



**UC** | Chile

# Termodinámica (FIS1523)

## Calores específicos

**Felipe Isaule**  
felipe.isaule@uc.cl

Lunes 5 de Mayo de 2025

# Resumen clase anterior

- Definimos el **trabajo de frontera**:

$$dW = PdV.$$

- Definimos distintos tipos de procesos:

→ **Adiabáticos:**  $Q = 0 \longrightarrow \Delta U = \pm W.$

→ **Isocóricos:**  $V = \text{cte.} \longrightarrow W = 0$

→ **Isobáricos:**  $P = \text{cte.}$

→ **Isotérmicos:**  $T = \text{cte.}$

→ **Isotrópicos:**  $P = CV^{-n},$

# Clase 15: Calores específicos

- Calor específico.
- Calores específicos en gases ideales.
- Calores específicos en sólidos y líquidos.

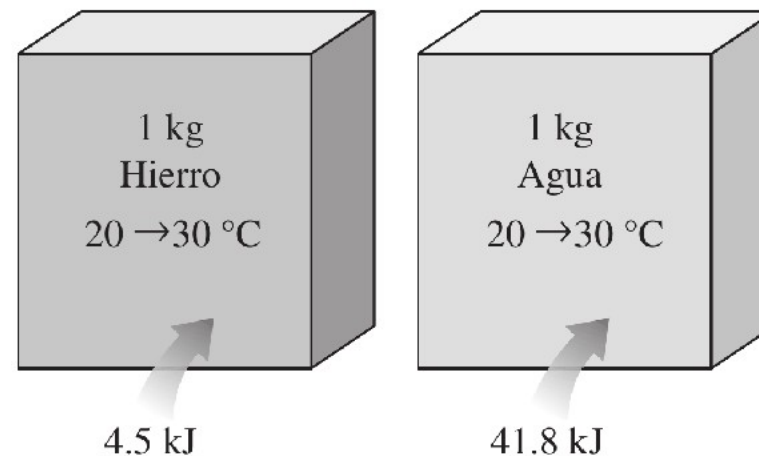
- Bibliografía recomendada:
  - Cengel (4.3, 4.4, 4.5).

# Clase 15: Calores específicos

- **Calor específico.**
- Calores específicos en gases ideales.
- Calores específicos en sólidos y líquidos.

# Calores específicos

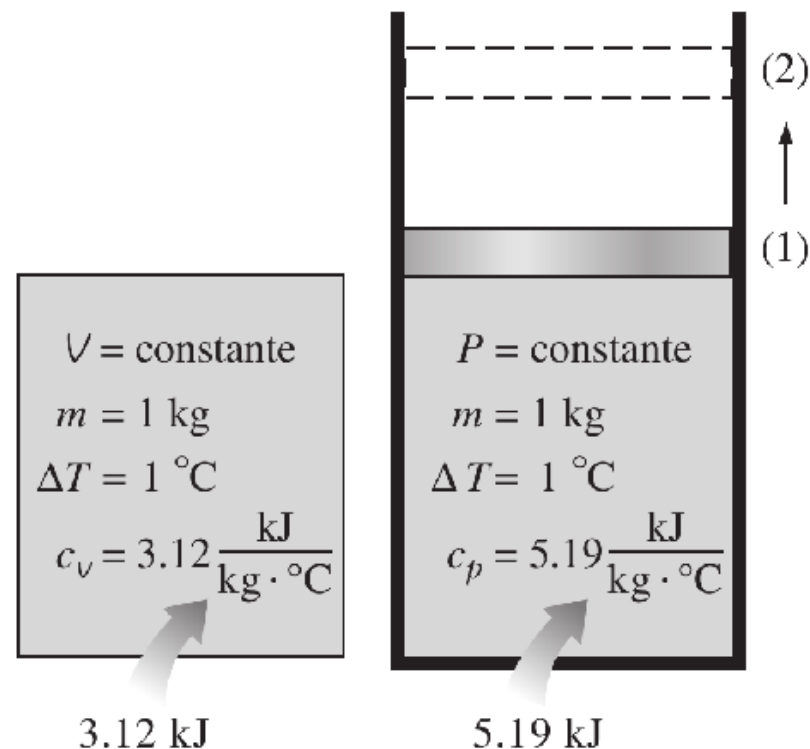
- **Distintas sustancias requieren cantidades de energía distintas para aumentar su temperatura, incluso si su masa es la misma.**



- Tales cantidades de energía se cuantifican con el **calor específico**.
- El calor específico se define como la **energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia**

# Calores específicos

- En termodinámica utilizamos **dos tipos** de calores específicos:
  - Calor específico a **volumen constante**  $c_V$ .
  - Calor específico a **presión constante**  $c_P$ .



# Calor específico a volumen constante

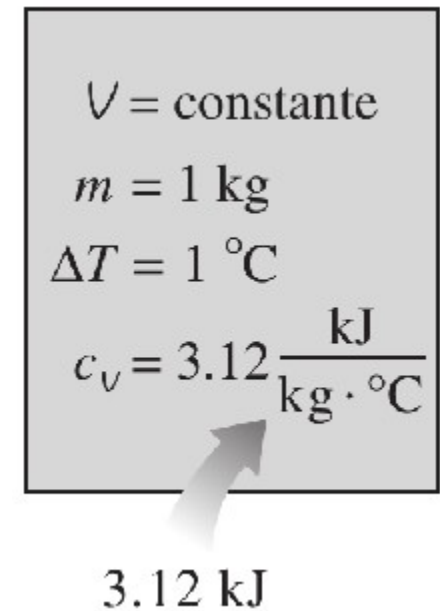
- Por conservación de la energía se tiene que

$$\delta e_{\text{entrada}} - \delta e_{\text{salida}} = du,$$

donde  $u$  es la **energía interna específica**.

