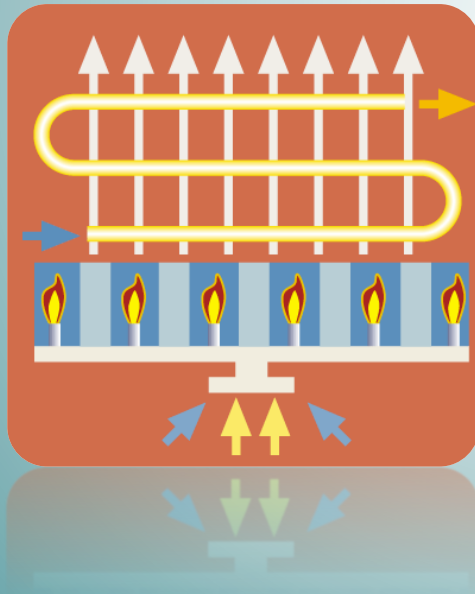


# Termodinámica y Máquinas Térmicas

## Tema 01. Conceptos Fundamentales



**Inmaculada Fernández Diego**  
**Severiano F. Pérez Remesal**  
**Carlos J. Renedo Estébanez**

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)



## T 01.- Conceptos Fundamentales

### Objetivos:

El primer tema de este bloque está destinado a introducir al estudiante en algunos de los conceptos y definiciones fundamentales de aplicación en los siguientes temas dedicados a la Termodinámica



- 1.- Introducción
- 2.- Sistema Termodinámico
- 3.- Propiedades de un Sistema
- 4.- Procesos y Cambios de Estado
- 5.- Ecuaciones de Estado

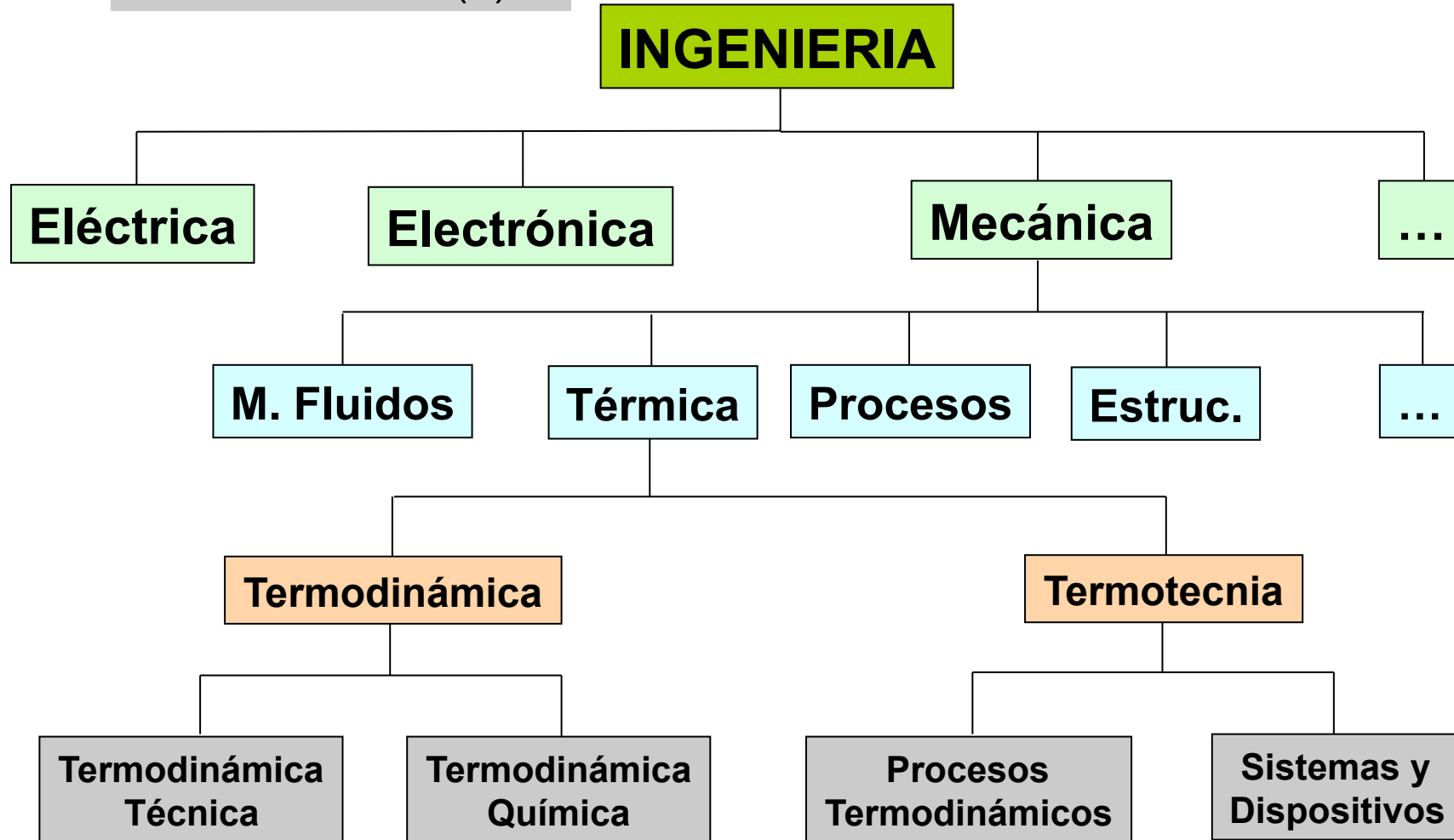
## 1.- Introducción (I)

**Termodinámica** procede del griego *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza)

**Termotecnia** es la rama de la ciencia tecnológica que se ocupa del control industrial de las aplicaciones del calor

En Termodinámica lo usual es trabajar con **fluidos compresibles**  
(gases y vapores)

1.- Introducción (II)

