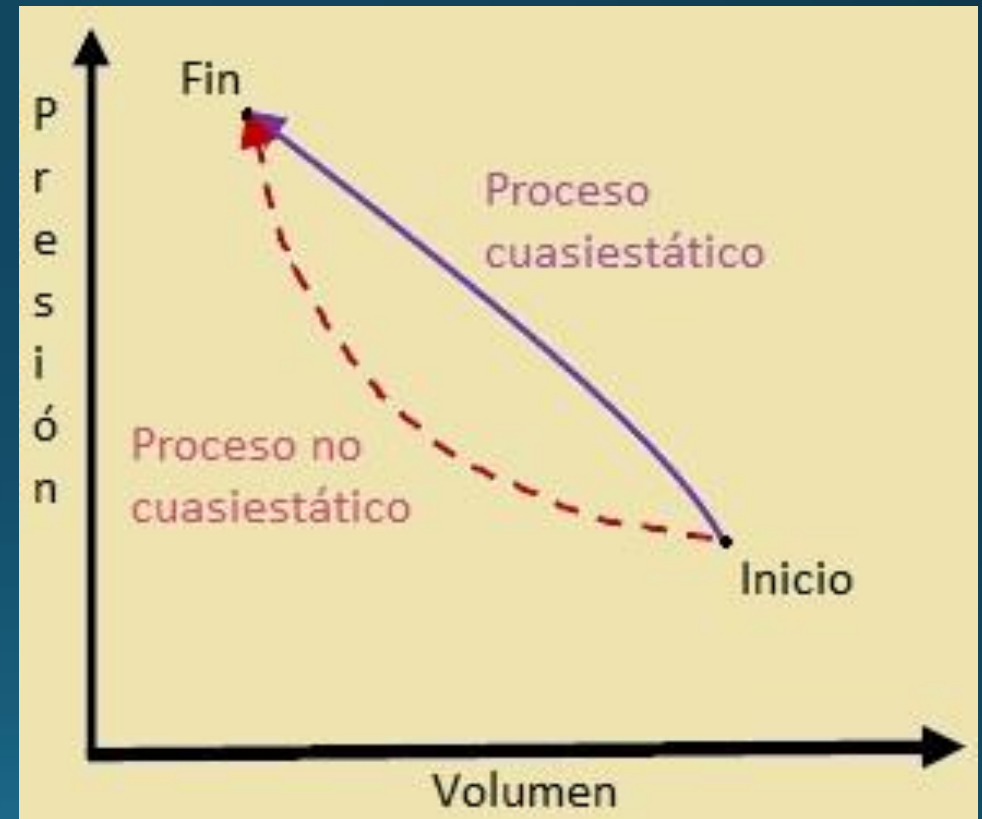
(Moran, Shapiro, Munson, & DeWitt, 2003)

- Un proceso de cuasiequilibrio o cuasiestático es aquel en el que el equilibrio termodinámico es infinitesimal.
- Todos los estados a través de los cuales el sistema pasa infinitamente lento en un proceso se consideran de equilibrio.



# Trayectoria del proceso cuasiestático

- La trayectoria del proceso indica una serie de estados de equilibrio por los que pasa el sistema y únicamente tiene importancia para procesos de cuasiequilibrio.
- Un proceso sin cuasiequilibrio se denota con una línea discontinua entre los estados inicial y final en lugar de una línea continua.



# Ciclo termodinámico

- Un ciclo termodinámico es una secuencia de procesos que comienza y termina en el mismo estado.
- Al final de un ciclo todas las propiedades tienen los mismos valores que tenían al principio.





# Dimensiones y unidades

- En 1960, la Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) definió el Sistema Internacional (SI) con base en seis cantidades fundamentales, cuyas unidades se adoptaron en 1954 en la Décima Conferencia General de Pesos y Medidas: metro [m] para longitud, kilogramo [kg] para masa, segundo [s] para tiempo, ampere [A] para corriente eléctrica, grado Kelvin [°K] para temperatura y candela [cd] para intensidad luminosa (cantidad de luz).
- En 1971, la CGPM añadió una séptima cantidad fundamental y unidad: mol [mol] para la cantidad de materia.



- Con base en el esquema de notación introducido en 1967, el símbolo de grado se eliminó en forma oficial de la unidad de temperatura absoluta, y todos los nombres de unidades se escribirían con minúscula incluso si se derivaban de nombres propios. La abreviatura de una unidad se escribiría con mayúscula si la unidad provenía de un nombre propio.
- Las unidades no primarias (unidades secundarias) se forman a través de combinaciones de unidades primarias.
- Las relaciones de conversión de unidades son iguales a 1 y no tienen unidades.

# Prefijos y conversiones comunes

Múltiplos	Prefijo
$10^{12}$	tera, T
$10^9$	giga, G
$10^6$	mega, M
$10^3$	kilo, k
$10^2$	hecto, h
$10^1$	deca, da
$10^{-1}$	deci, d
$10^{-2}$	centi, c
$10^{-3}$	mili, m
$10^{-6}$	micro, $\mu$
$10^{-9}$	nano, n
$10^{-12}$	pico, p

- $1 \text{ lbm} = 0.45359 \text{ kg}$
- $1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
- $1 \text{ lbf} = 32.174 \text{ lbm}\cdot\text{ft}/\text{s}^2$
- $1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$
- $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$
- $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}$
- $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$
- $1 \text{ Btu} = 1.0551 \text{ kJ}$

# Bibliografía

- Arenaza, S. (6 de Enero de 2011). *todo sobre Motores Automotriz*. Obtenido de Taringa. Autos y motos: <http://www.taringa.net/posts/autos-motos>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica* (Sexta ed.). México: McGraw Hill.
- Joel, R. (1996). *Basic engineering thermodynamics*. London: Addison Wesley Longman Limited.
- Jones, J. B., & Dugan, R. E. (1997). *Ingeniería termodinámica*. México: Prentice Hall Hispanoamérica, S. A.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Munson, B. R., & DeWitt, D. P. (2003). *Introduction to thermal systems engineering: thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- Packitas. (13 de Junio de 2017). *Decoración*. Obtenido de Packita's Monas Fiesta: <http://www.packitas.com>
- Parada, E. (5 de Septiembre de 2011). *Separación de mezclas*. Obtenido de Trabajos: <http://trabajos-cch-edd.blogspot.mx>
- Reynolds, W. C., & Perkins, H. C. (1977). *Engineering thermodynamics*. New York: McGraw Hill.
- Smith, J. M., Ness, H. C., & Abbott, M. M. (1997). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. México: McGraw-Hill.
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C., & Wylen, G. J. (2003). *Fundamentals of thermodynamics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.