

# MÁQUINAS TÉRMICAS

---

## Aspectos Fundamentales de Termodinámica

*Prof. Miguel ASUAJE*  
*Mayo 2012*

## Contenido

---

- ASPECTOS FUNDAMENTALES**
  - Breve revisión de los conceptos de Termodinámica
  - Trabajo y Calor
  - Primera Ley
  - Segunda Ley
  - Ciclo de Carnot

## Otras Unidades

Unidad de energía	Caloria	BTU	KWH	Julio	BPE	TPE
Caloria	1	0.00396	1.16 mm	4.187	0.000651mm	0.000093mm
BTU	252	1	0.000293	1055	0.164mm	0.023mm
KWH	0.86MM	3413	1	3.6MM	0.00056	0.00008
Julio	0.239	0.00095	0.27mm	1	0.000155	0.000022mm
BPE	1537.2MM	6.1 MM	1787.28	6435.5MM	1	7
TPE	10760.4MM	42.7MM	12511	45048MM	0.143	1

## Otras Unidades

1 therm = $10^4$ BTU							
1 Quadrillon = 1 Peta = $10^{15}$							
(K) Kilo = $10^3$							
(M) Mega = $10^6$							
(G) Giga = $10^9$							
(T) Tera = $10^{12}$							
(P) Peta = $10^{15}$							
(E) Exa = $10^{18}$							
(Z) Zeta = $10^{21}$							
(Y) Yeta = $10^{24}$							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ingles</th> <th>Español</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 billion</td> <td>= 1 millardo</td> </tr> <tr> <td>1 trillon</td> <td>= 1 Tera</td> </tr> </tbody> </table>	Ingles	Español	1 billion	= 1 millardo	1 trillon	= 1 Tera
Ingles	Español						
1 billion	= 1 millardo						
1 trillon	= 1 Tera						

## ¿Por qué es importante la Termodinámica y el estudio de Turbomáquinas Térmicas?

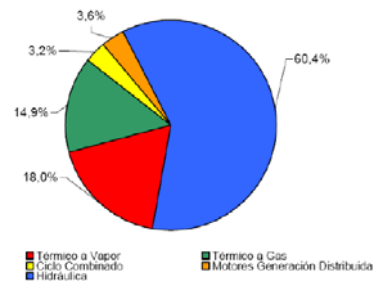
- ~ 2/3 energía eléctrica mundial es generada c/Centrales Termoeléctricas a base de combustibles fósiles (~ 12,7 trillion kWh @ EIA-2007)

Centro-Sur-America (~ 0,3 trillion kWh @ EIA-2007)

- Centro-Sur-América, gen. eléctrica: 68% Hidro vs. 30% Fósil vs. 2% Otros (@ EIA-2007)

- Combustibles fósiles/gen. eléctrica:  
Carbón, Metano y Fuel Oil

- Centrales Termoeléctricas/Fósiles:  
Turbinas a Vapor, Turbinas a Gas, Cielo Combinado → ¡Máquinas Térmicas!



**Capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional por fuente primaria para Junio 2010.**

Ref.: Centro Nacional de Gestión del Sistema Eléctrico de Venezuela

## Conceptos Básicos de la Termodinámica ...

¿Qué es la Termodinámica?

Therme      Dynamis

Ciencia que estudia las transformaciones energéticas.

Basada en cuatro leyes

- Ley cero
- Primera Ley
- Segunda Ley
- Tercera Ley

→ Nace por la necesidad de comprender y estudiar el vapor

## Conceptos Básicos de la Termodinámica ...

### SISTEMA

Es una región del espacio definida por un observador



### Propiedad Termodinámica

Variable que cuantifica la situación de un sistema

#### Intensivas

NO dependen de la masa

#### Extensivas

Dependen de la masa

## Conceptos Básicos de la Termodinámica ...

### ESTADO

Condición del sistema definida por sus propiedades independientes

### PROCESO

La transformación de un estado a otro



### CICLO

Proceso que comienza y termina en un mismo estado



# Conceptos Básicos de la Termodinámica ...

## EQUILIBRIO

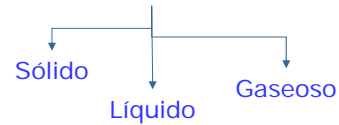
Un sistema está en equilibrio siempre y cuando no ocurran cambios en sus propiedades sin un estímulo externo

- ✓Térmico
- ✓Mecánico
- ✓Químico
- ✓De fase



## FASE

Cantidad homogénea y uniforme de materia



IMPORTANTE: Para una sustancia pura no pueden coexistir en un mismo instante más de tres fases

# Las Propiedades Termodinámicas ...

P v T

- Volumen específico
 
$$v = \frac{1}{\rho}$$
- Presión
- Temperatura

(a)

