

# **EL LENGUAJE DE ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS SOBRE TEMAS DE TERMODINÁMICA Y SU RELACIÓN CON LA HISTORIA DE LA DISCIPLINA**

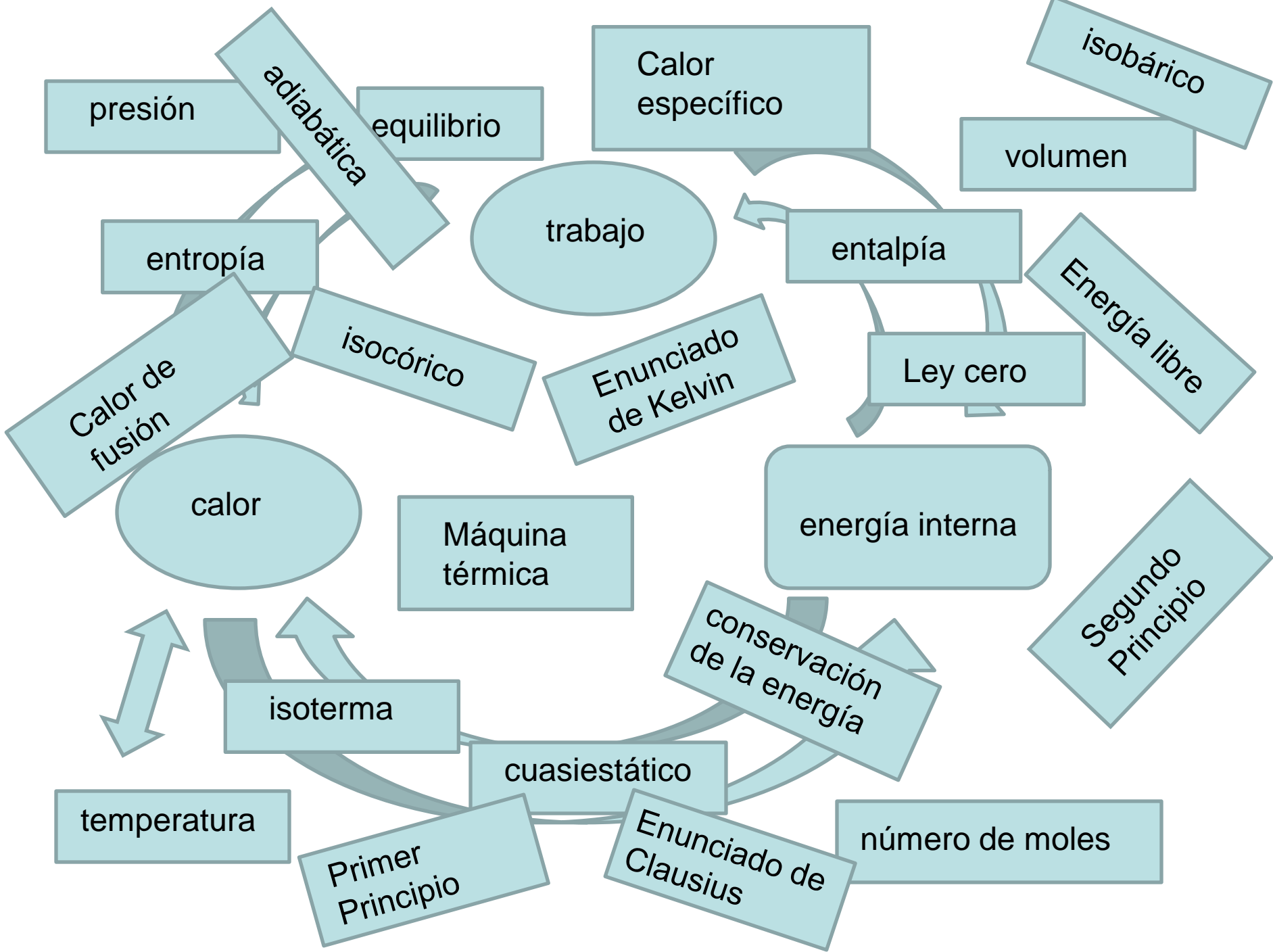