- A **volumen constante** no existe trabajo de frontera.
- Por tanto, el lado izquierdo de la ecuación corresponde a la diferencia de energía buscada. Entonces, el **calor específico** es:

$$c_V dT = du \quad \longrightarrow \quad c_V = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_V.$$



$V = \text{constante}$   
 $m = 1 \text{ kg}$   
 $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $c_v = 3.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

3.12 kJ

# Calor específico a presión constante

- A **presión constante** el volumen cambia, por tanto sí hay trabajo de frontera.
- Para obtener una formula para  $c_P$  debemos usar la **entalpía**:

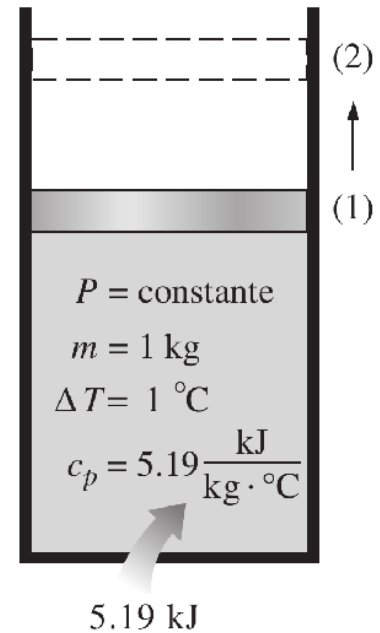
$$h = u + P\nu, \quad H = U + PV.$$

- El diferencial:

$$\begin{aligned} dH &= dU + PdV + VdP \\ &= \delta Q - PdV + PdV + VdP \\ &= \delta Q + VdP \quad \longleftarrow \text{Presión constante: } dP=0 \\ &= \delta Q \end{aligned}$$

- Entonces, el calor específico:

$$dH = c_P m dT \quad \longrightarrow \quad c_P = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P$$





# Calores específicos

- El calor específico **depende de la temperatura**. Además, en principio también depende del resto de propiedades termodinámicas.
- El calor específico usualmente se escribe en unidades de  $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$  o  $\text{kJ/kg}^\circ\text{K}$ .  
\*Ambas son equivalentes ya que se trabaja con diferencias de temperatura.
- A veces también se escriben en **base molar** ( $\text{kJ/kmol}^\circ\text{C}$  o  $\text{kJ/kmol}^\circ\text{K}$ ), donde se denotan como

$$\bar{c}_V, \quad \bar{c}_P.$$

# Clase 15: Calores específicos

- Calor específico.
- **Calores específicos en gases ideales.**
- Calores específicos en sólidos y líquidos.

# Calores específicos en gases ideales

- Se ha demostrado experimentalmente que en **gases ideales** el **calor específico** es **sólo una función de la temperatura**.
- Por tanto, podemos escribir:

$$du = c_V(T)dT, \quad dh = c_P(T)dT.$$

- Entonces, las **diferencias de energía interna y de entalpía**:

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_V(T)dT, \quad \Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_P(T)dT.$$

# Calores específicos en gases ideales

- Calores específicos de **gases reales** a **presiones bajas** son llamados **calores específicos de gas ideal**.
- Se denotan como  $c_{V,0}$  y  $c_{P,0}$ .
- Estos calores específicos se encuentran **tabulados**:

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes

a) A 300 K

Gas	Fórmula	Constante de gas, $R$ kJ/kg · K	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K
Aire	—	0.2870	1.005	0.718
Argón	Ar	0.2081	0.5203	0.3122
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.1433	1.7164	1.5734
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.1889	0.846	0.657
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.2765	1.7662	1.4897
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2964	1.5482	1.2518
Helio	He	2.0769	5.1926	3.1156
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	4.1240	14.307	10.183
Metano	CH <sub>4</sub>	0.5182	2.2537	1.7354
Monóxido de carbono	CO	0.2968	1.040	0.744
Neón	Ne	0.4119	1.0299	0.6179
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.2968	1.039	0.743
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0.0729	1.7113	1.6385
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0.2598	0.918	0.658
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.1885	1.6794	1.4909
Vapor	H <sub>2</sub> O	0.4615	1.8723	1.4108

Nota: La unidad kJ/kg · K es equivalente a kJ/kg · °C.

# Calores específicos en gases ideales

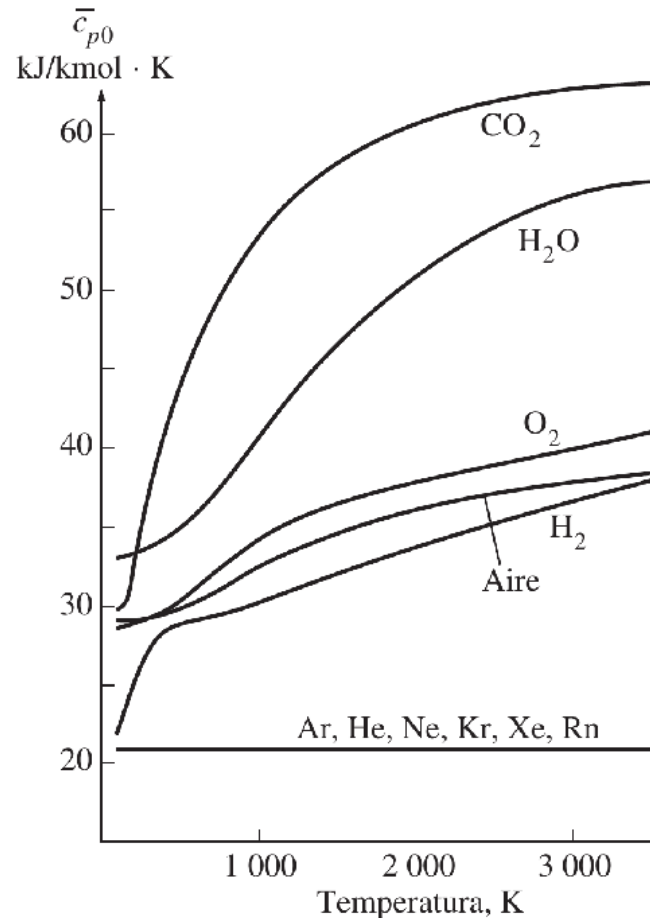
Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (*continuación*)

b) A diversas temperaturas

Temperatura, K	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$
	<i>Aire</i>			<i>Dióxido de carbono, CO<sub>2</sub></i>			<i>Monóxido de carbono, CO</i>		
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398
400	1.013	0.726	1.395	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395
450	1.020	0.733	1.391	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392
500	1.029	0.742	1.387	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387
550	1.040	0.753	1.381	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376
650	1.063	0.776	1.370	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370
700	1.075	0.788	1.364	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364
750	1.087	0.800	1.359	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358
800	1.099	0.812	1.354	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353
900	1.121	0.834	1.344	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343
1000	1.142	0.855	1.336	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335
Temperatura, K	<i>Hidrógeno, H<sub>2</sub></i>			<i>Nitrógeno, N<sub>2</sub></i>			<i>Oxígeno, O<sub>2</sub></i>		
	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$
250	14.051	9.927	1.416	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398
300	14.307	10.183	1.405	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395
350	14.427	10.302	1.400	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389
400	14.476	10.352	1.398	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382
450	14.501	10.377	1.398	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373
500	14.513	10.389	1.397	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365
550	14.530	10.405	1.396	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358
600	14.546	10.422	1.396	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350
650	14.571	10.447	1.395	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343
700	14.604	10.480	1.394	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337
750	14.645	10.521	1.392	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332
800	14.695	10.570	1.390	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327
900	14.822	10.698	1.385	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319
1000	14.983	10.859	1.380	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313

