



**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.

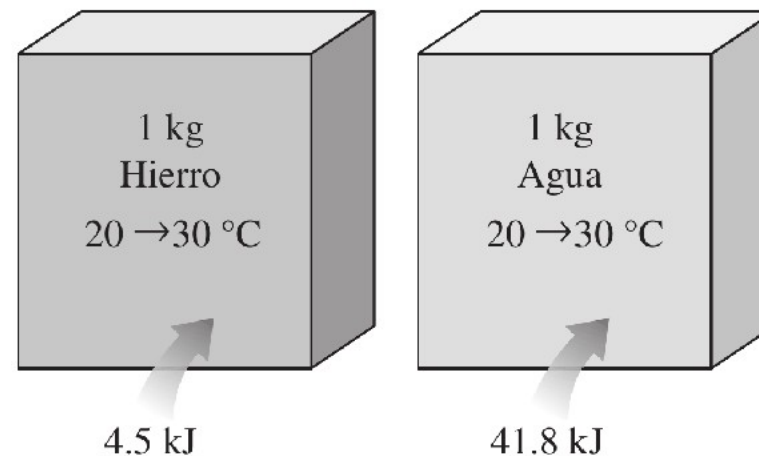
- Bibliografía recomendada:
  - Cengel (4.3, 4.4, 4.5).

# Clase 15: Calores específicos

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

# Calores específicos

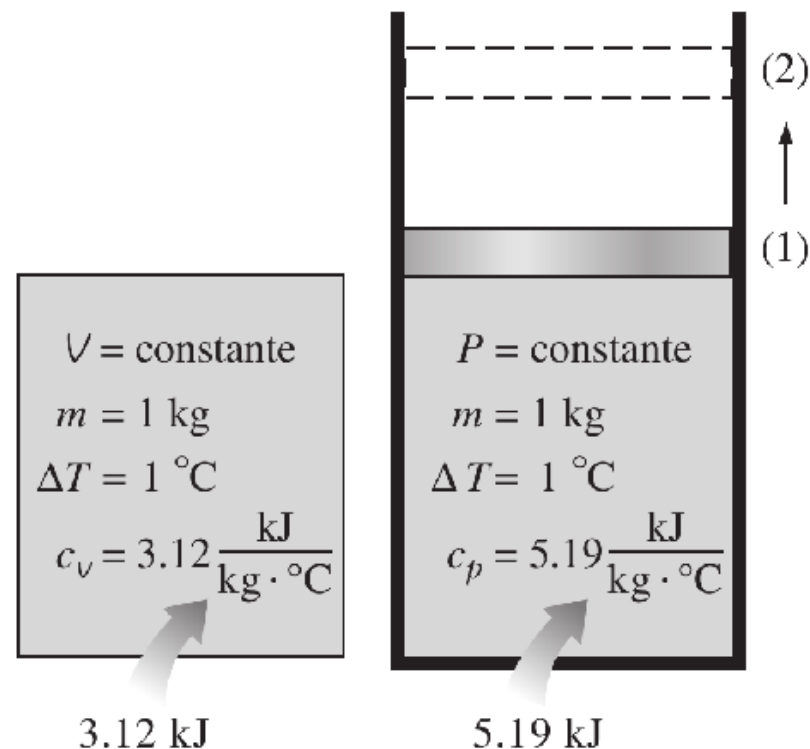
- **Distintas sustancias requieren cantidades de energía distintas para aumentar su temperatura, incluso si su masa es la misma.**



- 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

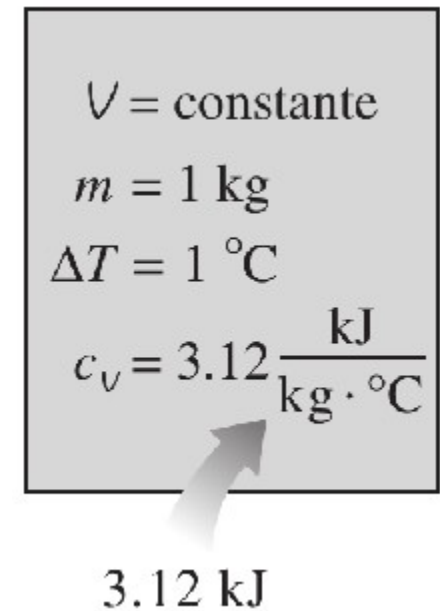
- Por conservación de la energía se tiene que