(b)

En un sistema simple podemos elegir como variables independientes  $P$  (presión) y  $T$  (temperatura) ya que son las más fáciles de medir y si consideramos el volumen  $V$  como variable dependiente de  $P$  y  $T$ , entonces:  $V = V(P, T)$

## Otras Propiedades Termodinámicas ...

$\hat{u}$	→	Energía Interna	→	Excitación y Movimiento a nivel Molecular
$h = \hat{u} + \frac{p}{\rho}$	→	Entalpía	→	Función matemática combinación de funciones de estado
$s$	→	Entropía	→	"Medida de desorden Molecular". Propiedad termodinámica vinculada con ciclos reversibles
$C_p \wedge C_v$	→	Calores Específicos	→	Calor Transferido a un sistema para variar en un diferencial su temperatura

### Dos pseudo - Propiedades de Transporte:

$k$	→	Conductividad	→	Vinculado a la transferencia de Calor
$\mu$	→	Viscosidad	→	Vinculado a al movimiento del fluido

## Propiedades de Estancamiento

### Propiedades Totales:

→ Valor que contemplan las propiedades estáticas y las contribuciones de las velocidades

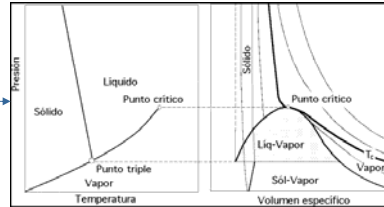
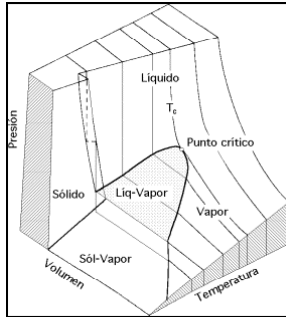
$$P_0 = P_{est} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2$$

$$h_0 = h_{est} + \frac{1}{2} \cdot c^2$$

$$T_0 = T_{est} + \frac{1}{2 \cdot C_p} \cdot c^2$$



# Diagramas Termodinámicos



## Postulado de Estado:

Se define el estado de una sustancia pura especificando dos propiedades intensivas independientes

## Punto Crítico:

Limite superior para la coexistencia de fases en equilibrio

$$\rho_{\text{líquido}} = \rho_{\text{gas}}$$

## Punto Triple:

Conviven en equilibrio el estado sólido, el estado líquido y el estado gaseoso de una sustancia



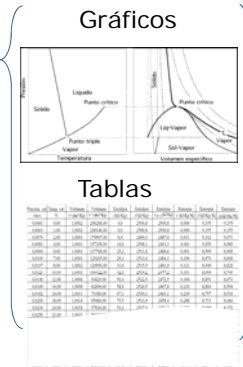
# Tablas Termodinámicas

## Propiedades Termodinámicas del Agua en el Domo de Saturación

Presión sat bars	Temp. sat. °C	Volumen $v'$ (dm <sup>3</sup> /Kg)	Volumen $v''$ (dm <sup>3</sup> /Kg)	Entalpia $i'$ (kJ/Kg)	Entalpia $i''$ (kJ/Kg)	Entalpia $i'_{(1..v)}$ (kJ/Kg)	Entropia $s'$ (kJ/Kg °K)	Entropia $s''$ (kJ/Kg °K)	Entropia $\Delta s$ (kJ/Kg °K)
0.0061	0.00	1.0002	206288.00	0.0	2500.8	2500.8	0.000	9.155	9.155
0.0061	1.00	1.0002	206146.00	0.0	2500.8	2500.8	0.000	9.155	9.155
0.0070	2.00	1.0001	179907.00	8.4	2496.0	2487.6	0.031	9.102	9.071
0.0081	4.00	1.0001	157258.00	16.8	2508.1	2491.3	0.061	9.050	8.989
0.0094	6.00	1.0001	137768.00	25.2	2511.8	2486.6	0.091	8.999	8.908
0.0100	7.00	1.0001	129205.00	29.3	2513.6	2484.3	0.106	8.974	8.868
0.0107	8.00	1.0002	120956.00	33.6	2515.5	2481.9	0.121	8.949	8.828
0.0123	10.00	1.0003	106422.00	42.0	2519.2	2477.2	0.151	8.900	8.749
0.0140	12.00	1.0006	93829.00	50.4	2522.9	2472.5	0.180	8.851	8.671
0.0160	14.00	1.0008	82894.00	58.8	2526.5	2467.8	0.210	8.804	8.594
0.0182	16.00	1.0011	73380.00	67.1	2530.3	2463.1	0.239	8.757	8.518
0.0206	18.00	1.0014	65084.00	75.5	2533.9	2458.4	0.268	8.711	8.444
0.0234	20.00	1.0018	57836.00	83.4	2537.6	2453.7	0.296	8.666	8.370
0.0250	21.00	1.0021	54260.00	88.4	2539.5	2451.1	0.312	8.642	8.330
0.0264	22.00	1.0023	51491.00	92.2	2541.2	2449.0	0.325	8.622	8.297
0.0298	24.00	1.0028	45925.00	100.6	2544.8	2444.2	0.353	8.579	8.226
0.0336	26.00	1.0033	41034.00	109.0	2548.5	2439.5	0.381	8.536	8.155
0.0378	28.00	1.0038	36727.00	117.3	2552.1	2434.8	0.409	8.494	8.085
0.0424	30.00	1.0044	32920.00	125.7	2555.7	2430.1	0.437	8.452	8.014