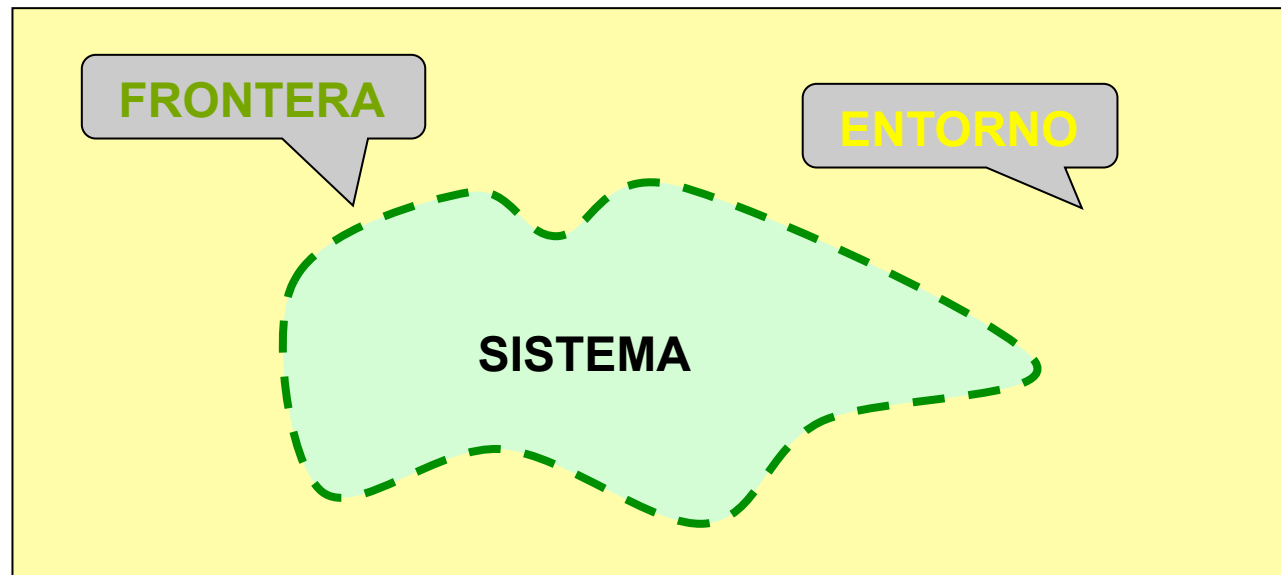


## 1.- Sistema Termodinámico (I)

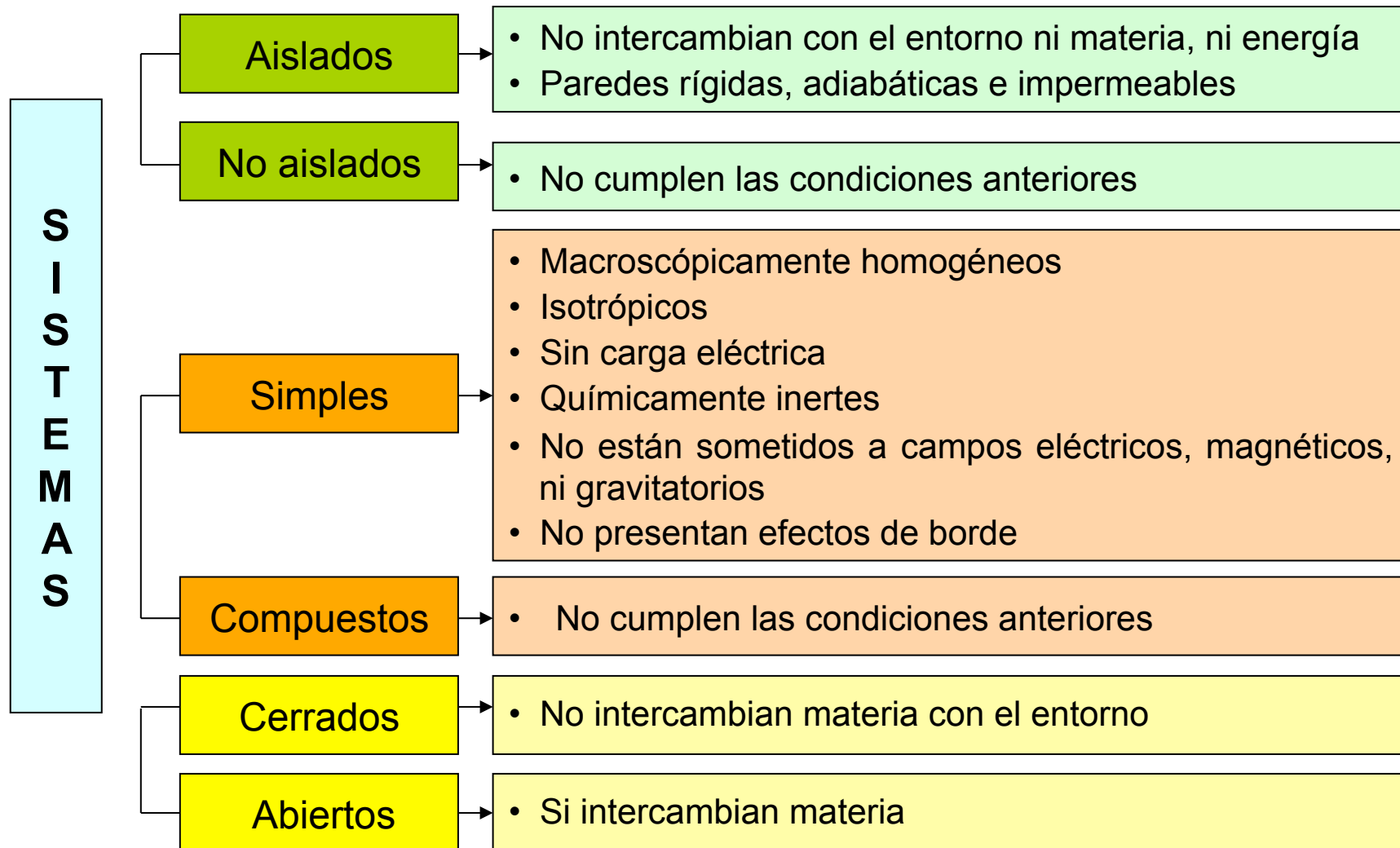
**Sistema:** parte de materia o región sobre la que se fija el estudio

**Frontera:** límites de un sistema

**Entorno, Ambiente o Medio Circundante:** materia o región que rodea al sistema



1.- Sistema Termodinámico (II)



## 1.- Sistema Termodinámico (III)

- **Sistemas Cerrados**

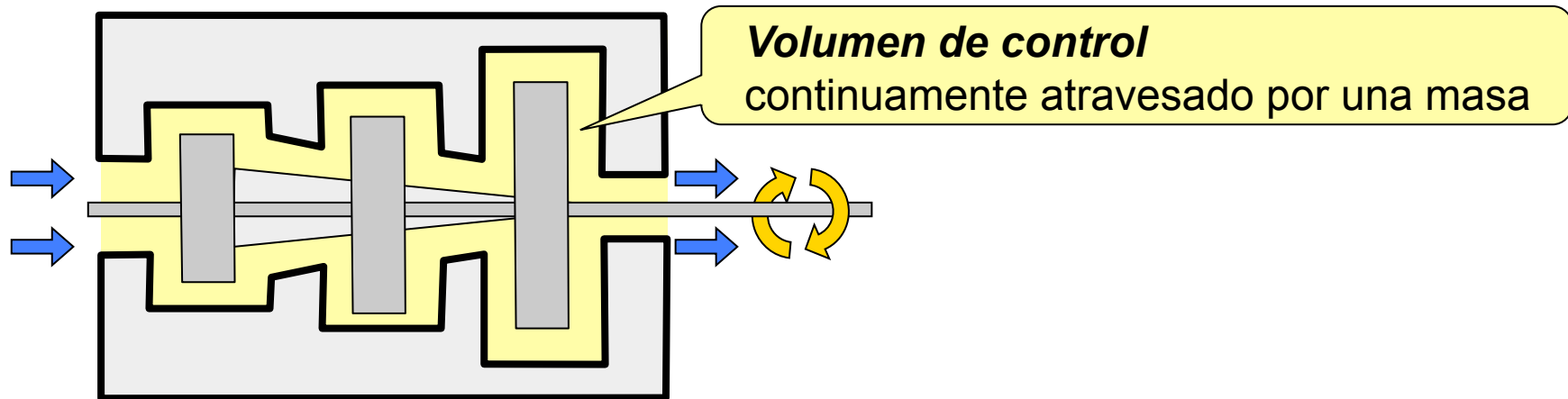
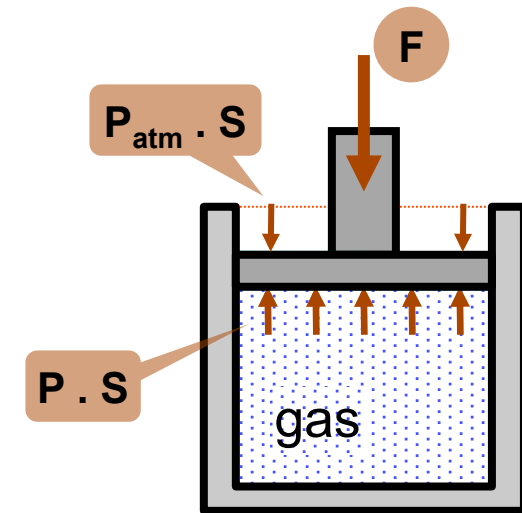
su masa no varía

ej: interior de un cilindro

- **Sistemas Abiertos**

una masa fluye en un volumen

ej turbina de vapor



1.- Sistema Termodinámico (IV)





## 1.- Sistema Termodinámico (V)

Las clasificaciones por Sistemas y Fronteras son independientes

Un sistema es adiabático cuando sus fronteras lo son, esto es independiente de si el sistema es abierto o cerrado

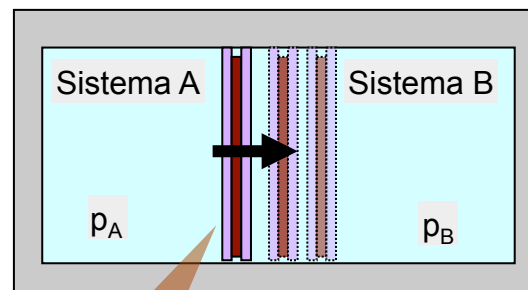
**Paredes Adiabáticas**, térmicamente aisladas, no permiten paso del calor

**Sistema Adiabático** (térmicamente aislado) sin aporte ni extracción de calor

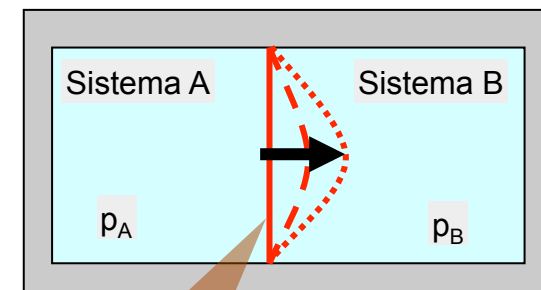
**Paredes elásticas**, con movimiento (cilindros, émbolos o membranas)