Oswaldo Cappannini

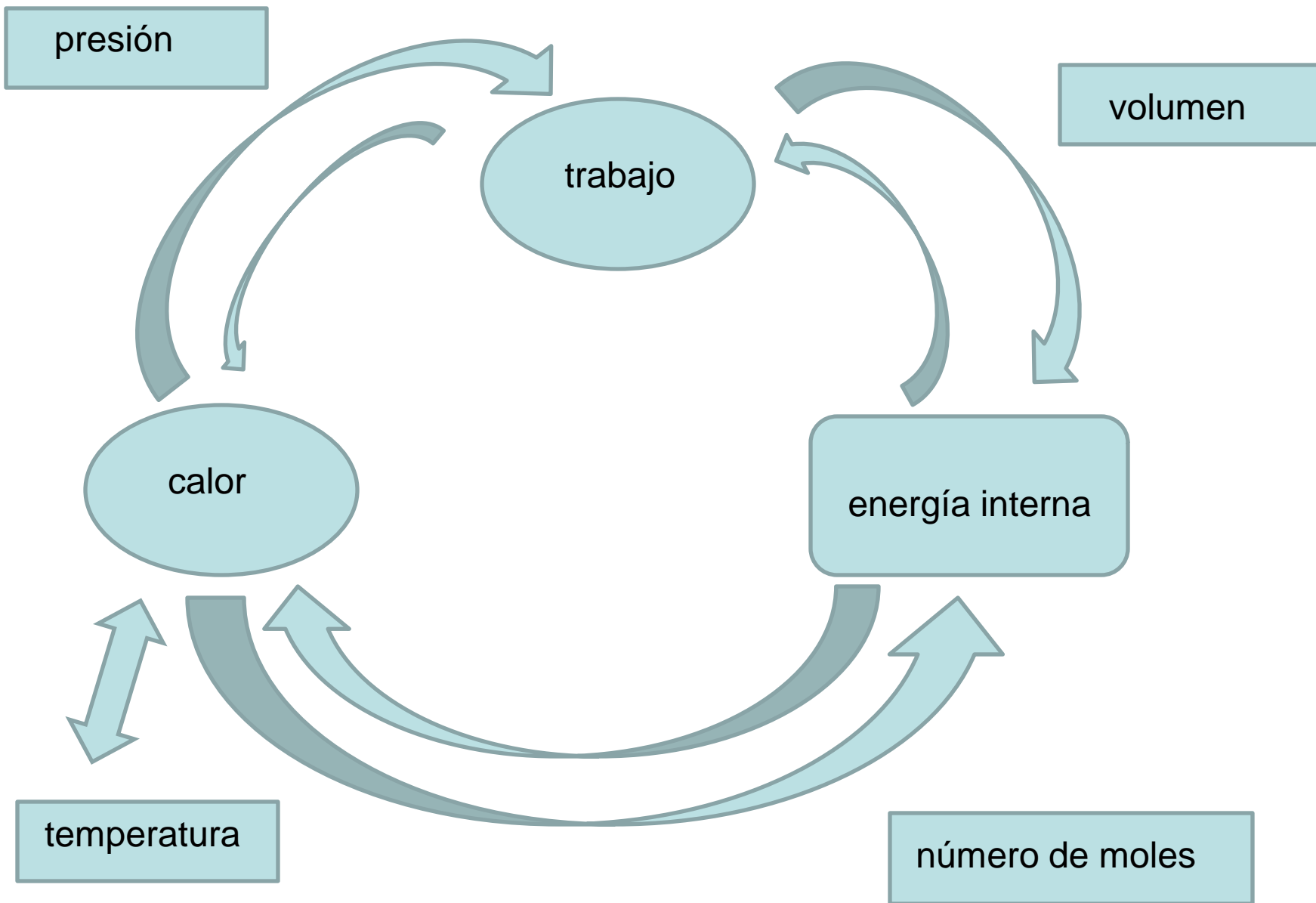
Grupo de Didáctica de las Ciencias, IFLYSIB  
(CONICET-CICPBA-UNLP) y Departamento de Física  
de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP.