# Calores específicos en gases ideales

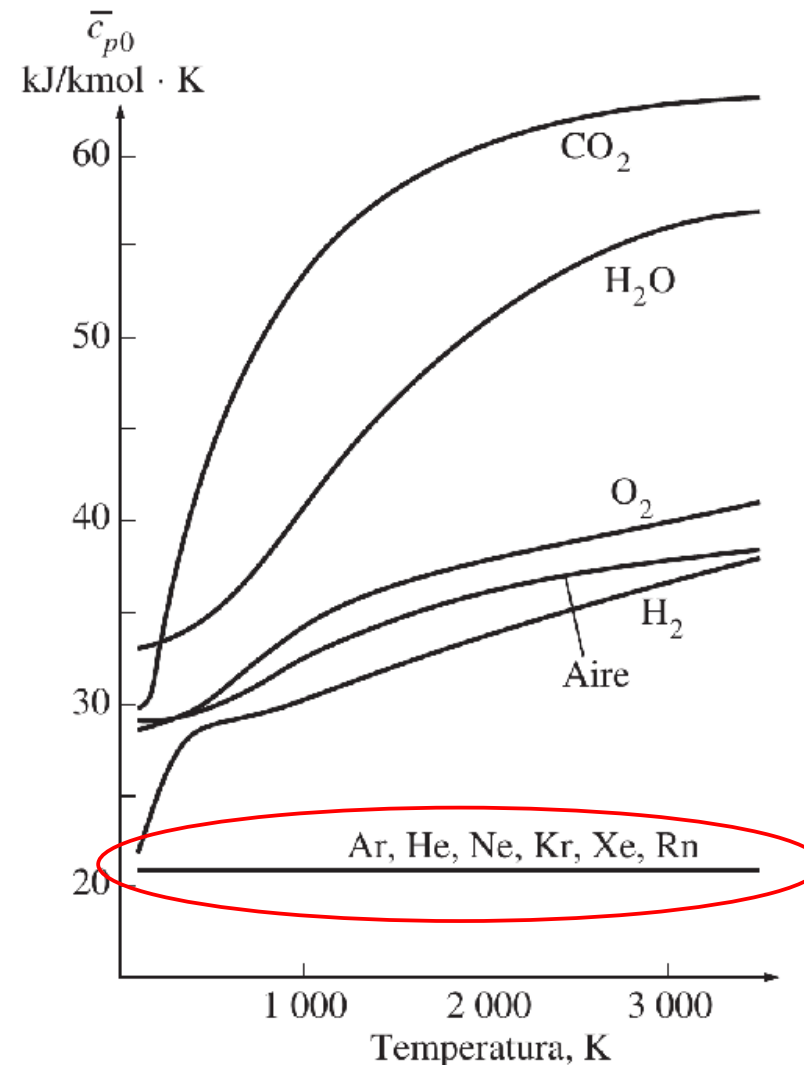
- De manera **gráfica**:



- Debido a que las **tablas** proporcionan **datos discretos**, las **integrales** se deben resolver **numéricamente**.

# Calores específicos en gases ideales

- Notar que el **calor específico** de gases monoatómicos permanece **constante**.



# Calores específicos en gases ideales

- También existen **ajustes** para facilitar la integración.

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (*conclusión*)

c) Como una función de la temperatura

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

( $T$  en K,  $c_p$  en kJ/kmol · K)