**Paredes inelásticas**, sin movimiento

Si  $p_a > p_b$   
Se mueve hasta  
 $p_a = p_b$

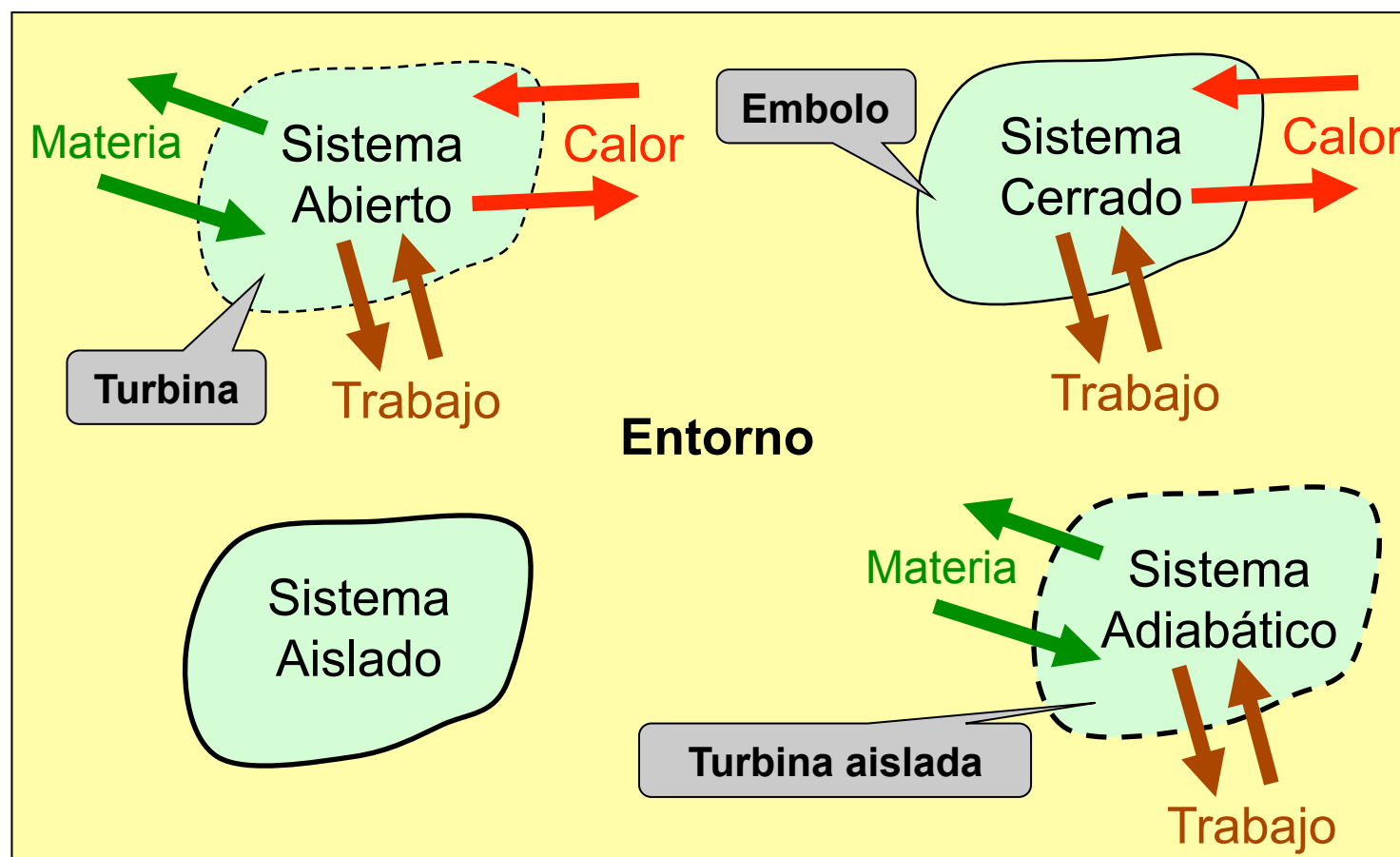


Embolo



Membrana

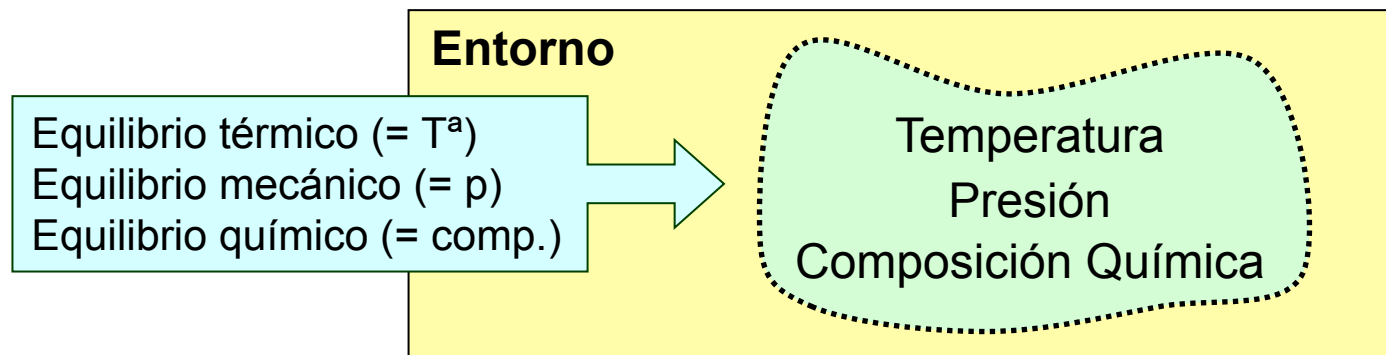
1.- Sistema Termodinámico (VI)



## 1.- Sistema Termodinámico (VII)

El calor se transmite del sistema de mayor al de menor  $T^a$

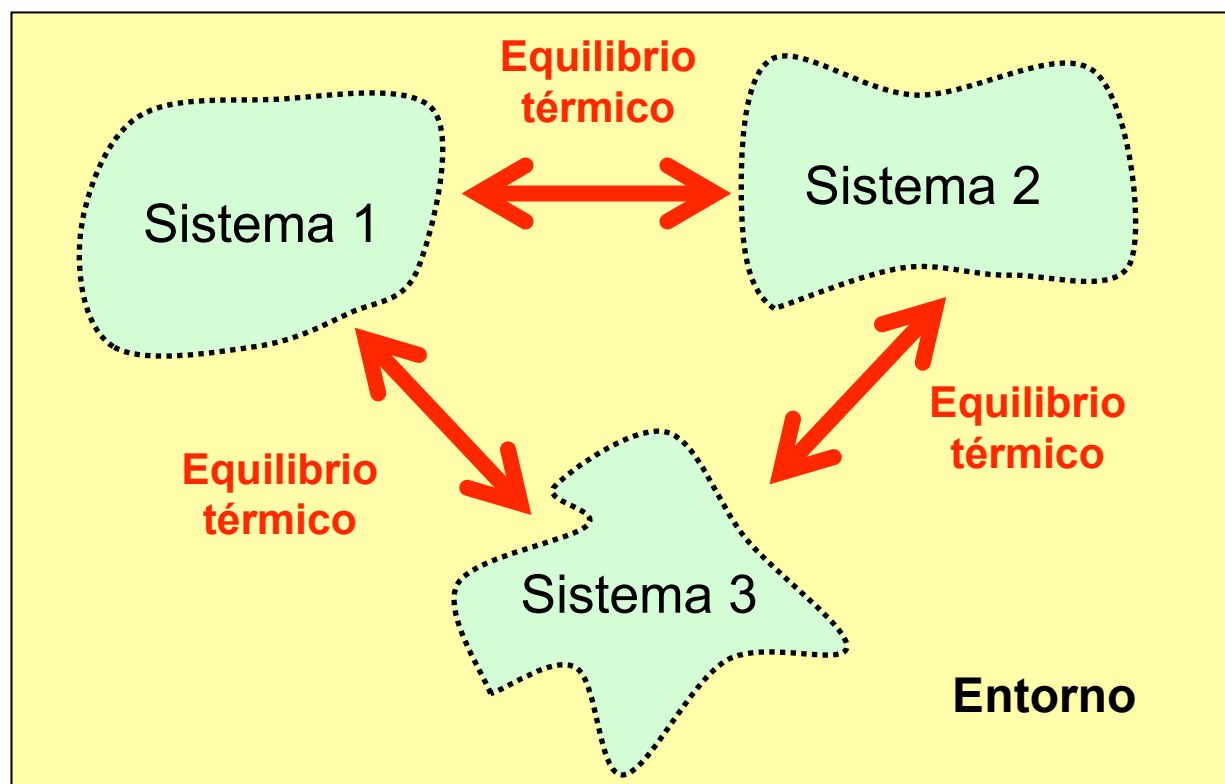
**Sistema en Equilibrio Termodinámico:** las variables termodinámicas son uniformes en todo el sistema



**Tiempo de Relajación:** el que tarda un sistema, fuera de su estado de equilibrio, en regresar a él

1.- Sistema Termodinámico (VIII)

**Principio Cero de la Termodinámica:** los sistemas tienden de forma natural al equilibrio térmico





## 2.- Propiedades de un Sistema (I)

**Propiedades Termodinámicas:** son las magnitudes físicas que describen el estado de un sistema termodinámico

Las de carácter universal son:

- Presión
- Temperatura

Otras:

- El volumen específico
- La viscosidad ...

La Termodinámica añade:

- La energía interna
- La entalpía
- La entropía, ...

Las propiedades están relacionadas, si se conocen algunas, las otras quedan determinadas

$$f(p, v, T) = 0$$

Ec. estado

$$X = \sqrt{Y} + \ln(Z + Y) - e^Z \dots$$

## 2.- Propiedades de un Sistema (II)

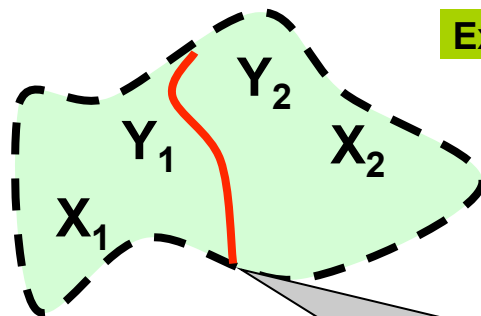
**Intensivas:** no dependen de la masa en la que se considera  
Se nombran con letras minúsculas

- Presión
- Temperatura
- Densidad, ...