*II Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las  
Ciencias Exactas y Naturales. Facultad de Humanidades y Ciencias de la  
Educación (UNLP), 28 de octubre de 2009.*

## RESUMEN

- El uso de determinada terminología, si bien no es indicativa de aprendizaje significativo sugiere contenidos, tanto conceptuales como metodológicos, de los conocimientos implicados.
- En el caso de Termodinámica, y más específicamente los conceptos incluidos en el Primer Principio, las mismas palabras recorrieron, durante el siglo XIX diferentes significados evidenciados a través de distintos modelos y sus lenguajes correspondientes.
- Una situación análoga se encuentra cuando se analiza el lenguaje y las herramientas conceptuales y metodológicas que estudiantes universitarios utilizan al abordar situaciones que involucran contenidos termodinámicos.





# El calor en el siglo XIX

- 1) una **sustancia** (teoría del calórico);
- 2) una **onda** (teoría ondulatoria del calor, propuesta por Ampère entre 1820 y 1830);
- 3) una **forma de energía** asociada al movimiento de las partículas constituyentes de los sistemas (ideas de Joule y Clausius, entre otros) y,
- 4) uno de los **procesos** posibles para modificar el estado de los sistemas (Gibbs, fines del siglo XIX).

# El trabajo en el siglo XIX

- Se origina en la mecánica, destinado a **medir la eficiencia de dispositivos** que elevaran pesos hasta determinada altura.
- Su utilización en los fenómenos térmicos acompañó el desarrollo de las máquinas térmicas, con la preocupación centrada en **cómo aprovechar el calor para producir trabajo útil para el hombre**.
- Como a otros conceptos durante los siglos XVIII y XIX, se le asignaron diferentes nombres: **potencia mecánica, tarea, fuerza, momento de actividad, cantidad de acción** y otros.
- El término “trabajo mecánico” y su relación con energía cinética recién se consolida con Coriolis en 1829.

## La energía en el siglo XIX

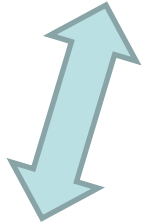
- En los trabajos de los siglos XVIII y XIX se mezclaban los términos “**fuerza**” y “**energía**”.
- Se denominaba ***vis viva*** (o “fuerza viva”) al doble de lo que, a partir de 1807 (con T. Young), pasó a llamarse “energía cinética”.

- Selección de un conjunto de frases a partir de entrevistas realizadas a 30 estudiantes universitarios pertenecientes a diferentes carreras de la UNLP, con cursos aprobados de Física introductoria que incluían temas básicos de Termodinámica.
- Las entrevistas implicaron que los estudiantes analizaran una situación incluida en Cotignola y otros (2002):

*Dos planos inclinados rugosos, contruidos con un material térmicamente aislante, están inicialmente a 0 °C. Por uno de ellos se deja deslizar un cuerpo de madera o metal y por el otro un cuerpo, de igual masa que el anterior, de hielo a 0 °C. Este último se va fundiendo a medida que desciende. El sistema total no interacciona térmicamente con el exterior. Desde un marco termodinámico analizar todos los procesos energéticos que se dan en ambos casos.*