# Ecuaciones de Estado

Propiedades de las sustancias son tan complejas



Funciones matemáticas que permiten la descripción de los estados termodinámicos de una sustancia

Ecuación de Gases Ideales:

$$pV = RT \quad \text{donde: } R = \frac{\bar{R}}{M}$$

p	v <sup>*</sup>	T	R
kPa	m <sup>3</sup>	K	8.314 (kPa)(m <sup>3</sup> )/(kmol)(K)
MPa	m <sup>3</sup>	K	0.008 31 (MPa)(m <sup>3</sup> )/(kmol)(K)
bar	m <sup>3</sup>	K	0.083 14 (bar)(m <sup>3</sup> )/(kmol)(K)
psi	ft <sup>3</sup>	°R	10.73 (psi)(ft <sup>3</sup> )/(lb-mol)(°R)
lb/ft <sup>2</sup>	ft <sup>3</sup>	°R	1345 (psf)(ft <sup>3</sup> )/(lb-mol)(°R)

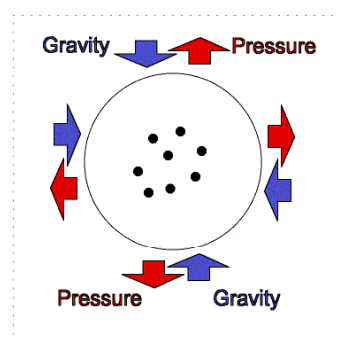
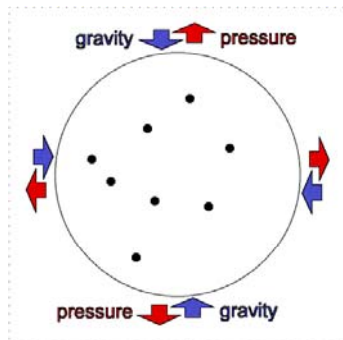
y

$$\bar{R} = 8,3144 \left[ \frac{J}{mol K} \right]$$

Constante Universal de los gases

# Gas Ideal y Gases Reales

Gas Ideal  $\neq$  Gas Real



Gases Reales:  $\rho_g = f(p, T) \quad h_g = f(p, T) \quad \mu_g = f(p, T)$



# Factor de Compresibilidad

La diferencia entre los gases reales e ideales es considerado por el factor de compresibilidad Z.

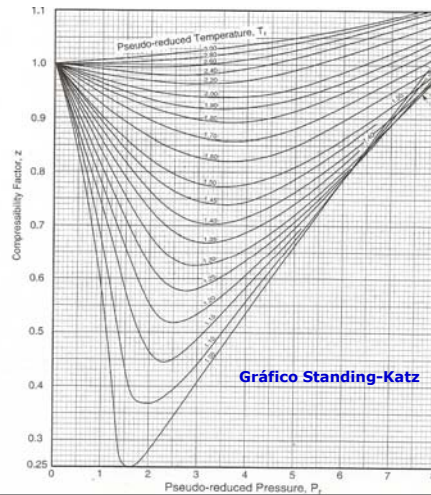
**Gas Ideal** →  $P \cdot v = R \cdot T$

**Gas Real** →  $P \cdot v = Z \cdot R \cdot T$

$Z = f(P, T) = f(P_r, T_r)$

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}} \quad P_r = \frac{P}{P_{cr}}$$

- Las propiedades pseudocríticas  $P_{cr}$  y  $T_{cr}$  son funciones de la composición del gas (o de la gravedad específica  $\gamma_g$ ).
- La precisión de los factores Z de Standing-Katz es usualmente de 1-3%.