**Extensivas:** dependen de la masa en la que se considera  
Se nombrarán con letras mayúsculas

- Energía
- Masa
- Volumen

Excepto la temperatura, T; t es el tiempo



Propiedad Intensiva X:  $X = X_1 = X_2$

$T = T_1 = T_2$

Propiedad Extensiva Y:  $Y = Y_1 + Y_2$

$M = M_1 + M_2$

Se divide el sistema en dos partes  
por una superficie imaginaria

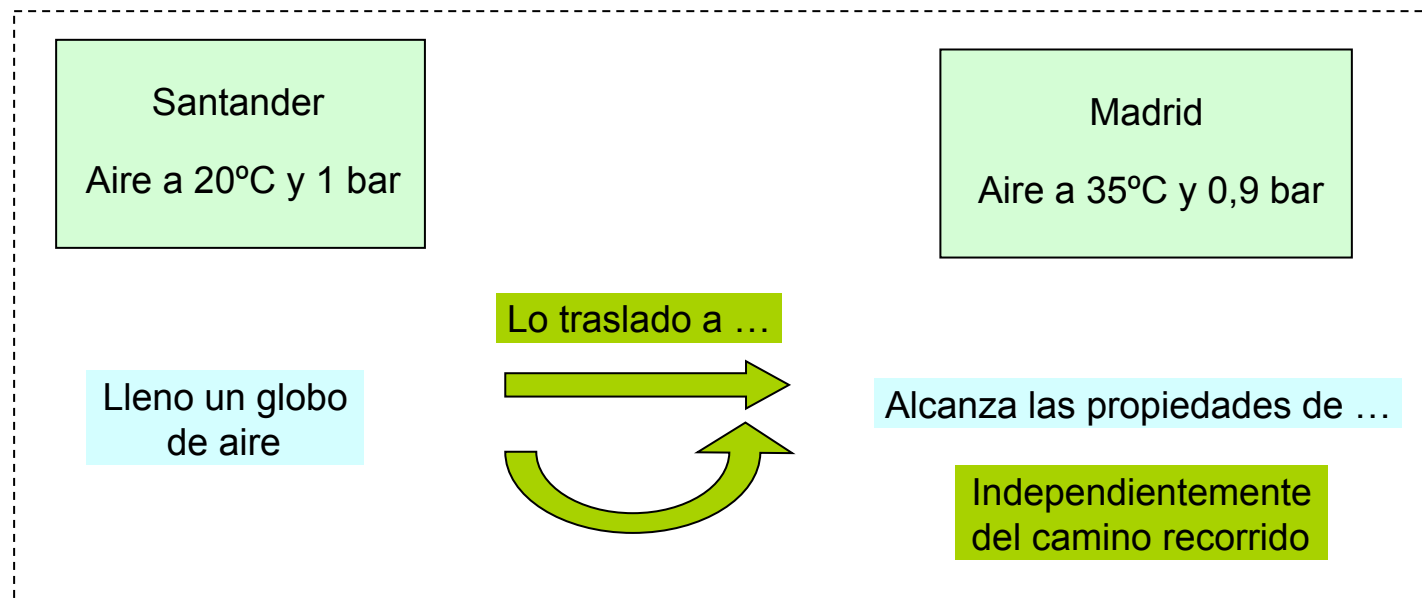
**Específicas:** relativizan las Extensivas  
dividiendo por la masa

$$v \text{ (volumen específico)} = \frac{V \text{ (Volumen)}}{m \text{ (masa)}}$$

### 3.- Procesos de cambio de Estado (I)

Cuando un sistema pasa de un estado a otro, la variación de sus propiedades sólo depende del estado inicial y final, y no de las situaciones intermedias

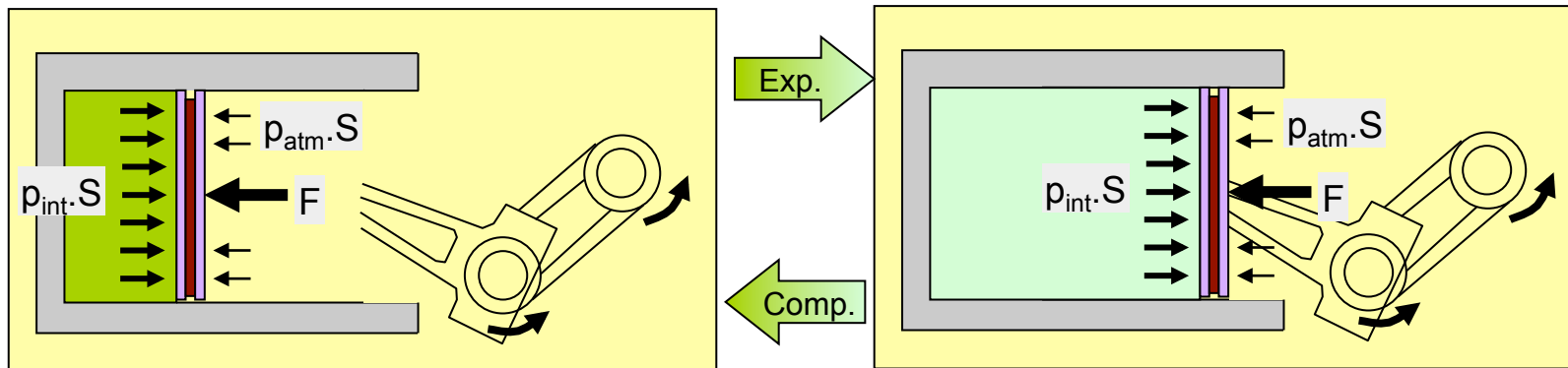
La Ec de Estado relaciona las propiedades en cada punto  $f(p, v, T) = 0$



### 3.- Procesos de cambio de Estado (II)

La **Expansión** de un sistema (aumento de volumen) sucede cuando la fuerza interior es mayor que la fuerza exterior

$$F = p \cdot S$$



Lo contrario a una expansión es una **Compresión** (disminución del volumen), sucede cuando la fuerza exterior es mayor a la interior





### 3.- Procesos de cambio de Estado (III)

Un **Sistema** cerrado está en **Equilibrio** cuando el valor de sus propiedades es idéntico en todos sus puntos

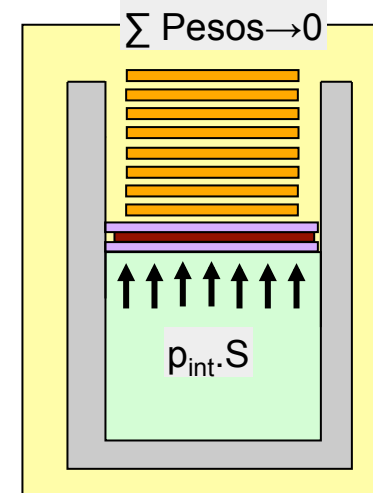
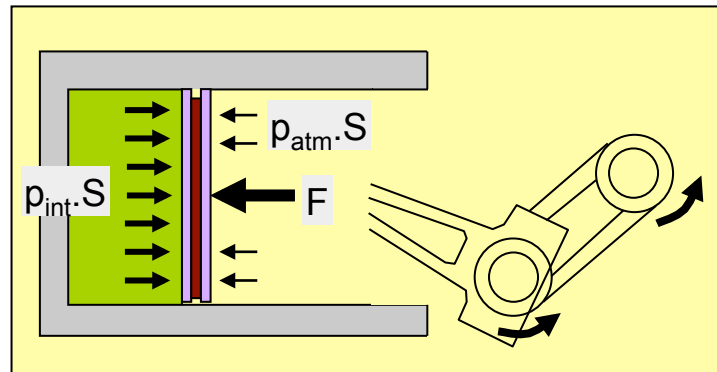
Cuando un sistema cambia de un estado en equilibrio a otro también en equilibrio, los estados intermedios pueden ser, o no, de equilibrio

**Expansión / Compresión Libre** cuando  $F_{\text{int}} \gg F_{\text{ext}}$   
los estado intermedios no son de equilibrio

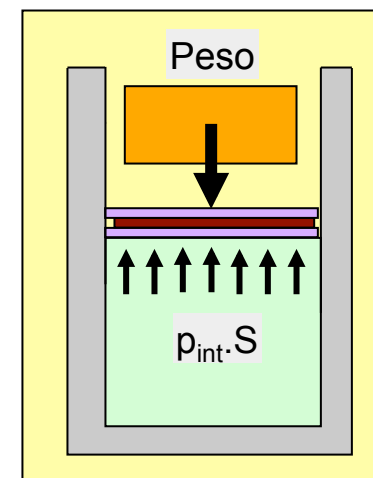
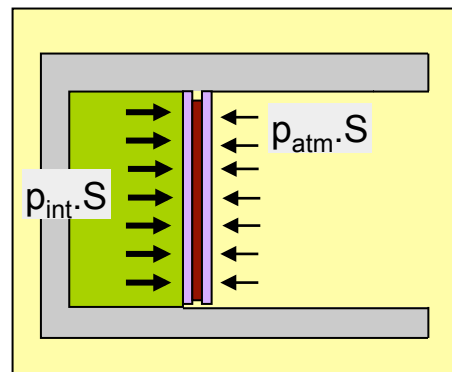
**Expansión / Compresión Resistida** cuando  $F_{\text{int}} \approx F_{\text{ext}}$   
los estados intermedios son de equilibrio

3.- Procesos de cambio de Estado (IV)