Sustancia	Fórmula	$a$	$b$	$c$	$d$	Rango de temp., K	% de error	
							Máx.	Prom.
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	21.8	$9.2143 \times 10^{-2}$	$-6.527 \times 10^{-5}$	$18.21 \times 10^{-9}$	273–1500	1.46	0.59
Aire	—	28.11	$0.1967 \times 10^{-2}$	$0.4802 \times 10^{-5}$	$-1.966 \times 10^{-9}$	273–1800	0.72	0.33
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	27.568	$2.5630 \times 10^{-2}$	$0.99072 \times 10^{-5}$	$-6.6909 \times 10^{-9}$	273–1500	0.91	0.36
Azufre	S <sub>2</sub>	27.21	$2.218 \times 10^{-2}$	$-1.628 \times 10^{-5}$	$3.986 \times 10^{-9}$	273–1800	0.99	0.38
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-36.22	$48.475 \times 10^{-2}$	$-31.57 \times 10^{-5}$	$77.62 \times 10^{-9}$	273–1500	0.34	0.20
<i>i</i> -Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-7.913	$41.60 \times 10^{-2}$	$-23.01 \times 10^{-5}$	$49.91 \times 10^{-9}$	273–1500	0.25	0.13
<i>n</i> -Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3.96	$37.15 \times 10^{-2}$	$-18.34 \times 10^{-5}$	$35.00 \times 10^{-9}$	273–1500	0.54	0.24
Cloruro de hidrógeno	HCl	30.33	$-0.7620 \times 10^{-2}$	$1.327 \times 10^{-5}$	$-4.338 \times 10^{-9}$	273–1500	0.22	0.08
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	25.78	$5.795 \times 10^{-2}$	$-3.812 \times 10^{-5}$	$8.612 \times 10^{-9}$	273–1800	0.45	0.24
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	22.26	$5.981 \times 10^{-2}$	$-3.501 \times 10^{-5}$	$7.469 \times 10^{-9}$	273–1800	0.67	0.22
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	22.9	$5.715 \times 10^{-2}$	$-3.52 \times 10^{-5}$	$7.87 \times 10^{-9}$	273–1500	0.46	0.18
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.900	$17.27 \times 10^{-2}$	$-6.406 \times 10^{-5}$	$7.285 \times 10^{-9}$	273–1500	0.83	0.28
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	19.9	$20.96 \times 10^{-2}$	$-10.38 \times 10^{-5}$	$20.05 \times 10^{-9}$	273–1500	0.40	0.22
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.95	$15.64 \times 10^{-2}$	$-8.344 \times 10^{-5}$	$17.67 \times 10^{-9}$	273–1500	0.54	0.13
<i>n</i> -Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6.938	$55.22 \times 10^{-2}$	$-28.65 \times 10^{-5}$	$57.69 \times 10^{-9}$	273–1500	0.72	0.20
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	29.11	$-0.1916 \times 10^{-2}$	$0.4003 \times 10^{-5}$	$-0.8704 \times 10^{-9}$	273–1800	1.01	0.26
Metano	CH <sub>4</sub>	19.89	$5.024 \times 10^{-2}$	$1.269 \times 10^{-5}$	$-11.01 \times 10^{-9}$	273–1500	1.33	0.57
Metanol	CH <sub>4</sub> O	19.0	$9.152 \times 10^{-2}$	$-1.22 \times 10^{-5}$	$-8.039 \times 10^{-9}$	273–1000	0.18	0.08
Monóxido de carbono	CO	28.16	$0.1675 \times 10^{-2}$	$0.5372 \times 10^{-5}$	$-2.222 \times 10^{-9}$	273–1800	0.89	0.37
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.90	$-0.1571 \times 10^{-2}$	$0.8081 \times 10^{-5}$	$-2.873 \times 10^{-9}$	273–1800	0.59	0.34
Óxido nítrico	NO	29.34	$-0.09395 \times 10^{-2}$	$0.9747 \times 10^{-5}$	$-4.187 \times 10^{-9}$	273–1500	0.97	0.36
Óxido nítrico	N <sub>2</sub> O	24.11	$5.8632 \times 10^{-2}$	$-3.562 \times 10^{-5}$	$10.58 \times 10^{-9}$	273–1500	0.59	0.26
Oxígeno	O <sub>2</sub>	25.48	$1.520 \times 10^{-2}$	$-0.7155 \times 10^{-5}$	$1.312 \times 10^{-9}$	273–1800	1.19	0.28
<i>n</i> -Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	6.774	$45.43 \times 10^{-2}$	$-22.46 \times 10^{-5}$	$42.29 \times 10^{-9}$	273–1500	0.56	0.21
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-4.04	$30.48 \times 10^{-2}$	$-15.72 \times 10^{-5}$	$31.74 \times 10^{-9}$	273–1500	0.40	0.12
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3.15	$23.83 \times 10^{-2}$	$-12.18 \times 10^{-5}$	$24.62 \times 10^{-9}$	273–1500	0.73	0.17
Trióxido de azufre	SO <sub>3</sub>	16.40	$14.58 \times 10^{-2}$	$-11.20 \times 10^{-5}$	$32.42 \times 10^{-9}$	273–1300	0.29	0.13
Agua (vapor)	H <sub>2</sub> O	32.24	$0.1923 \times 10^{-2}$	$1.055 \times 10^{-5}$	$-3.595 \times 10^{-9}$	273–1800	0.53	0.24



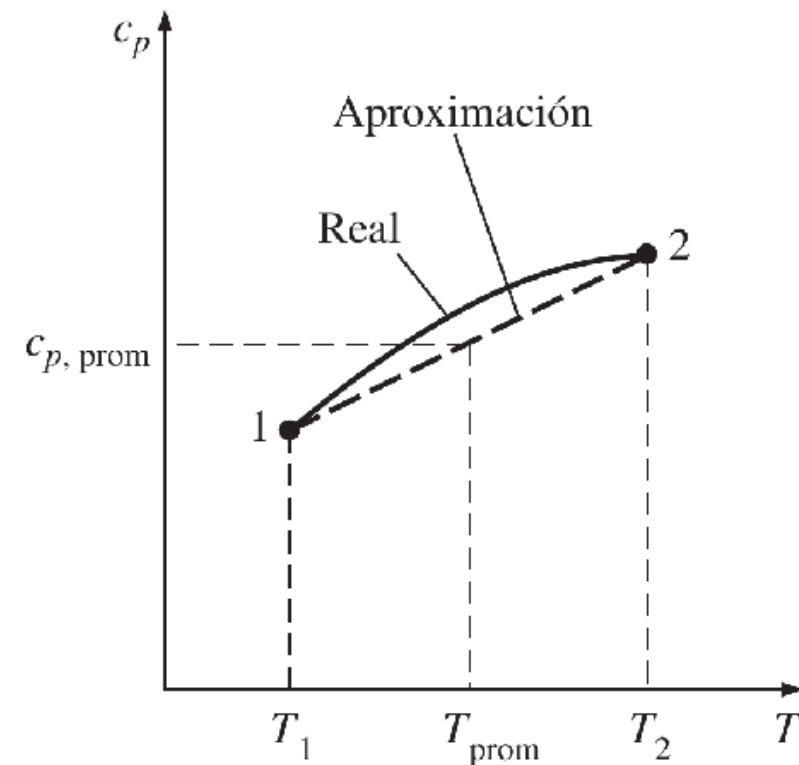
# Calores específicos en gases ideales

- Para cambios pequeños de temperaturas, podemos **integrar** utilizando **valores promedios**:

$$\Delta u = c_{V,\text{prom}} \Delta T, \quad \Delta h = c_{P,\text{prom}} \Delta T, \quad \Delta T = T_2 - T_1.$$

donde

$$c_{V/P,\text{prom}} = \frac{c_{V/P}(T_1) + c_{V/P}(T_2)}{2}.$$



# Calores específicos en gases ideales

- Una relación especial entre los calores específicos en gases ideales se obtiene al utilizar que

$$h = u + P\nu = u + RT \quad \longrightarrow \quad dh = du + RdT.$$

- Al diferenciar por  $dT$ :

$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R \quad \longrightarrow \quad \boxed{c_P = c_V + R.}$$

- De forma molar:

$$\bar{c}_P = \bar{c}_V + R_u.$$

- Finalmente, se define la **relación de calores específicos**:

$$k = \frac{c_P}{c_V}.$$

# Ejemplo 1:

- **Aire a 300 °K y 200 kPa se calienta a presión constante hasta 600 K. Determine el cambio de energía interna específica del aire usando:**
  - Datos de **tabla**.
  - El **ajuste** del calor específico.
  - El calor específico **promedio**.