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

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**:

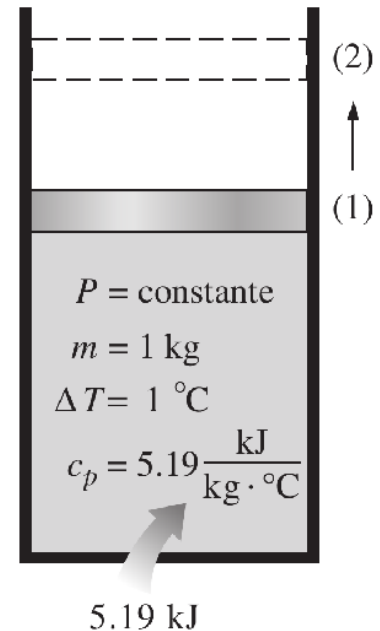
$$h = u + P\nu, \quad H = U + PV.$$

- El diferencial:

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

- Entonces, el calor específico:

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





# 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

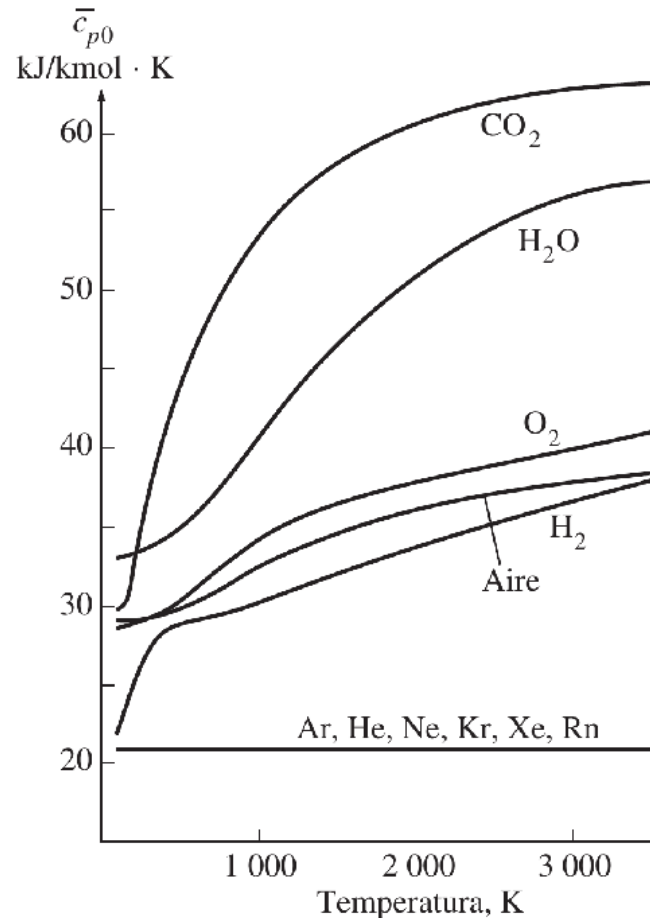
Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes (*continuación*)