**Equilibrio**

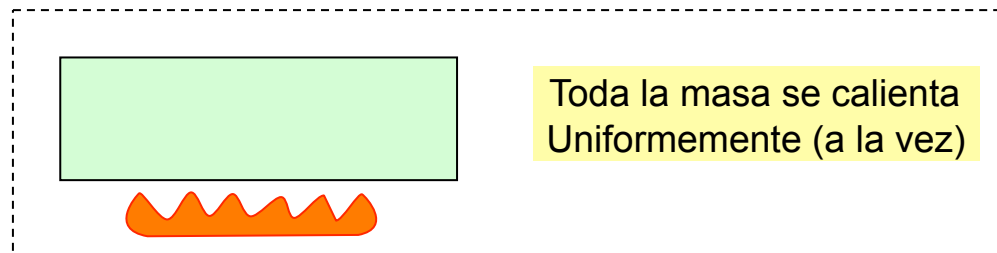


**No Equilibrio**

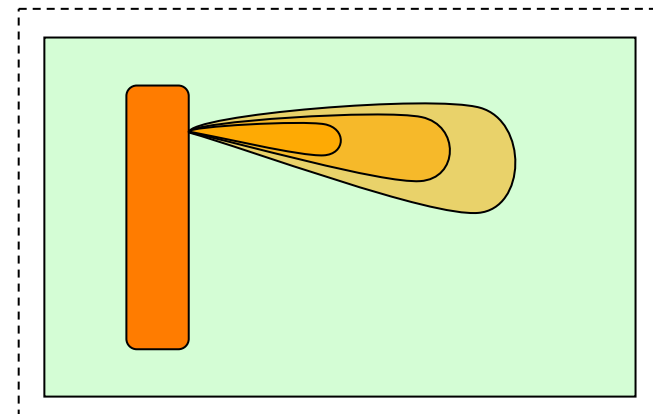


### 3.- Procesos de cambio de Estado (V)

El **Calentamiento** o **Enfriamiento** de un sistema se puede considerar como una sucesión de estados en equilibrio



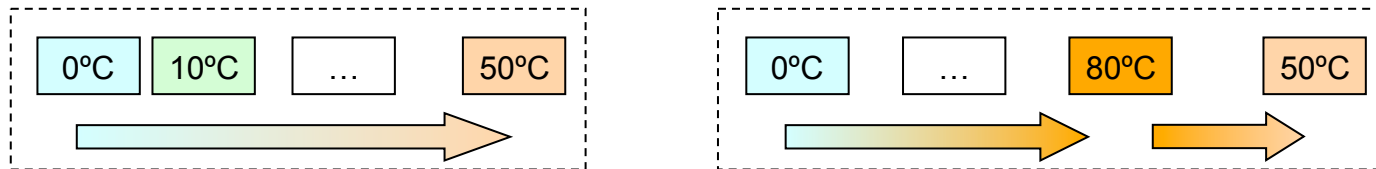
La **Mezcla de Sistemas** no se puede considerar como una sucesión de estados en equilibrio



### 3.- Procesos de cambio de Estado (VI)

**Transformaciones Termodinámicas:** sucesión de estados por los que pasa un sistema cuando se le somete a un cambio

Calentar agua de 0 a 50°C; calentar de 0 a 80 y enfriarlo a 50; ...



Para que haya Transformaciones Termodinámicas es preciso que se produzca intercambio de energía con el medio exterior

La transformación se puede realizar de diferentes modos, cada uno de ellos es un **Proceso Termodinámico**

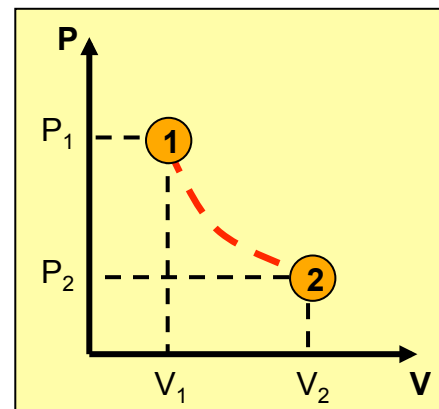
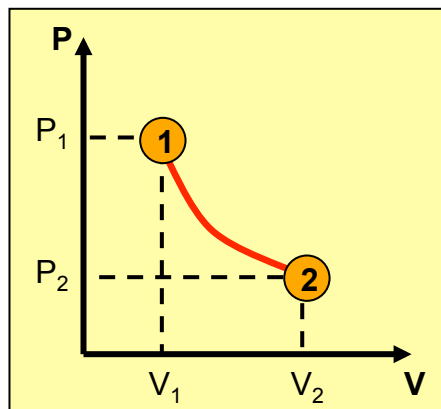
Calentar con agua caliente, calentar con una resistencia eléctrica, ...

**Diagrama de Estado** es cualquier representación de dos propiedades Termodinámicas de un sistema, un ejemplo típico es el diagrama  $p$ - $v$ ...

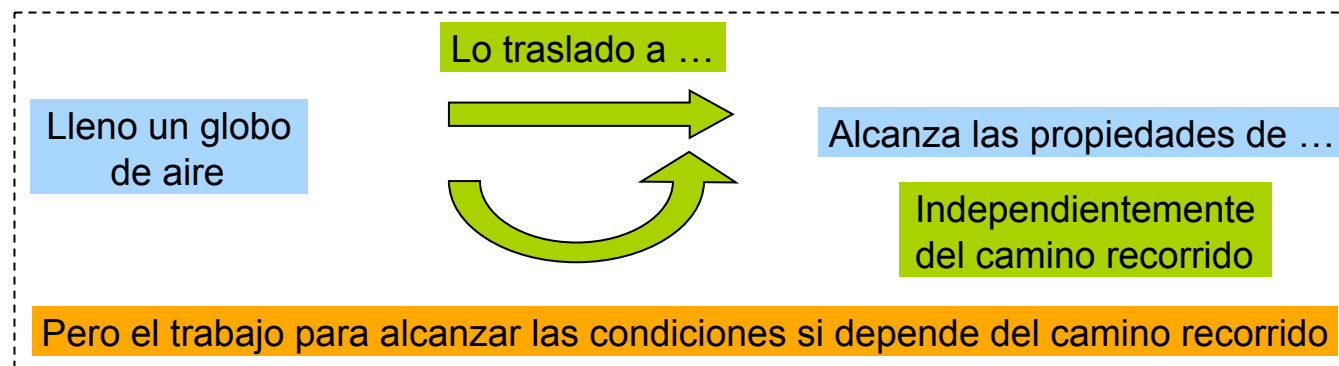
### 3.- Procesos de cambio de Estado (VII)

La representación de una Transformación en un Diagrama de Estado:

- Si los estados intermedios son de equilibrio, una línea
- Si los estados intermedios no lo son, recta con trazo discontinuo



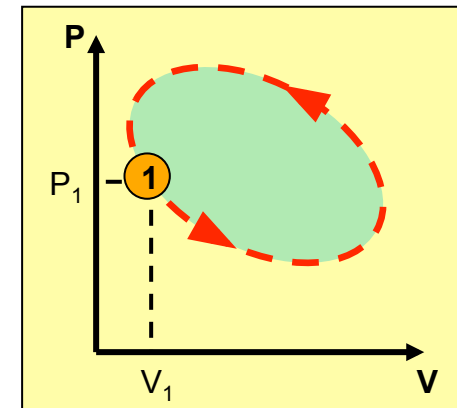
El trabajo depende del camino recorrido



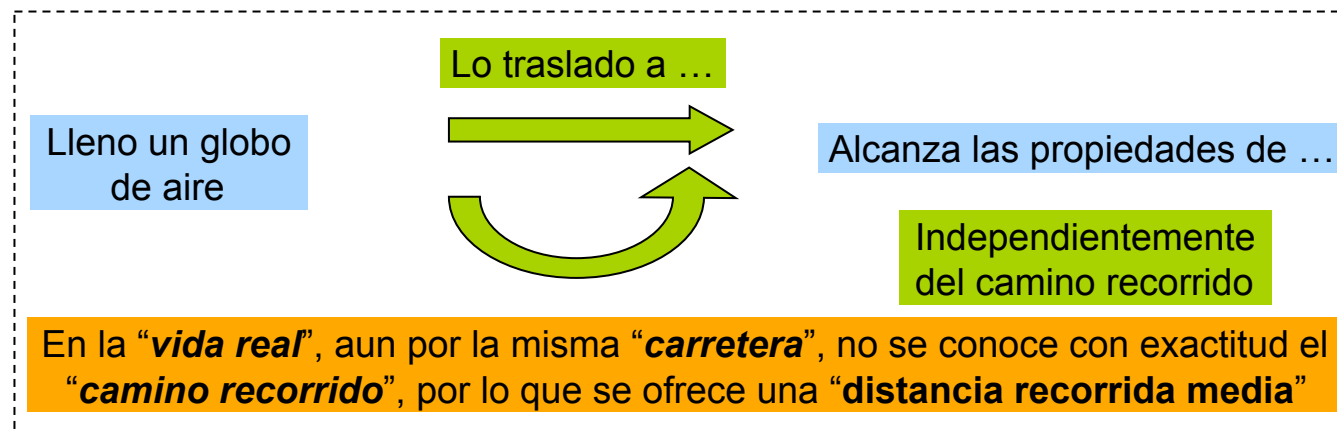
### 3.- Procesos de cambio de Estado (VIII)

En las máquinas térmicas un sistema evoluciona a través de una serie de transformaciones que se acaban cerrando formando un Ciclo Termodinámico

Conocer el Ciclo implica que las transformaciones sean conocidas (estados intermedios)