# Tablas. Propiedades de Gases

Physical Constants

Compound	Molecular Weight	z <sub>c</sub>	Critical Temperature		Critical Pressure		Acentric Factor ω
			°R	K	psia	MPa	
C <sub>1</sub>	16.043	0.29	343	191	666	4.60	0.0104
C <sub>2</sub>	30.070	0.29	550	305	707	4.88	0.0979
C <sub>3</sub>	44.097	0.28	666	370	617	4.25	0.1522
iC <sub>4</sub>	58.124	0.28	734	408	528	3.65	0.1852
nC <sub>4</sub>	58.124	0.27	765	425	551	3.80	0.1995
iC <sub>5</sub>	72.151	0.27	829	460	491	3.39	0.2280
nC <sub>5</sub>	72.151	0.27	845	470	489	3.37	0.2514
nC <sub>6</sub>	86.178	0.26	913	507	437	3.01	0.2994
nC <sub>7</sub>	100.205	0.26	972	540	397	2.74	0.3494
nC <sub>8</sub>	114.232	0.26	1024	569	361	2.49	0.3977
nC <sub>9</sub>	128.259	0.25	1070	595	332	2.29	0.4445
nC <sub>10</sub>	142.286	0.25	1112	618	305	2.10	0.4898
nC <sub>11</sub>	156.302	0.24	1150	639	285	1.97	0.5350
nC <sub>12</sub>	170.338	0.24	1185	658	264	1.82	0.5620
N <sub>2</sub>	28.016	0.29	227	126	493	3.40	0.0372
CO <sub>2</sub>	44.010	0.28	548	304	1071	7.38	0.2667
H <sub>2</sub> S	34.076	0.28	672	373	1300	8.96	0.0948
O <sub>2</sub>	32.000	0.29	278	155	731	5.04	0.0216
H <sub>2</sub>	2.016	0.30	60	33	188	1.30	-0.2202
H <sub>2</sub> O	18.015	0.235	1165	647	3199	22.06	0.3443

# Tablas. Propiedades de Gases

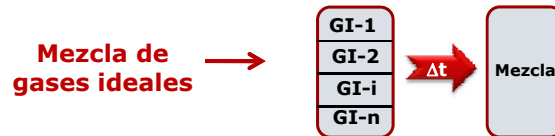
Gas	Formula	Molecular Weight	Vapor Pressure psia at 100°F	Critical Constants			Ideal Gas 14.696 psia, 60°F		Specific Heat, Btu/lb°F 14.696 psia, 60°F Ideal Gas
				Pressure psia	Temperature °F	Volume ft <sup>3</sup> /lb	Sgpr (air=1.00)	ft <sup>3</sup> /lb-gas	
Methane	CH <sub>4</sub>	16.0430	5000	666.0	-116.66	0.0988	0.5539	23.654	0.52676
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.0700	800	707.0	90.07	0.0783	1.0382	12.620	0.40789
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.0970	188.65	617.0	205.93	0.0727	1.5226	8.6059	0.38847
Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1230	72.581	527.9	274.4	0.0714	2.0068	6.5291	0.38669
n-butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1230	51.706	548.8	305.52	0.0703	2.0068	6.5291	0.39500
iso-pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.1500	20.443	490.4	368.96	0.0684	2.4912	5.2596	0.38448
n-pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.1500	15.675	488.1	385.7	0.0695	2.4912	5.2596	0.38831
Neo-pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.1500	36.72	464.0	321.01	0.0673	2.4912	5.2596	0.39038
n-hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.1770	4.9596	436.9	453.8	0.0688	2.9755	4.4035	0.38631
2-methyl pentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.1770	6.769	436.6	435.76	0.0682	2.9755	4.4035	0.38526
3-methyl pentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.1770	6.103	452.5	448.2	0.0682	2.9755	4.4035	0.37902
Neo hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.1770	9.859	446.7	419.92	0.0667	2.9755	4.4035	0.38231
2,3-dimethylbutane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.1770	7.406	454.0	440.08	0.0665	2.9755	4.4035	0.37762
n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	1.621	396.8	512.8	0.0682	3.4598	3.7872	0.38449
2-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	2.273	396.0	494.44	0.0673	3.4598	3.7872	0.38170
3-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	2.13	407.6	503.62	0.0646	3.4598	3.7872	0.37882
3-Ethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	2.012	419.2	513.16	0.0665	3.4598	3.7872	0.38646
2,2-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	3.494	401.8	476.98	0.0665	3.4598	3.7872	0.38651
2,4-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	3.294	397.4	475.72	0.0667	3.4598	3.7872	0.39627
3,3-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	2.775	427.9	505.6	0.0662	3.4598	3.7872	0.38306
Triptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.2040	3.376	427.9	496.24	0.0636	3.4598	3.7872	0.37724
n-octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.2310	0.5371	360.7	564.15	0.0673	3.9441	3.322	0.38334
DI Isobutyl	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.2310	1.1020	381.1	530.26	0.0676	3.9441	3.322	0.37571
Isooctane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.2310	1.7090	372.7	519.28	0.0657	3.9441	3.322	0.38222
n-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.2590	0.17155	330.7	610.72	0.0693	4.4284	2.9568	0.38248
n-Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.2850	0.06088	304.6	652.1	0.0702	4.9127	2.6671	0.38181
Cyclopentane	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.1340	9.917	653.8	461.1	0.0594	2.4215	5.411	0.27122
Methylcyclopentane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.1610	4.491	548.8	499.28	0.0607	2.9059	4.509	0.30027
Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.1610	3.267	590.7	536.6	0.0586	2.9059	4.509	0.29012