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

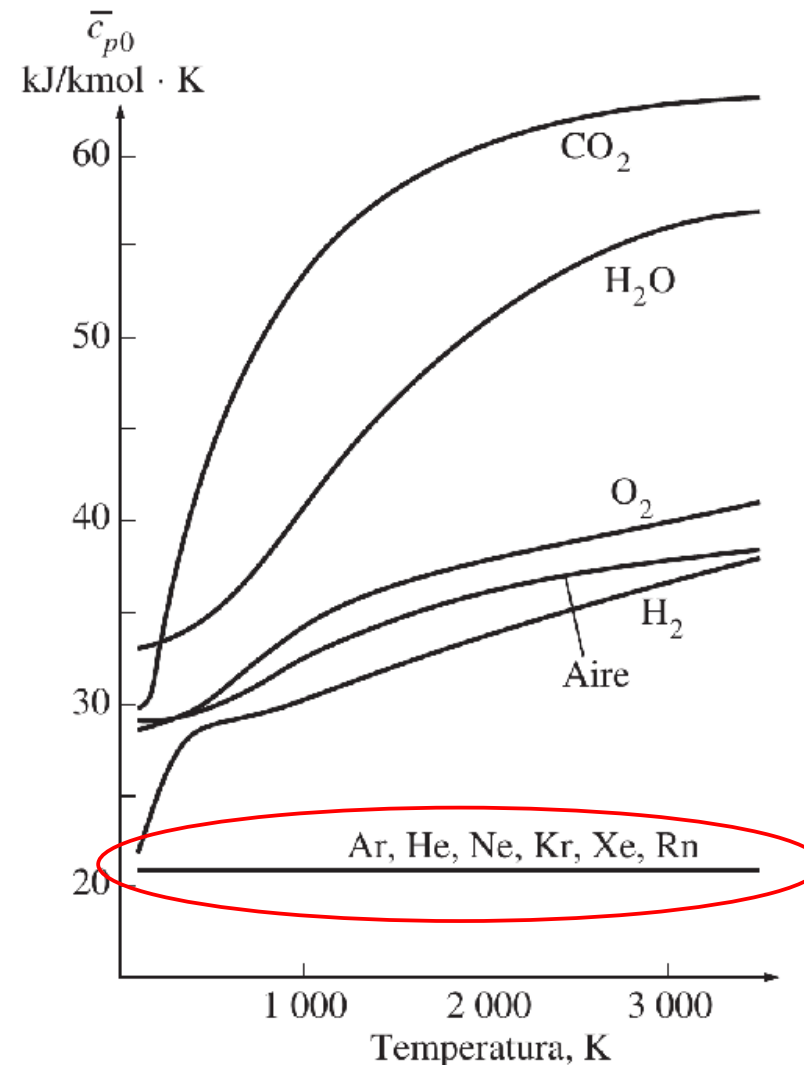
- De manera **gráfica**:



- 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 **interpolaciones** 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
Amoniaco	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 nitroso	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



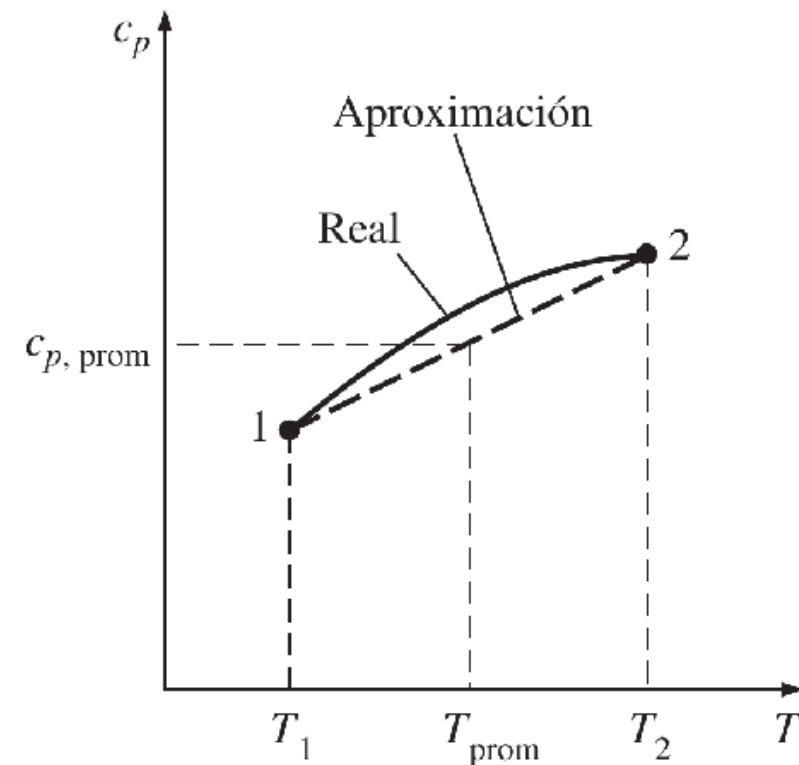
# Calores específicos en gases ideales

- 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**.
  - La **interpolación** 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	1707.0	1.29559
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444
220	219.97	0.4690	156.89	1345.0	1.39105
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279
285	285.14	1.1584	203.33	705.1	1.65055
290	290.16	1.2311	206.91	675.1	1.66802
295	295.17	1.3058	210.49	647.9	1.68515
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528
300	300.19	1.3850	214.07	621.2	1.70203
305	305.22	1.4686	217.67	595.0	1.71865
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106
320	320.29	1.7375	228.42	528.5	1.76690
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79782
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708
360	360.58	2.625	257.24	393.4	1.88543
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96533
400	400.98	3.805	286.16	301.3	1.99194
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699
420	421.25	4.522	300.69	266.5	2.04142
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870
450	451.80	5.775	322.62	223.5	2.11161
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906
550	554.74	11.86	396.86	133.1	2.31809
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685
570	575.59	13.50	411.97	121.2	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:
- 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 Máx. 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
Amoniaco	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:

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

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

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

El cambio de energía interna por unidad de mol:

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

# 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
Amoniaco	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
Oxígeno	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 temperatura:

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

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

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:

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

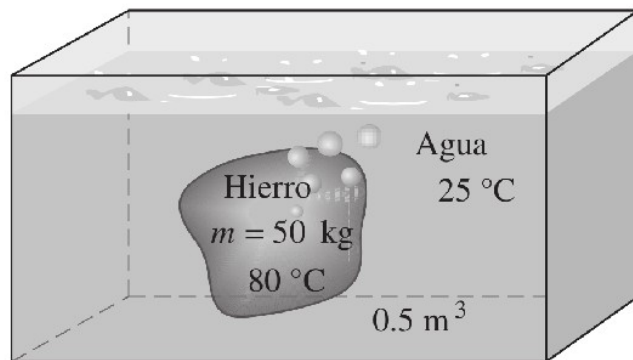
- Por otro lado, una **diferencia de entalpía**:

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

- 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:

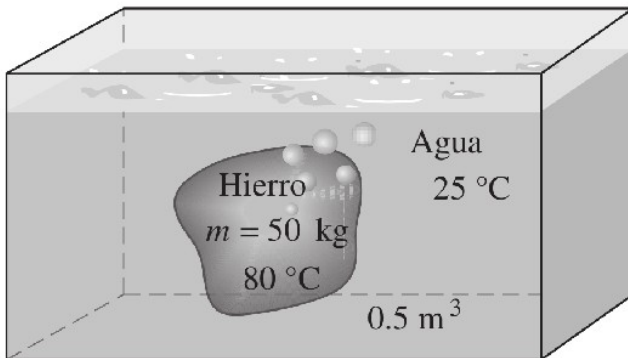
- Un bloque de hierro de **50 kg** a **80 °C** se sumerge en un recipiente aislado que contiene **0.5 m³** de agua líquida a **25 °C**. Determine la **temperatura** cuando se alcanza el **equilibrio térmico**.

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 m<sup>3</sup>** de agua líquida a **25 °C**. Determine la **temperatura** cuando se alcanza el **equilibrio térmico**.