# Ejemplo 1:

- Aire a 300 °K y 200 kPa se calienta a presión constante hasta 600 K. Determine el cambio de energía interna específica del aire usando:
- Datos de tabla.

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P <sub>r</sub>	h kJ/kg	v <sub>r</sub>	s <sup>o</sup> kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	170.70	1.29559
210	209.97	0.3987	149.69	151.20	1.34444
220	219.97	0.4690	156.89	134.60	1.39105
230	230.02	0.5477	164.00	120.50	1.43557
240	240.02	0.6355	171.13	108.40	1.47824
250	250.05	0.7329	178.28	97.90	1.51917
260	260.09	0.8405	185.45	88.78	1.55848
270	270.11	0.9590	192.60	80.80	1.59634
280	280.13	1.0889	199.75	73.80	1.63279
285	285.14	1.1584	203.33	70.50	1.65055
290	290.16	1.2311	206.91	67.50	1.66802
295	295.17	1.3058	210.49	64.79	1.68515
298	298.18	1.3543	212.64	63.19	1.69528
300	300.19	1.3850	214.07	62.12	1.70203
305	305.22	1.4686	217.67	59.50	1.71865
310	310.24	1.5546	221.25	57.20	1.73498
315	315.27	1.6432	224.85	55.10	1.75106
320	320.29	1.7375	228.42	53.20	1.76690
325	325.31	1.8345	232.02	51.40	1.78249
330	330.34	1.9352	235.61	49.80	1.79782
340	340.42	2.149	242.82	45.10	1.82790
350	350.49	2.379	250.02	42.20	1.85708
360	360.56	2.625	257.24	39.50	1.88543
370	370.67	2.892	264.46	36.70	1.91313
380	380.77	3.176	271.69	34.30	1.94001
390	390.88	3.481	278.93	32.10	1.96533
400	400.98	3.805	286.16	30.10	1.99194
410	411.12	4.153	293.43	28.30	2.01699
420	421.25	4.522	300.69	26.50	2.04142
430	431.43	4.915	307.99	25.10	2.06533
440	441.61	5.332	315.30	23.80	2.08870
450	451.80	5.775	322.62	22.50	2.11161
460	462.02	6.245	329.97	21.40	2.13407
470	472.24	6.742	337.32	20.40	2.15604
480	482.49	7.268	344.70	19.50	2.17760
490	492.74	7.824	352.08	18.70	2.19876
500	503.02	8.411	359.49	17.90	2.21952
510	513.32	9.031	366.92	17.20	2.23993
520	523.63	9.684	374.36	16.40	2.25997
530	533.98	10.37	381.84	15.70	2.27967
540	544.35	11.10	389.34	15.00	2.29906
550	554.74	11.86	396.86	14.30	2.31809
560	565.17	12.66	404.42	13.70	2.33685
570	575.59	13.50	411.97	13.10	2.35531

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P <sub>r</sub>	u kJ/kg
600	607.02	16.28	434.78
300	300.19	1.3860	214.07

Utilizamos directamente los datos de tabla:

$$\Delta u = 434.78 \text{ kJ/kg} - 214.07 \text{ kJ/kg}$$

$$\longrightarrow \Delta u = 220.71 \text{ kJ/kg}$$

Este corresponde al valor experimental ("real").

# Ejemplo 1:

- Aire a 300 °K y 200 kPa se calienta a presión constante hasta 600 K. Determine el cambio de energía interna específica del aire usando:
- El ajuste del calor específico.

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (continuación)

c) Como una función de la temperatura

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T en K,  $\bar{c}_p$  en kJ/kmol · K)

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d	Rango de temp., K	% de error Max. Prom.
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	21.8	9.2143 × 10 <sup>-2</sup>	-6.527 × 10 <sup>-5</sup>	18.21 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	1.46 0.59
Aire		28.11	0.1967 × 10 <sup>-2</sup>	0.4802 × 10 <sup>-5</sup>	-1.966 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.72 0.33
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	27.568	2.5630 × 10 <sup>-2</sup>	0.99072 × 10 <sup>-5</sup>	-6.6909 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.91 0.36
Azufre	S <sub>2</sub>	27.21	2.218 × 10 <sup>-2</sup>	-1.628 × 10 <sup>-5</sup>	3.986 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.99 0.38
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	36.22	48.475 × 10 <sup>-2</sup>	31.57 × 10 <sup>-5</sup>	77.62 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.34 0.20
i-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-7.913	41.60 × 10 <sup>-2</sup>	-23.01 × 10 <sup>-5</sup>	49.91 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.25 0.13
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3.96	37.15 × 10 <sup>-2</sup>	-18.34 × 10 <sup>-5</sup>	35.00 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.54 0.24
Cloruro de hidrógeno	HCl	30.33	-0.7620 × 10 <sup>-2</sup>	1.327 × 10 <sup>-5</sup>	-4.338 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.22 0.08
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	25.78	5.795 × 10 <sup>-2</sup>	-3.812 × 10 <sup>-5</sup>	8.612 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.45 0.24
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	22.26	5.981 × 10 <sup>-2</sup>	-3.501 × 10 <sup>-5</sup>	7.469 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.67 0.22
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	22.9	5.715 × 10 <sup>-2</sup>	-3.52 × 10 <sup>-5</sup>	7.87 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.46 0.18
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.900	17.27 × 10 <sup>-2</sup>	-6.406 × 10 <sup>-5</sup>	7.285 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.83 0.28
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	19.9	20.96 × 10 <sup>-2</sup>	-10.38 × 10 <sup>-5</sup>	20.05 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.40 0.22
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.95	15.64 × 10 <sup>-2</sup>	-8.344 × 10 <sup>-5</sup>	17.67 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.54 0.13
n-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6.938	55.22 × 10 <sup>-2</sup>	28.65 × 10 <sup>-5</sup>	57.69 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.72 0.20
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	29.11	-0.1916 × 10 <sup>-2</sup>	0.4003 × 10 <sup>-5</sup>	-0.8704 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	1.01 0.26
Metano	CH <sub>4</sub>	19.89	5.024 × 10 <sup>-2</sup>	1.269 × 10 <sup>-5</sup>	-11.01 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	1.33 0.57
Metanol	CH <sub>3</sub> O	19.0	9.152 × 10 <sup>-2</sup>	-1.22 × 10 <sup>-5</sup>	-8.039 × 10 <sup>-9</sup>	273-1000	0.18 0.08
Monóxido de carbono	CO	28.16	0.1675 × 10 <sup>-2</sup>	0.5372 × 10 <sup>-5</sup>	-2.222 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.89 0.37
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.90	-0.1571 × 10 <sup>-2</sup>	0.8061 × 10 <sup>-5</sup>	-2.873 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.59 0.34
Óxido nítrico	NO	29.34	0.09395 × 10 <sup>-2</sup>	0.9747 × 10 <sup>-5</sup>	-4.187 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.97 0.36
Óxido nítrico	N <sub>2</sub> O	24.11	5.8632 × 10 <sup>-2</sup>	3.562 × 10 <sup>-5</sup>	10.58 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.59 0.26
Óxígeno	O <sub>2</sub>	25.48	1.520 × 10 <sup>-2</sup>	-0.7155 × 10 <sup>-5</sup>	1.312 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	1.19 0.28
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	6.774	45.43 × 10 <sup>-2</sup>	22.46 × 10 <sup>-5</sup>	42.29 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.56 0.21
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-4.04	30.48 × 10 <sup>-2</sup>	-15.72 × 10 <sup>-5</sup>	31.74 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.40 0.12
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3.15	23.83 × 10 <sup>-2</sup>	-12.18 × 10 <sup>-5</sup>	24.62 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.73 0.17
Tróxido de azufre	SO <sub>3</sub>	16.40	14.58 × 10 <sup>-2</sup>	-11.20 × 10 <sup>-5</sup>	32.42 × 10 <sup>-9</sup>	273-1300	0.29 0.13
Agua (vapor)	H <sub>2</sub> O	32.24	0.1923 × 10 <sup>-2</sup>	1.055 × 10 <sup>-5</sup>	-3.595 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.53 0.24