# Tablas. Propiedades de Gases

Gas	Formula	Molecular Weight	Vapor Pressure psia at 100°F	Critical Constants			Ideal Gas 14.696 psia, 60°F		Specific Heat, Btu/lb°F 14.696 psia, 60°F Ideal Gas
				Pressure psia	Temperature °F	Volume ft <sup>3</sup> /lb	Sgpr (air=1.00)	ft <sup>3</sup> /lb-gas	
Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	98.1890	1.609	503.4	570.2	0.0690	3.3902	3.8649	0.31902
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.0540	1400	731.0	48.54	0.0746	0.9686	13.527	0.35789
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.0810	232.8	676.6	198.31	0.0717	1.4529	9.0179	0.35683
Butylene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.1080	62.555	586.4	296.18	0.0683	1.9373	6.7636	0.35535
Cis-2-butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.1080	45.97	615.4	324.31	0.0667	1.9373	6.7636	0.33275
Trans-2-butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.1080	49.86	574.9	311.8	0.0679	1.9373	6.7636	0.35574
Isobutene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.1080	64.95	580.2	292.49	0.0681	1.9373	6.7636	0.36636
1-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.1340	19.12	509.5	376.86	0.0674	2.4215	5.411	0.35944
1,2-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.0920	36.53	656.0	354	0.0700	1.8677	7.0156	0.34347
1,3-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.0920	59.46	620.3	306	0.0653	1.8677	7.0156	0.34223
Isoprene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	68.1190	16.68	582.0	403	0.0660	2.3520	5.571	0.35072
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.0380		890.4	95.29	0.0693	0.8990	14.574	0.39754
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.1140	3.225	710.4	552.15	0.0531	2.8971	4.8581	0.24295
Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.1410	1.033	595.5	605.5	0.0549	3.1814	4.1184	0.26005
Ethyl-benzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.1670	0.3716	523	651.22	0.0564	3.6657	3.5744	0.27768
o-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.1670	0.2643	541.6	674.85	0.0557	3.6657	3.5744	0.28964
m-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.1670	0.3265	512.9	650.95	0.0567	3.6657	3.5744	0.27427
p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.1670	0.3424	509.2	649.47	0.0572	3.6657	3.5744	0.27470
Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.1520	0.2562	587.8	703	0.0534	3.5961	3.6435	0.26682
Isopropylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	120.1940	0.186	465.4	676.2	0.0569	4.1500	3.1573	0.30704
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> O	32.0420	4.631	1174	463.01	0.0590	1.1063	11.843	0.32429
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	46.0690	2.313	891.7	465.31	0.0581	1.5906	8.2372	0.33074
Carbon monoxide	CO	28.0100		506.8	-220.51	0.0527	0.9671	13.548	0.24847
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.0100		1071	87.73	0.0342	1.5196	8.6229	0.19909
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	34.0820	394.59	1306	212.4	0.0461	1.1768	11.134	0.23838
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.0650	85.46	1143	315.7	0.0305	2.2120	5.9235	0.14602
Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.0305	211.9	1647	270.2	0.0681	0.5860	22.283	0.49678
Air	N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	28.9625		546.9	-221.29	0.0517	1.0000	13.103	0.2398
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.0159		187.5	-400.3	0.0510	0.06960	188.25	3.4066
Oxygen	O <sub>2</sub>	31.9988		731.4	-181.4	0.0367	1.1048	11.859	0.21897
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0134		493	-232.48	0.0510	0.9672	13.546	0.24833
Chlorine	Cl <sub>2</sub>	70.9054	157.3	1157	290.69	0.0280	2.4482	5.3519	0.11375
Water	H <sub>2</sub> O	18.0153	0.85	3200.1	705.1	0.04975	0.62202	21.065	0.44469
Helium	He	4.0026		32.99	-450.31	0.2300	0.1382	94.614	1.24040
Hydrogen chloride	HCl	36.4606	906.71	1205	124.75	0.0356	1.2589	10.408	0.19086

## Mezcla de Gases Ideales

Los gases reales no son sustancias puras, sino que están formados por varios gases. Una aproximación para el estudio de gases reales es asumir que el gas en cuestión es una mezcla de gases ideales