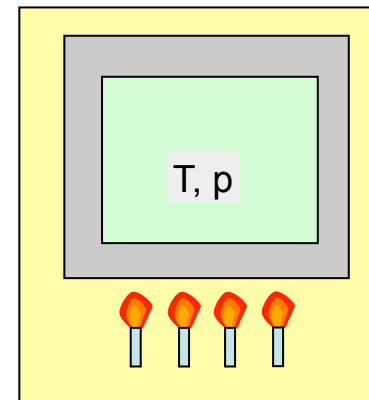
Para conocer el trabajo desarrollado en el ciclo hay que **aproximar** las transformaciones reales por transformaciones teóricas (conocidas)



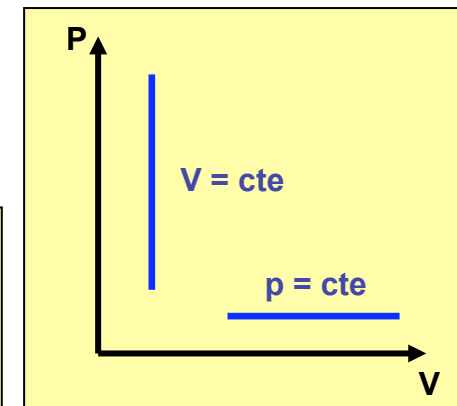
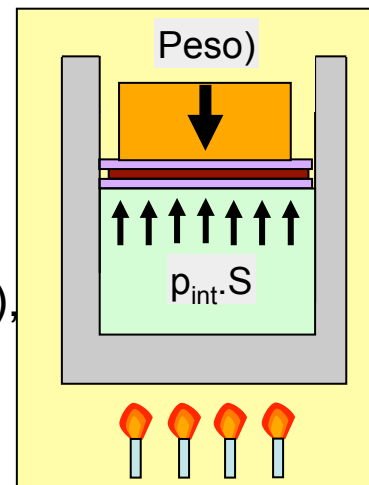
### 3.- Procesos de cambio de Estado (IX)

Transformaciones básicas son: (I)

- **Isocora** a volumen constante ( $v = \text{cte}$ )  
se calienta o enfría con límites inelásticos



- **Isóbaras**, a presión constante ( $p = \text{cte}$ ),  
se calienta o enfría con límites elásticos

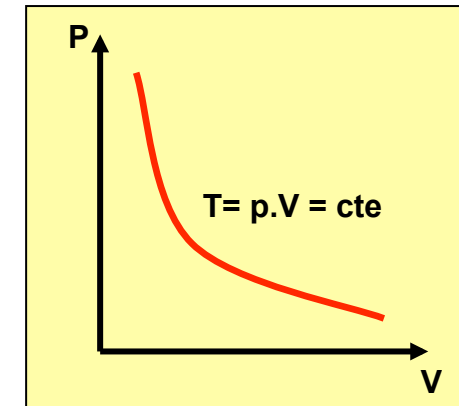


### 3.- Procesos de cambio de Estado (X)

Transformaciones básicas son: (II)

- **Isotermas**, a temperatura constante ( $T = \text{cte}$ )

Gases perfectos:  $p v = R T \Rightarrow p v = \text{cte}$



- **Adiabáticas** o **isoentrópicas**, sin transferencia de calor, además no debe existir aporte de calor por rozamiento interno ( $p v^\gamma = \text{cte}$ )

$\gamma$  es el exponente adiabático,  $f(T)$ ,  
No es el peso específico

- **Politrópicas**, son las transformaciones reales ( $p v^n = \text{cte}$ )

$\gamma$  : exponente adiabático:  
-1,66 en gases monoatómicos  
-1,40 en gases biatómicos  
-1,33 en gases triatómicos

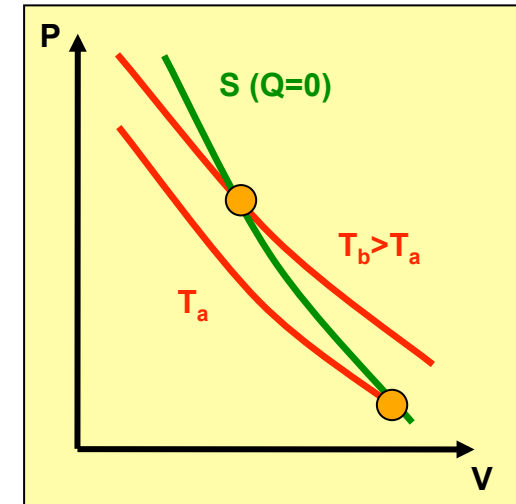
≈ aire

$n$  : exponente politrópico:  
-Isócoras,  $n = \pm \infty$   
-Isóbaras,  $n = 0$   
-Isotermas,  $n = 1$   
-Adiabáticas,  $n = \gamma$



### 3.- Procesos de cambio de Estado (XI)

- En una expansión adiabática (isoentrópica)  $T^a \downarrow$
- En una compresión adiabática  $T^a \uparrow$



Si se tienen dos puntos de una politrópica se puede determinar el exponente:

$$p v^n = \text{cte}$$

$$p_a v_a^n = p_b v_b^n$$

$n$  se calcula:

$$n = \frac{\ln(p_a / p_b)}{\ln(v_b / v_a)}$$

### 3.- Procesos de cambio de Estado (XII)

$$p v^n = \text{cte} \quad \left\{ \begin{array}{l} - \text{Isócoras, } n = \pm \infty \\ - \text{Isóbaras, } n = 0 \\ - \text{Isotermas, } n = 1 \\ - \text{Adiabáticas, } n = \gamma \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma : \text{exponente adiabático:} \\ - 1,66 \text{ en gases 1at} \\ - 1,40 \text{ en gases 2 at} \\ - 1,33 \text{ en gases 3 at} \end{array} \right.$$

$$p v = R T \quad p V = M R T$$

Isoterma en un gas ideal  
(hipérbolas equiláteras)

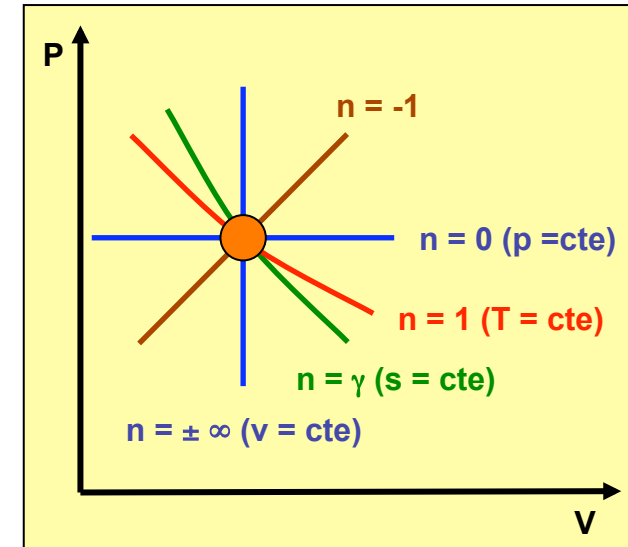
$$p v = \text{cte}$$

$R$  en los gases ideales

$$R = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$$

$R$  referido a la masa molecular del gas,  $M$

$$R = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} = \frac{8,314}{M} \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$



Sustancia	M (kg/kmol)	R (J/kg K)
H <sub>2</sub>	2,016	4124,4
O <sub>2</sub>	32	259,83
H <sub>2</sub> O	18,016	461,52
C	12,011	692,26

$$M_{\text{Aire}} = 28,964 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$R_{\text{Aire}} = 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

### 3.- Procesos de cambio de Estado (XIII)

**Politrópica en un gas ideal**  $p v = R T$   $p v^n = \text{cte}$

La relación entre p y v:

$$\frac{p_b}{p_a} = \left( \frac{v_a}{v_b} \right)^n$$

La relación entre T y p:

$$\frac{T_b}{T_a} = \left( \frac{p_b}{p_a} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

La relación entre T y volumen:

$$\frac{T_b}{T_a} = \left( \frac{v_a}{v_b} \right)^{n-1}$$



Analizar dimensionalmente las expresiones:  $p v = R T$   $p V = M R T$

#### 4.- Ecuaciones de Estado (I)

Una sustancia pura puede estar en tres estados, y puede cambiar de uno a otro:

- sólido (S)
- líquido (L)
- gaseoso o vapor (V)