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d
Aire	—	28.11	0.1967 × 10 <sup>-2</sup>	0.4802 × 10 <sup>-5</sup>	-1.966 × 10 <sup>-9</sup>

Utilizamos que:

$$\bar{c}_P = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Sin embargo, debido a que queremos obtener la energía interna, debemos utilizar  $\bar{c}_V$ . Entonces:

$$\bar{c}_P = \bar{c}_V + R_u \longrightarrow \bar{c}_V = a + bT + cT^2 + dT^3 - R_u$$

El cambio de energía interna por unidad de mol:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u} &= \int_{T_1}^{T_2} \bar{c}_V dT = \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + cT^2 + dT^3 - R_u) dT \\ &= (a - R_u)\Delta T + \frac{b}{2}(\Delta T)^2 + \frac{c}{3}(\Delta T)^3 + \frac{d}{4}(\Delta T)^4 \end{aligned}$$

# Ejemplo 1:

- Aire a 300 °K y 200 kPa se calienta a presión constante hasta 600 K. Determine el cambio de energía interna específica del aire usando:
- La interpolación del calor específico.

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (continuación)

c) Como una función de la temperatura

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T en K,  $\bar{c}_p$  en kJ/kmol · K)

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d	Rango de temp., K	% de error Max. Prom.
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	21.8	9.2143 × 10 <sup>-2</sup>	-6.527 × 10 <sup>-5</sup>	18.21 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	1.46 0.59
Aire		28.11	0.1967 × 10 <sup>-2</sup>	0.4802 × 10 <sup>-5</sup>	-1.966 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.72 0.33
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	27.568	2.5630 × 10 <sup>-2</sup>	0.99072 × 10 <sup>-5</sup>	-6.6909 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.91 0.36
Alufre	S <sub>2</sub>	27.21	2.218 × 10 <sup>-2</sup>	-1.628 × 10 <sup>-5</sup>	3.986 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.99 0.38
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	36.22	48.475 × 10 <sup>-2</sup>	31.57 × 10 <sup>-5</sup>	77.62 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.34 0.20
i-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-7.913	41.60 × 10 <sup>-2</sup>	-23.01 × 10 <sup>-5</sup>	49.91 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.25 0.13
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3.96	37.15 × 10 <sup>-2</sup>	-18.34 × 10 <sup>-5</sup>	35.00 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.54 0.24
Cloruro de hidrógeno	HCl	30.33	-0.7620 × 10 <sup>-2</sup>	1.327 × 10 <sup>-5</sup>	-4.338 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.22 0.08
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	25.78	5.795 × 10 <sup>-2</sup>	-3.812 × 10 <sup>-5</sup>	8.612 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.45 0.24
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	22.26	5.981 × 10 <sup>-2</sup>	-3.501 × 10 <sup>-5</sup>	7.469 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.67 0.22
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	22.9	5.715 × 10 <sup>-2</sup>	-3.52 × 10 <sup>-5</sup>	7.87 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.46 0.18
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.900	17.27 × 10 <sup>-2</sup>	-6.406 × 10 <sup>-5</sup>	7.285 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.83 0.28
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	19.9	20.96 × 10 <sup>-2</sup>	-10.38 × 10 <sup>-5</sup>	20.05 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.40 0.22
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.95	15.64 × 10 <sup>-2</sup>	-8.344 × 10 <sup>-5</sup>	17.67 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.54 0.13
n-Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6.938	55.22 × 10 <sup>-2</sup>	28.65 × 10 <sup>-5</sup>	57.69 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.72 0.20
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	29.11	-0.1916 × 10 <sup>-2</sup>	0.4003 × 10 <sup>-5</sup>	-0.8704 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	1.01 0.26
Metano	CH <sub>4</sub>	19.89	5.024 × 10 <sup>-2</sup>	1.269 × 10 <sup>-5</sup>	-11.01 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	1.33 0.57
Metanol	CH <sub>3</sub> O	19.0	9.152 × 10 <sup>-2</sup>	-1.22 × 10 <sup>-5</sup>	-8.039 × 10 <sup>-9</sup>	273-1000	0.18 0.08
Monóxido de carbono	CO	28.16	0.1675 × 10 <sup>-2</sup>	0.5372 × 10 <sup>-5</sup>	-2.222 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.89 0.37
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.90	-0.1571 × 10 <sup>-2</sup>	0.8061 × 10 <sup>-5</sup>	-2.873 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.59 0.34
Óxido nítrico	NO	29.34	0.09395 × 10 <sup>-2</sup>	0.9747 × 10 <sup>-5</sup>	-4.187 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.97 0.36
Óxido nítrico	N <sub>2</sub> O	24.11	5.8632 × 10 <sup>-2</sup>	3.562 × 10 <sup>-5</sup>	10.58 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.59 0.26
Óxígeno	O <sub>2</sub>	25.48	1.520 × 10 <sup>-2</sup>	-0.7155 × 10 <sup>-5</sup>	1.312 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	1.19 0.28
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	6.774	45.43 × 10 <sup>-2</sup>	22.46 × 10 <sup>-5</sup>	42.29 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.56 0.21
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-4.04	30.48 × 10 <sup>-2</sup>	-15.72 × 10 <sup>-5</sup>	31.74 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.40 0.12
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3.15	23.83 × 10 <sup>-2</sup>	-12.18 × 10 <sup>-5</sup>	24.62 × 10 <sup>-9</sup>	273-1500	0.73 0.17
Tríóxido de azufre	SO <sub>3</sub>	16.40	14.58 × 10 <sup>-2</sup>	-11.20 × 10 <sup>-5</sup>	32.42 × 10 <sup>-9</sup>	273-1300	0.29 0.13
Agua (vapor)	H <sub>2</sub> O	32.24	0.1923 × 10 <sup>-2</sup>	1.055 × 10 <sup>-5</sup>	-3.595 × 10 <sup>-9</sup>	273-1800	0.53 0.24