En una **mezcla de GI** se cumple que:

- La mezcla se comporta como un gas ideal  $\rightarrow P \cdot V = n \cdot \bar{R} \cdot T$  **(I)**
- Cada gas de la mezcla se comporta como un gas ideal que ocupa un volumen  $V_i$ , está a  $T$  y pero a una presión parcial  $P_i$   $\rightarrow P_i \cdot V = n_i \cdot \bar{R} \cdot T$  **(II)**
- Cada gas puro a  $P$  y  $T$  es un gas ideal  $\rightarrow P \cdot V_i = n_i \cdot \bar{R} \cdot T$  **(III)**

## Mezcla de Gases Ideales

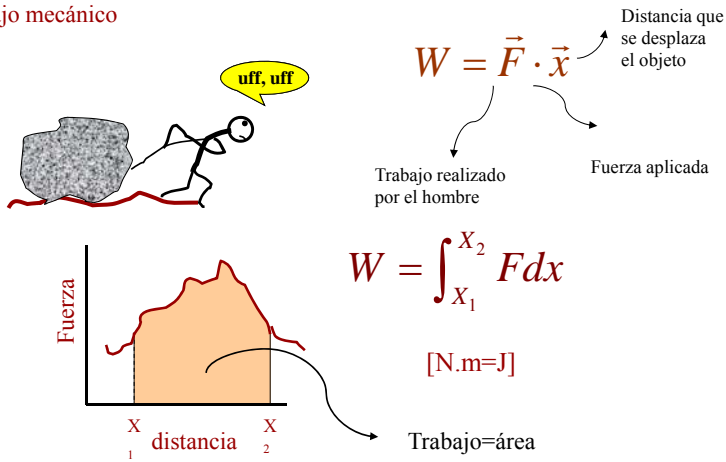
$$\begin{aligned} \text{(II)} \div \text{(I)} &\rightarrow \frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} = X_i \Rightarrow \sum P_i = \sum X_i \cdot P = P \cdot \sum X_i = P = P_m \\ &\Rightarrow \sum P_i = P = P_m \quad \text{Ley de Dalton} \end{aligned}$$

En la mezcla de GI también se puede demostrar que:

$$\begin{aligned} \sum V_i &= V = V_m \\ C_{P_m} &= \sum X_i \cdot C_{P_i} \quad T_{c_m} = \sum X_i \cdot T_{c_i} \quad PM_m = \sum X_i \cdot PM_i \\ C_{v_m} &= \sum X_i \cdot C_{v_i} \quad P_{c_m} = \sum X_i \cdot P_{c_i} \end{aligned}$$

# Trabajo

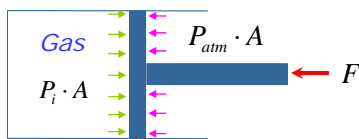
La primera noción de trabajo que conocemos es la de trabajo mecánico



# Trabajo

Veamos el sistema cilindro pistón

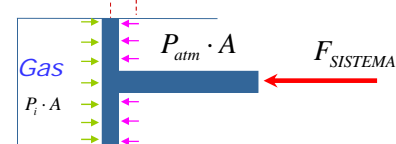
Para el Sistema en Equilibrio, la Segunda ley de Newton dice



$$\sum \vec{F} = 0$$

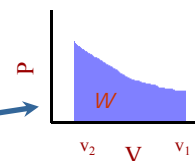
$$\sum \vec{F} = P_i \cdot A - P_{atm} \cdot A - F = 0$$

Muy lentamente aumentamos la fuerza de modo de comprimir el sistema



$$\partial W = F \cdot dx = P A dx = P dV$$

$$W = \int P dV$$



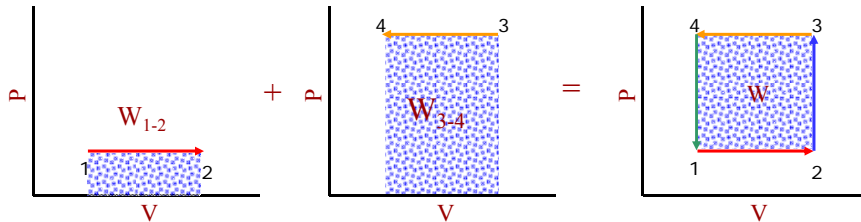
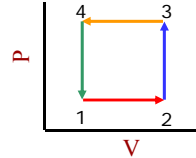
# Trabajo de un ciclo

Ciclo:

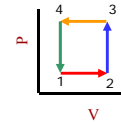
Secuencia ininterrumpida de fenómenos que se repiten en estricto orden