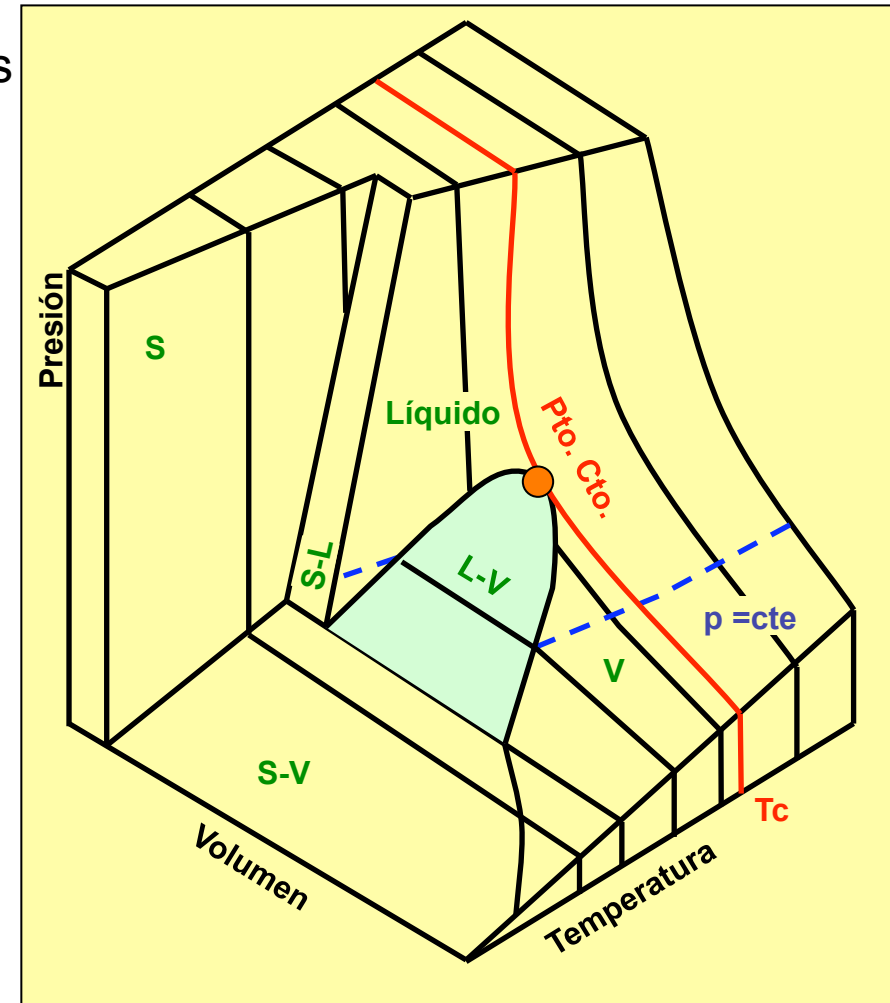
$$f(p, v, T) = 0$$

Gas ideal :  $p v = R T$

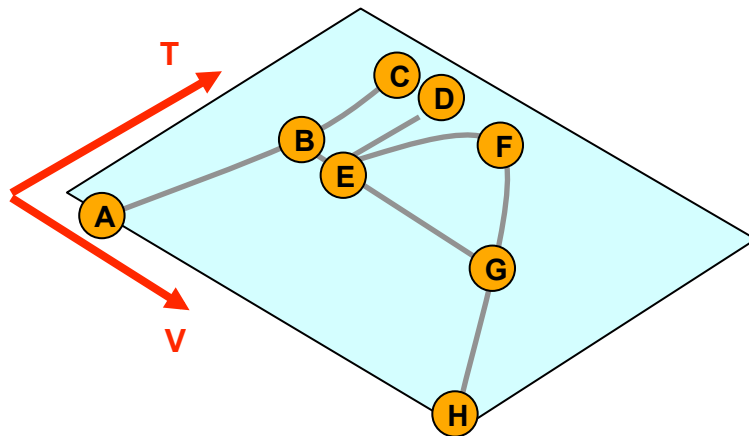
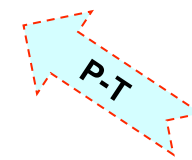
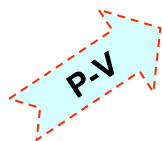
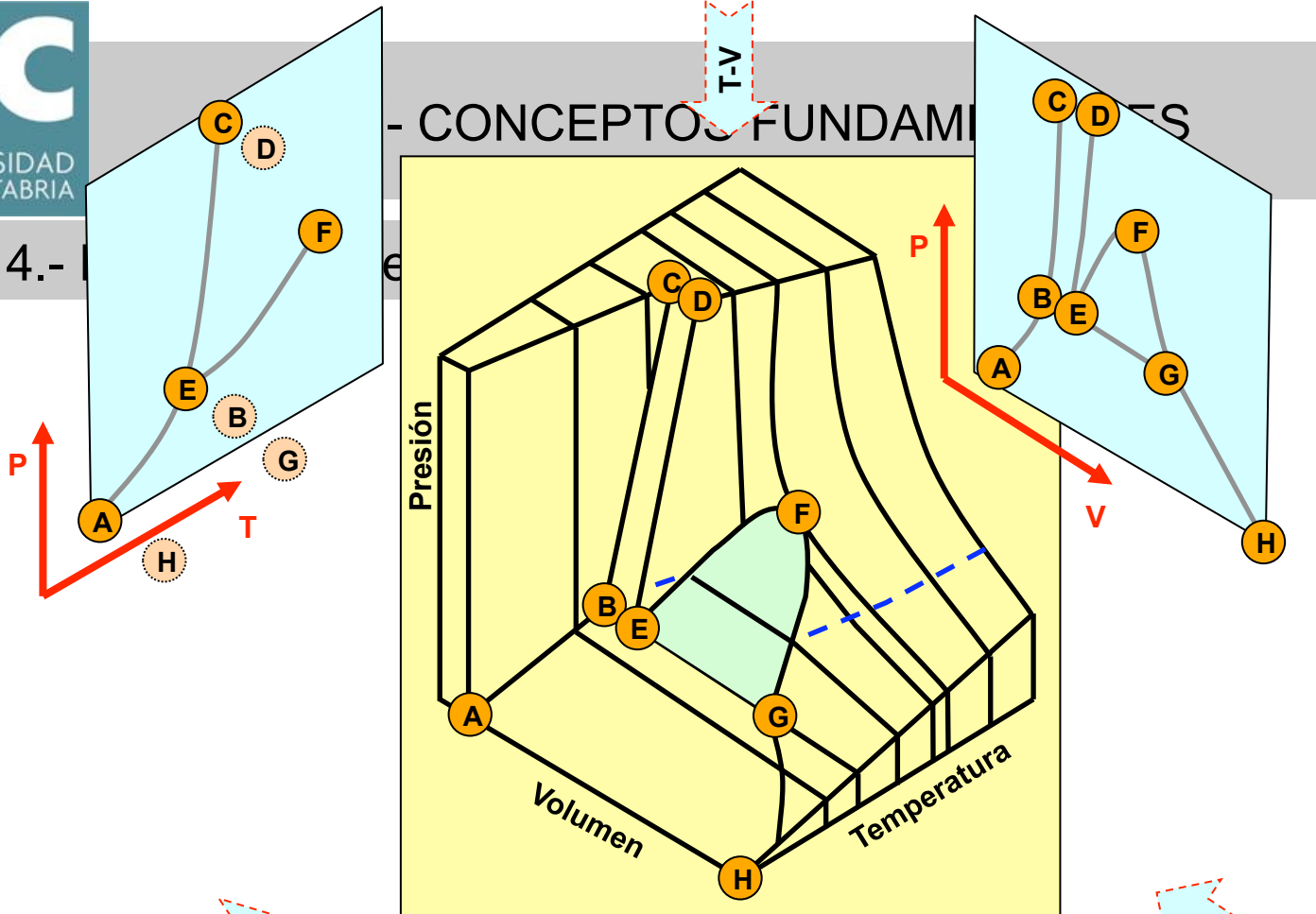
Los cambios de fase se pueden representar en un diagrama

Curvas de fusión, vaporización o sublimación

Las curvas convergen en el pto triple



CONCEPTOS FUNDAMENTALES



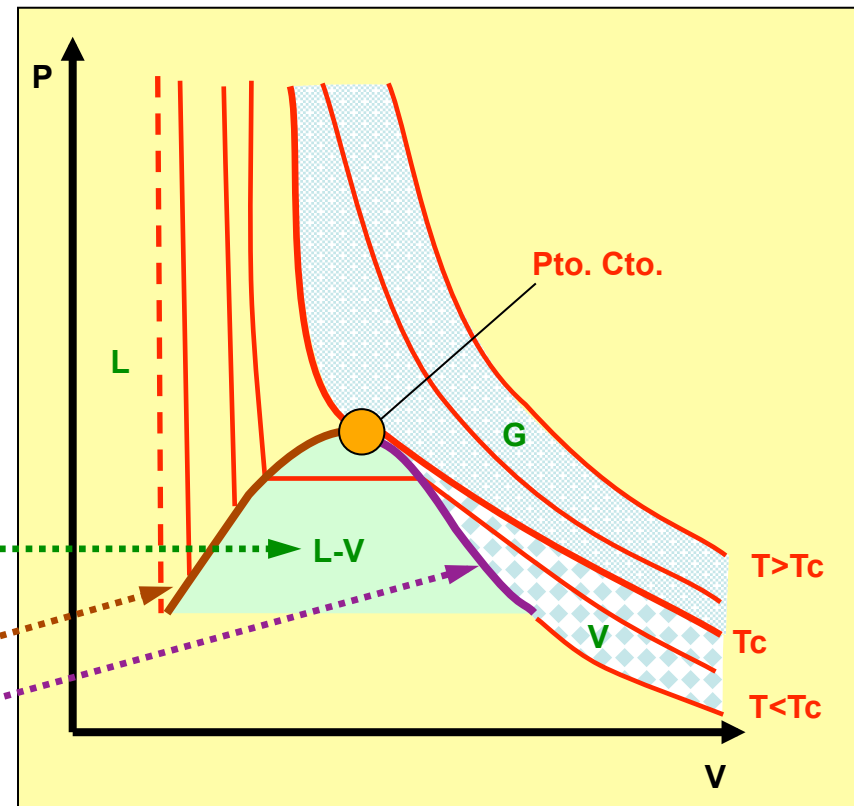
#### 4.- Ecuaciones de Estado (III)

El **cambio de líquido a gas** se puede realizar:

- Progresivamente, pasando por una fase de vapor húmedo
- Instantáneamente, de líquido a gas

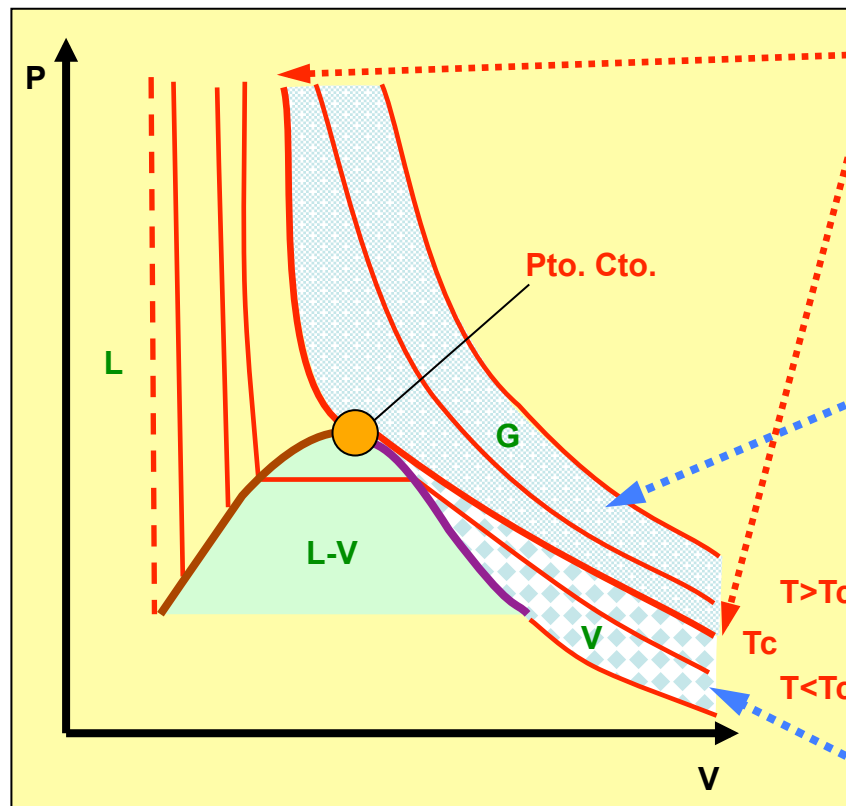
El paso progresivo atraviesa la zona de **vapor húmedo**, que está limitada por las curvas de:

- **líquido saturado** y
- **vapor saturado**



Los ciclos de algunas máquinas trabajan en la zona de vapor húmedo (turbinas de vapor, o las de refrigeración por compresión, ...)

4.- Ecuaciones de Estado (IV)



La **Isoterma Crítica**, marca una diferencia entre la zona de vapor sobrecalentado y de gas

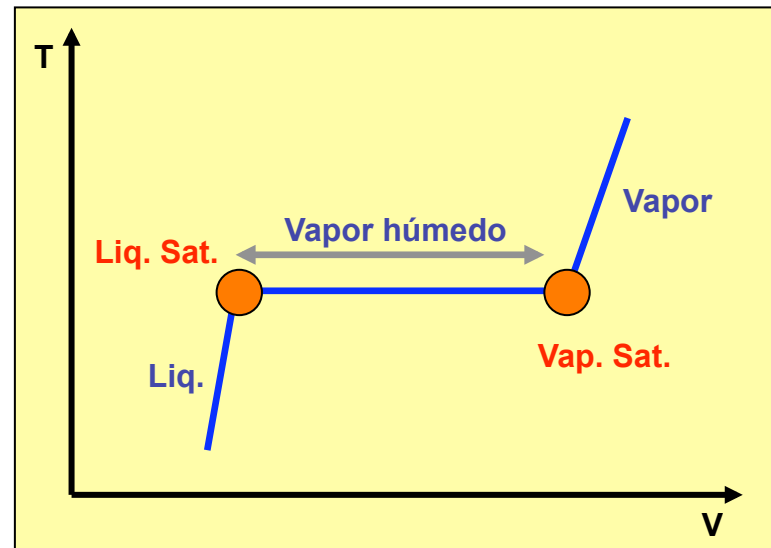
Se llama **gas** a la fase que no se puede licuar sin bajar la temperatura. Los motores de combustión y las turbinas de gas trabajan en esta zona

Se llama **vapor sobrecalentado** o **vapor recalentado** a la fase en la que a  $T^a$  cte se puede llegar a condensar



4.- Ecuaciones de Estado (V)

Tabla con las propiedades del líquido



Tablas con las propiedades del vapor

Vapor húmedo:

$$m v = m_{\text{liq}} v_{\text{liq}} + m_{\text{vap}} v_{\text{vap}}$$

$$m = m_{\text{liq}} + m_{\text{vap}}$$

$$x \text{ (título vapor)} = \frac{m_{\text{vap}}}{m}$$

$$v = v_{\text{liq}} + x (v_{\text{vap}} - v_{\text{liq}})$$

#### 4.- Ecuaciones de Estado (VI)

#### Propiedades del agua líquida

Ojo al  $10^6$

Temperatura (°C)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico $c_p$ (J/kg°C)	Conductiv. térmica $k$ (W/m°C)	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^6$ (N.seg/m <sup>2</sup> )	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /seg)
0	999,9	4226	0,558	1794	1,789
20	998,2	4182	0,597	1004	1,006
40	992,3	4178	0,633	653,0	0,658
60	983,2	4181	0,658	470,0	0,478
80	971,8	4194	0,673	353,7	0,364
100	958,4	4211	0,682	281,0	0,294
140	926,1	4279	0,687	198,2	0,214
180	887,0	4413	0,678	153,5	0,173
220	840,5	4606	0,656	126,0	0,150
260	784,0	4944	0,614	107,5	0,137
300	712,5	6594	0,543	94,1	0,132

$\eta$  a 300°C =  $94,1 \times 10^{-6}$

4.- Ecuaciones de Estado (VII)

**Propiedades del agua saturada (líquido-vapor)**

Temp,	Presión	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		m <sup>3</sup> / kg		kJ / kg		kJ / kg			kJ / kg K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Vapor	Líquido	Vapor
°C	bar	sat,	sat,	sat,	sat,	sat,	vaporiz,	sat,	sat,	sat,
		v <sub>f</sub> x 10 <sup>3</sup>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	U <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>g</sub>
,01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533
50	0,1235	1,0121	12,032	209,32	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	0,7038	8,0763
100	1,014	1,0435	1,673	418,94	2506,5	419,04	2257,0	2676,1	1,3069	7,3549
200	15,54	1,1565	0,1274	850,65	2595,3	852,45	1940,7	2793,2	2,3309	6,4323
374,14	220,9	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298



4.- Ecuaciones de Estado (VIII)

**Propiedades del vapor seco**

$T$	$v$	$u$	$h$	$s$
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ / kg	kJ / kg	kJ / kg K
<b><math>p = 1,0 \text{ bar} = 0,10 \text{ MPa}</math></b>				
<b>(<math>T_{\text{sat}} = 99,63^\circ\text{C}</math>)</b>				
Sat	1,694	2506,1	2675,5	7,3594
100	1,696	2506,7	2676,2	7,3614
120	1,793	2537,3	2716,6	7,4668
160	1,984	2597,8	2796,2	7,6597
200	2,172	2658,1	2875,3	7,8343
280	2,546	2779,6	3034,2	8,1445
320	2,732	2841,5	3114,6	8,2849
360	2,917	2904,2	3195,9	8,4175
400	3,103	2967,9	3278,2	8,5435
500	3,565	3131,6	3488,1	8,8342



#### 4.- Ecuaciones de Estado (IX)

Sustancia	$T_k$ (°C)	$p_k$ (bar)	$\rho_k$ (kg/m <sup>3</sup> )
O <sub>2</sub>	-118,4	50,8	410
H <sub>2</sub> O	347,15	221,2	310
CO	-140,2	35	301
NH <sub>3</sub>	132,3	112,8	235

En los **Gases Reales** la ecuación de estado es:

$$p v = Z R T$$

Z el factor de compresión (1 en los ideales)  
A altas T<sup>a</sup> se comportan como ideales

Se llaman **Magnitudes Reducidas** a los valores del un estado divididos por los del punto crítico

$$p_r = \frac{p}{p_k}; \quad v_r = \frac{v}{v_k}; \quad T_r = \frac{T}{T_k}$$

Por último, MUCHO OJO A ...

En Termodinámica la T<sup>a</sup> se expresa en grados Kelvin:

$$K = ^\circ C + 273$$

Se trabaja con las presiones absolutas en Pa

$$p_{abs} = p_{man} + p_{atm} \quad [Pa]$$

$$p_{atm} \approx 100 \text{ kPa}$$

- |  |  |   |                                      |
|--|--|---|--------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Si se quisiera trabajar en °C:</b></li> </ul>  | <p>sustituir T por (T + 273)</p> $p v = R T \Rightarrow p v = R (T + 273)$           | } | $p v = R T \Rightarrow$              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Si se quisiera trabajar en bar:</b></li> </ul> | <p>sustituir p por (10<sup>5</sup> p)</p> $p v^n = cte \Rightarrow 10^5 p v^n = cte$ |   | $\Rightarrow 10^5 p v = R (T + 273)$ |

Ningún libro de Termo lo hace