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d
Aire	—	28.11	0.1967 × 10 <sup>-2</sup>	0.4802 × 10 <sup>-5</sup>	-1.966 × 10 <sup>-9</sup>

Utilizando los datos de la tabla, que  $\Delta T = 300^\circ\text{K}$ , y que  $R_u = 8.114 \text{ kJ/kmol}^\circ\text{K}$ :

$$\longrightarrow \bar{u} = 6447 \text{ kJ/kmol}$$

Para obtener la energía interna por unidad de masa debemos dividir por la masa molar del aire:

$$M = 28.97 \text{ kg/kmol} \longrightarrow u = \frac{\bar{u}}{M} = \frac{6447 \text{ kJ/kmol}}{28.97 \text{ kg/kmol}}$$

$$\longrightarrow \boxed{u = 222.5 \text{ kJ/kg}}$$

Es una buena aproximación al valor experimental.

# Ejemplo 1:

- **Aire a 300 °K y 200 kPa se calienta a presión constante hasta 600 K. Determine el cambio de energía interna específica del aire usando:**
  - El calor específico promedio.

Temperatura, K	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$
	Aire		
250	1.003	0.716	1.401
300	1.005	0.718	1.400
350	1.008	0.721	1.398
400	1.013	0.726	1.395
450	1.020	0.733	1.391
500	1.029	0.742	1.387
550	1.040	0.753	1.381
600	1.051	0.764	1.376
650	1.063	0.776	1.370
700	1.075	0.788	1.364
750	1.087	0.800	1.359
800	1.099	0.812	1.354
900	1.121	0.834	1.344
1000	1.142	0.855	1.336

La temperatura promedio es:

$$T_{\text{prom}} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{300^\circ\text{K} + 600^\circ\text{K}}{2} = 450^\circ\text{K}$$

El calor específico (a volumen constante) a esta temperatura:


$$c_V = 0.733 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

La diferencia de energía interna:

$$\Delta u = c_V \Delta T = 0.733 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K} \cdot 300^\circ\text{K}$$

$$\longrightarrow \boxed{\Delta u = 220 \text{ kJ/kg}}$$

También es una buena aproximación al valor experimental.

# Clase 15: Calores específicos

- Calor específico.
- Calores específicos en gases ideales.
- **Calores específicos en sólidos y líquidos.**



# Sustancias incompresibles

- Las **sustancias incompresibles** son aquellas donde el **volúmen específico** se mantiene **constante**.
- **Líquidos** y, especialmente, **sólidos** se pueden aproximar como sustancias incompresibles.
- En **sustancias incompresibles** los **calores específicos a presión y volumen constante** son **idénticos**:

$$c = c_V = c_P.$$



# Cambios de energía interna y de entalpía

- En una **sustancia incompresible**, una **diferencia de energía interna** es simplemente:

$$du = c(T)dT \quad \longrightarrow \quad \Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c(T)dT \approx c_{\text{prom}}\Delta T.$$

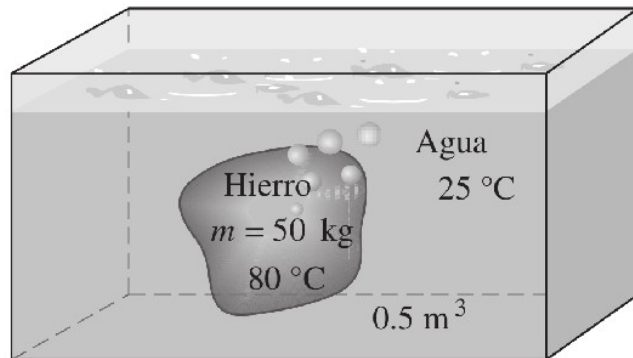
- Por otro lado, una **diferencia de entalpía**:

$$\underset{d\nu=0}{dh} = du + \nu dP \quad \longrightarrow \quad \boxed{\Delta h = \Delta u + \nu\Delta P \approx c_{\text{prom}}\Delta T + \nu\Delta P.}$$

- En **sólidos**  $dP \approx 0$ , entonces:  $dh = du \approx c_{\text{prom}}\Delta T$ .
- En **líquidos**:
  - Presión constante** (ej: calentadores):  $dh = du \approx c_{\text{prom}}\Delta T$ .
  - Temperatura constante** (ej: bombas):  $dh \approx \nu\Delta P$ .

## Ejemplo 2:

- Un bloque de hierro de **50 kg** a **80 °C** se sumerge en un recipiente aislado que contiene **0.5 m<sup>3</sup>** de agua líquida a **25 °C**. Determine la **temperatura** cuando se alcanza el **equilibrio térmico**.