Veamos el siguiente ciclo

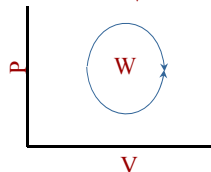
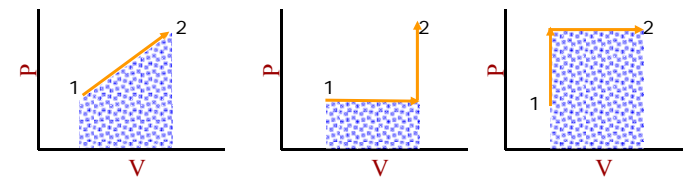
- 1-2 Expansión Isobárica
- 2-3 Compresión Isocórica
- 3-4 Compresión Isobárica
- 4-1 Expansión Isocórica



# Sobre el trabajo



- El Trabajo no es una propiedad de estado
- *i.e* El trabajo no se puede definir en un punto
- El trabajo dependerá de la trayectoria tomada
- El trabajo neto depende además de la forma o sentido en que se efectúe



Recorrido Horario  $W > 0$

El Sistema produce trabajo

Recorrido Anti-Horario  $W < 0$

El Sistema consume trabajo

# Calor

## ¿Qué podemos decir del calor?

- ✓Cantidad mensurable, relacionada pero distinta de aquella que llamamos temperatura
- ✓Todos los cuerpos que se comuniquen libremente y que no estén expuestos a acciones externas adquirirán la misma temperatura (ley 0)

## ¿Definición?

Transferencia inmaterial entre dos sistemas debido a una diferencia de temperatura



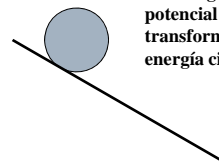
"Una definición matemática"

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T$$

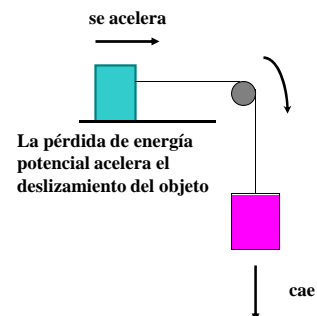
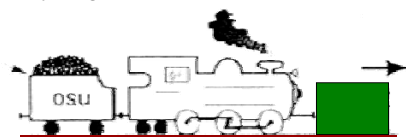
# Primera Ley

LA ENERGÍA DEL UNIVERSO SE CONSERVA

La energía potencial se transforma en energía cinética



energía química (carbón)  
energía interna (agua líquida Vapor de agua)  
el vapor se expande  
Trabajo energía cinética

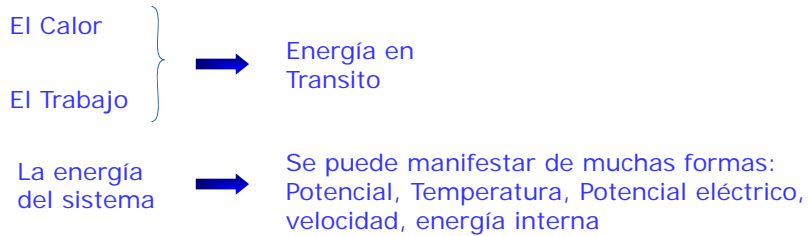


La pérdida de energía potencial acelera el deslizamiento del objeto

## Primera Ley

El cambio de energía de un sistema cerrado es igual al calor suministrado menos el trabajo realizado

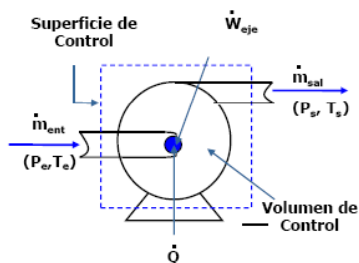
$$\Delta E = Q - W$$



## Ecuación de la Energía para un Flujo Estacionario

Aplicando ahora la primera ley para el volumen de control mostrado, se obtiene

$$\dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = \left( \frac{dE}{dt} \right)_{VC} = \dot{m}_{sal} \left( h_{sal} + \frac{V_{sal}^2}{2} + gz_{sal} \right) - \dot{m}_{ent} \left( h_{ent} + \frac{V_{ent}^2}{2} + gz_{ent} \right)$$



En las TMT la diferencia de cota entre la entrada y la salida es despreciable

Recordando que la mayoría de los procesos de las turbomáquinas son adiabáticos y sin acumulación de masa, se llega a:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_{02} - h_{01})$$