Sustancia	Datos de equilibrio a 1 atm		Datos de congelación		Propiedades de líquidos		
	Punto de ebullición normal, °C	Calor latente de vaporización, kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión, kJ/kg	Temperatura, °C	Densidad, ρ, kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, c <sub>p</sub> , kJ/kg·K
Acero inoxidable (típico)	100	2257	0.0	333.7	25	910	0.500
Aluminio					0	1000	0.900
Agua					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22
					20	789	0.949
					30	782	0.949
					40	770	0.949
					50	758	0.949
					60	746	0.949
					70	734	0.949
					80	722	0.949
					90	710	0.949
					100	699	0.949
					110	688	0.949
					120	677	0.949
					130	666	0.949
					140	655	0.949
					150	644	0.949
					160	633	0.949
					170	622	0.949
					180	611	0.949
					190	600	0.949
					200	589	0.949
					210	578	0.949
					220	567	0.949
					230	556	0.949
					240	545	0.949
					250	534	0.949
					260	523	0.949
					270	512	0.949
					280	501	0.949
					290	490	0.949
					300	479	0.949
					310	468	0.949
					320	457	0.949
					330	446	0.949
					340	435	0.949
					350	424	0.949
					360	413	0.949
					370	402	0.949
					380	391	0.949
					390	380	0.949
					400	369	0.949
					410	358	0.949
					420	347	0.949
					430	336	0.949
					440	325	0.949
					450	314	0.949
					460	303	0.949
					470	292	0.949
					480	281	0.949
					490	270	0.949
					500	259	0.949
					510	248	0.949
					520	237	0.949
					530	226	0.949
					540	215	0.949
					550	204	0.949
					560	193	0.949
					570	182	0.949
					580	171	0.949
					590	160	0.949
					600	149	0.949
					610	138	0.949
					620	127	0.949
					630	116	0.949
					640	105	0.949
					650	94	0.949
					660	83	0.949
					670	72	0.949
					680	61	0.949
					690	50	0.949
					700	39	0.949
					710	28	0.949
					720	17	0.949
					730	6	0.949
					740	-5	0.949
					750	-16	0.949
					760	-27	0.949
					770	-38	0.949
					780	-49	0.949
					790	-60	0.949
					800	-71	0.949
					810	-82	0.949
					820	-93	0.949
					830	-104	0.949
					840	-115	0.949
					850	-126	0.949
					860	-137	0.949
					870	-148	0.949
					880	-159	0.949
					890	-170	0.949
					900	-181	0.949
					910	-192	0.949
					920	-203	0.949
					930	-214	0.949
					940	-225	0.949
					950	-236	0.949
					960	-247	0.949
					970	-258	0.949
					980	-269	0.949
					990	-280	0.949
					1000	-291	0.949
					1010	-302	0.949
					1020	-313	0.949
					1030	-324	0.949
					1040	-335	0.949
					1050	-346	0.949
					1060	-357	0.949
					1070	-368	0.949
					1080	-379	0.949
					1090	-390	0.949
					1100	-401	0.949
					1110	-412	0.949
					1120	-423	0.949
					1130	-434	0.949
					1140	-445	0.949
					1150	-456	0.949
					1160	-467	0.949
					1170	-478	0.949
					1180	-489	0.949
					1190	-500	0.949
					1200	-511	0.949
					1210	-522	0.949
					1220	-533	0.949
					1230	-544	0.949
					1240	-555	0.949
					1250	-566	0.949
					1260	-577	0.949
					1270	-588	0.949
					1280	-599	0.949
					1290	-610	0.949
					1300	-621	0.949
					1310	-632	0.949
					1320	-643	0.949
					1330	-654	0.949
					1340	-665	0.949
					1350	-676	0.949
					1360	-687	0.949
					1370	-698	0.949
					1380	-709	0.949
					1390	-720	0.949
					1400	-731	0.949
					1410	-742	0.949
					1420	-753	0.949
					1430	-764	0.949
					1440	-775	0.949
					1450	-786	0.949
					1460	-797	0.949
					1470	-808	0.949
					1480	-819	0.949
					1490	-830	0.949
					1500	-841	0.949
					1510	-852	0.949
					1520	-863	0.949
					1530	-874	0.949
					1540	-885	0.949
					1550	-896	0.949
					1560	-907	0.949
					1570	-918	0.949
					1580	-929	0.949
					1590	-940	0.949
					1600	-951	0.949
					1610	-962	0.949
					1620	-973	0.949
					1630	-984	0.949
					1640	-995	0.949
					1650	-1006	0.949
					1660	-1017	0.949
					1670	-1028	0.949
					1680	-1039	0.949
					1690	-1050	0.949
					1700	-1061	0.949
					1710	-1072	0.949
					1720	-1083	0.949
					1730	-1094	0.949
					1740	-1105	0.949
					1750	-1116	0.949
					1760	-1127	0.949
					1770	-1138	0.949
					1780	-1149	0.949
					1790	-1160	0.949
					1800	-1171	0.949
					1810	-1182	0.949
					1820	-1193	0.949
					1830	-1204	0.949
					1840	-1215	0.949
					1850	-1226	0.949
					1860	-1237	0.949
					1870	-1248	0.949
					1880	-1259	0.949
					1890	-1270	0.949
					1900	-1281	0.949
					1910	-1292	0.949
					1920	-1303	0.949
					1930	-1314	0.949
					1940	-1325	0.949
					1950	-1336	0.949
					1960	-1347	0.949
					1970	-1358	0.949
					1980	-1369	0.949
					1990	-1380	0.949
					2000	-1391	0.949
					2010	-1402	0.949
					2020	-1413	0.949
					2030	-1424	0.949
					2040	-1435	0.949
					2050	-1446	0.949
					2060	-1457	0.949
					2070	-1468	0.949
					2080	-1479	0.949
					2090	-1490	0.949
					2100	-1501	0.949
					2110	-1512	0.949
					2120	-1523	0.949
					2130	-1534	0.949
					2140	-1545	0.949
					2150	-1556	0.949
					2160	-1567	0.949
					2170	-1578	0.949
					2180	-1589	0.949
					2190	-1600	0.949
					2200	-1611	0.949
					2210	-1622	0.949
					2220	-1633	0.9

# 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.