## Ejemplo 2:

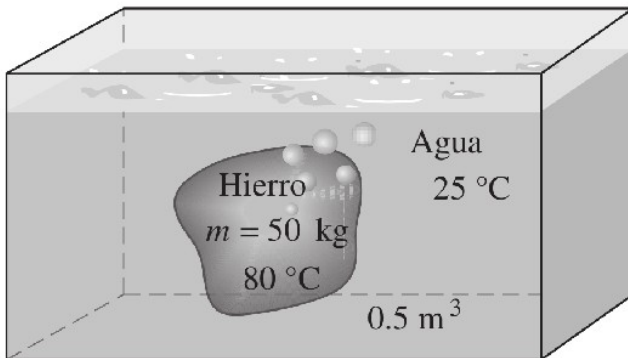
- Un bloque de hierro de **50 kg** a **80 °C** se sumerge en un recipiente aislado que contiene **0.5 m³** de agua líquida a **25 °C**. Determine la **temperatura** cuando se alcanza el **equilibrio térmico**.

El sistema completo:

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Al ser un sistema cerrado sin intercambio de calor:

$$0 = \Delta U$$



Debido a que la energía interna es una propiedad extensiva:

$$\Delta U = \Delta U_{\text{hierro}} + \Delta U_{\text{agua}} = 0$$

$$[mc(T_2 - T_1)]_{\text{hierro}} + [mc(T_2 - T_1)]_{\text{agua}} = 0$$

Para obtener la masa del agua utilizamos que su volumen específico a temperatura ambiente es:

$$\nu = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\longrightarrow m = V/\nu = \frac{0.5 \text{ m}^3}{0.001 \text{ m}^3/\text{kg}} = 500 \text{ kg}$$

## Ejemplo 2:

- Un bloque de hierro de **50 kg** a **80 °C** se sumerge en un recipiente aislado que contiene **0.5 m³** de agua líquida a **25 °C**. Determine la **temperatura** cuando se alcanza el **equilibrio térmico**.

[illegible]

Propiedades de Líquidos, sólidos y alimentos comunes (continuación)

2) Sólidos (los valores son para temperatura ambiente, excepto que se indique otra cosa)

Sustancia	Densidad, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, $c_p$ kJ/kg · K	Sustancia	Densidad, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, $c_p$ kJ/kg · K
<b>Metales</b>			<b>No metales</b>		
Acero dulce	7,830	0.500	Arena	1500	0.800
Aluminio			Arcilla	1000	0.920
200 K		0.787	Asfalto	2110	0.920
300 K		0.859	Caucho (blandos)	1100	1.840
330 K	7,700	0.902	Caucho (duro)	1100	2.000
350 K		0.949	Concreto	2300	0.615
400 K		0.949	Diamante	2420	0.615
450 K		0.973	Grafito	2500	0.711
500 K		0.997	Granito	2700	1.017
Bronce (76% Cu, 2% Zn, 2% Al)	8,280	0.400	Hielo		
200 K			200 K		1.56
Cobre			220 K		1.71
-173°C		0.254	240 K		1.86
-100°C		0.342	260 K		2.01
-50°C		0.367	273 K	921	2.11
0°C		0.381	Ladrillo común	1950	0.79
27°C	8,900	0.386	Ladrillo refractario (500°C)	2300	0.760
100°C		0.393	Madera (corteza) (25°C)		
200°C		0.403	Madera (vivo) (25°C)	545	1.21
Hierro	7,840	0.441	Madera (muerta (trénque, encino, etc.))	771	1.26
Laiton amarillo (65% Cu, 35% Zn)	8,310	0.400	Maderas suaves (abeto, pino, etc.)	513	1.38
Magnesio	1,730	1.000	Mármol	2600	0.880
Níquel	8,890	0.440	Piedra caliza	1650	0.909
Plata	10,475	0.235	Vidrio para ventanas	2700	0.800
Plomo	11,310	0.128	Vidrio (seco)	2250	0.840
Tungsteno	19,400	0.130	Vaso o tibia de vaso	800	1.0

De tabla, sabemos que:

$$\bullet c_{\text{agua}} = 4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

$$c_{\text{hierro}} = 0.45 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$$

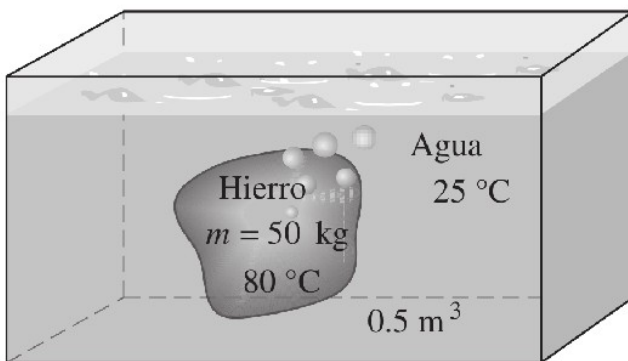
Entonces:

$$[mc(T_2 - T_1)]_{\text{hierro}} + [mc(T_2 - T_1)]_{\text{agua}} = 0$$

$$50 \text{ kg } 0.45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} (T_2 - (80 + 273)^\circ\text{K}) + 500 \text{ kg } 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} (T_2 - (25 + 273)^\circ\text{K}) = 0$$

Despejando  $T_2$ :

$$\longrightarrow \left| T_2 = 25.6^\circ \text{C} \right.$$



# Procesos a temperatura constante

- Anteriormente vimos que a **temperatura constante**, el **cambio de entalpía** está dado por:

$$dh \approx \nu \Delta P.$$

- Consideremos el caso en que:
  - El **estado 2** corresponde a **líquido comprimido** a una temperatura  $T$  y presión  $P$ .
  - El **estado 1** corresponde a **líquido saturado** a la misma temperatura.

$$\longrightarrow \boxed{h = h_{\text{sat}} + \nu(P - P_{\text{sat}}).}$$

# Resumen

- Definimos el **calor específico**, incluyendo su forma para procesos a **volúmen** y **presión constante**.
- Revisamos la forma que toma el calor específico en **gases ideales** y también en **sustancias incompresibles**.
- Próxima clase:
  - Procesos adiabáticos en gases ideales.