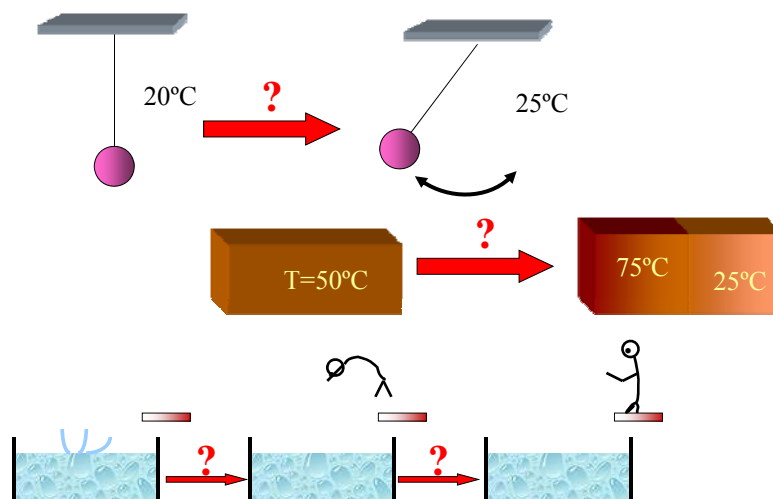
## Segunda Ley

---



## Segunda Ley

---





## Segunda Ley

### Entropía:

La ENTROPÍA es una función de estado, en cualquier proceso sólo depende de los estados inicial y final

#### Desigualdad de Clausius

$$\oint \frac{d\dot{Q}}{T} \leq 0 \quad \text{Si en el ciclo todos los procesos son reversibles...} \quad \oint \frac{d\dot{Q}_R}{T} = 0$$

La entropía  $S$ , para un cambio de estado finito, se define como .....

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{d\dot{Q}_R}{T} \quad \xrightarrow{\text{Flujo estacionario unidimensional}} \quad \int_1^2 \frac{d\dot{Q}}{T} = \dot{m} \cdot (s_2 - s_1)$$

Si el proceso es adiabático  $S_2 \geq S_1$

Si el proceso es Reversible  $S_2 = S_1$  **Caso Ideal!!!!!!**

## Segunda Ley

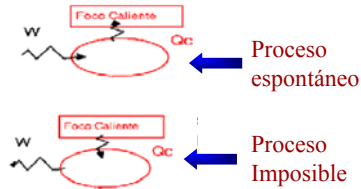
$$\Delta S_{\text{Universo}} = 0 \quad \text{Transformación REVERSIBLE.}$$

$$\Delta S_{\text{Universo}} > 0 \quad \text{Transformación IRREVERSIBLE.}$$

¡No es posible ninguna transformación que haga disminuir la entropía del universo!

¡Se puede disminuir la entropía de un sistema a cambio de aumentar la de otro, de tal forma que el balance de entropía del universo siempre aumente!

# Procesos



Dos tipos

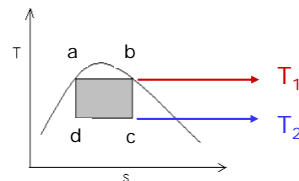
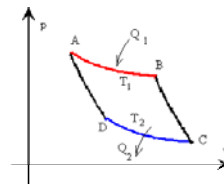
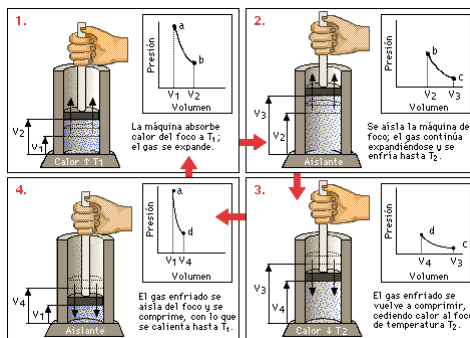
- Reversibles
- Irreversibles

Un proceso es termodinámicamente reversible cuando en cualquiera de los puntos de su evolución puede ser invertido el sentido de mismo, con modificación infinitesimal de las condiciones externas

Proceso Real o procesos disipativos en los que parte de la energía *se pierde* irremediamente aumentando la entropía del sistema

# Ciclo de Carnot

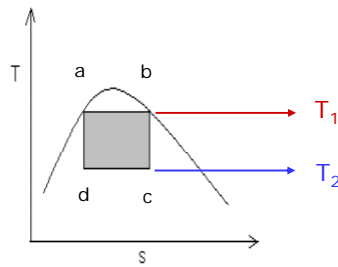
Se define ciclo de Carnot como un proceso cíclico reversible que utiliza un gas perfecto, y que consta de dos transformaciones isotérmicas y dos adiabáticas, tal como se muestra en la figura



## Principio de Carnot

---

Cualquier máquina térmica que siga un ciclo termodinámico reversible tendrá un rendimiento máximo



$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

## Relaciones Isoentrópicas para gas ideal

---

para un gas ideal  $Pv = RT$ , con  $k = c_p/c_v$ ,  
en condiciones isentrópicas

$$Pv^k = cte \longrightarrow \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k$$

$$Tv^{k-1} = cte \longrightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}$$

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