calor



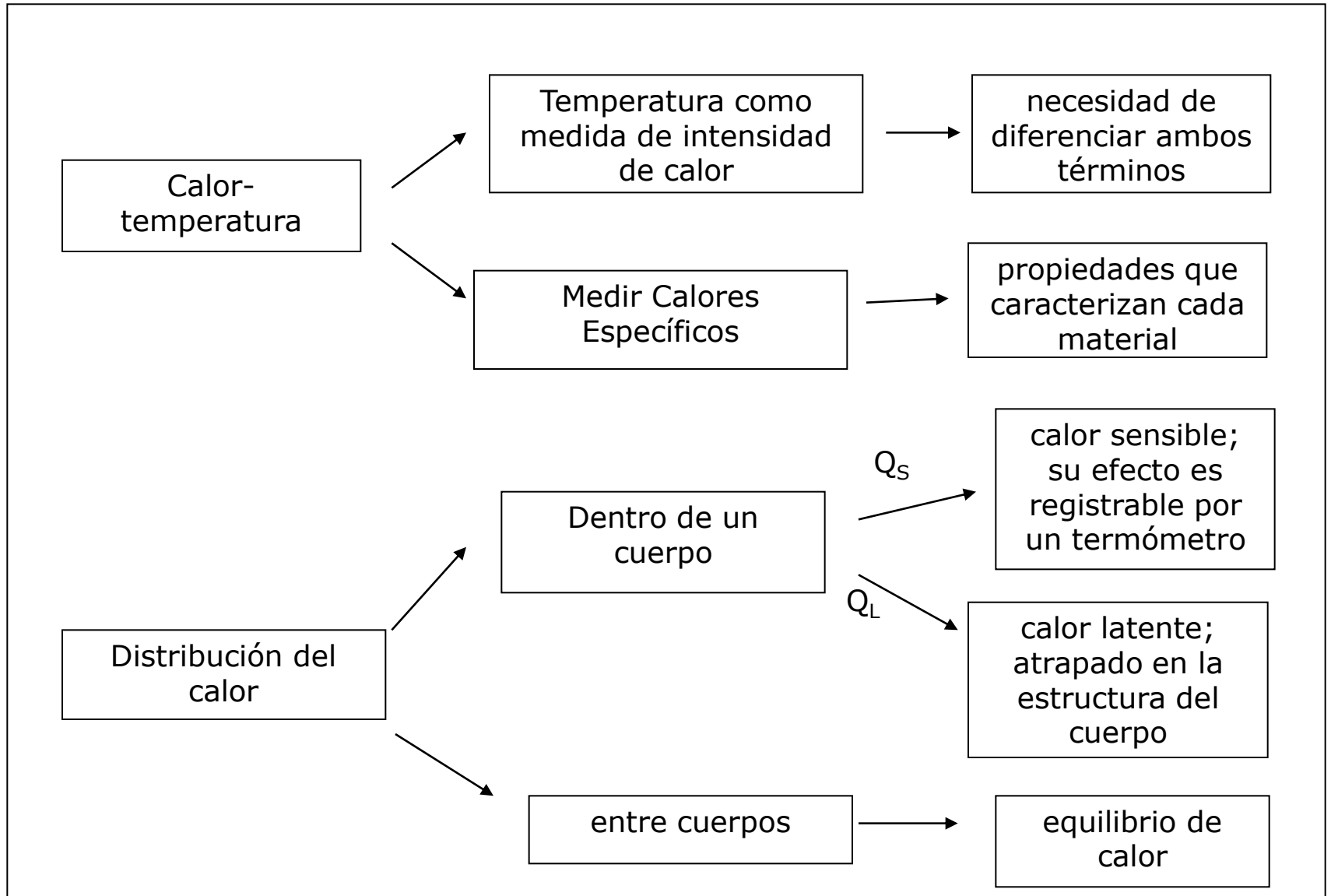
temperatura

# LAS VOCES DE LA HISTORIA:

## a) La teoría del calórico

- **Joseph Black** (1728 -1799) [\[1\]](#):
- “... El **calor** tiene la tendencia de **difundirse** desde los cuerpos más calientes a aquellos más fríos puestos en contacto, en tanto que no se haya **distribuido** entre ellos de modo tal [de alcanzar] un **estado de equilibrio**... Cuando finalizan todas las acciones mutuas, un **termómetro** aplicado a cualquiera de los cuerpos alcanza el mismo grado de dilatación. Por lo tanto, la **temperatura** será la misma... Como una de las leyes más generales del **calor** debemos entonces adoptar el principio de que todos los cuerpos comunicándose libremente entre ellos, expuestos a iguales acciones externas, alcanzan la misma **temperatura**, como la indicada por un **termómetro**... Esto es comúnmente llamado **igual calor** o la **igualdad de calor** entre diferentes cuerpos; yo lo denomino **equilibrio de calor**...”

[1] Traducido de Lectures on the Elements of Chemistry delivered in the University of Edinburgh by the Late Joseph Black. Publicado de sus manuscritos por John Robinson (1803) (de William Francis Magie, A Source Book in Physics, New York: McGraw-Hill, 1935). Accesible en <http://web.lemoyne.edu/~giunta/papers.html>



Relación entre calor , temperatura y distribución de calor en un cuerpo según J. Black.

- **Antoine Lavoisier (1743-1794) [2]:**
- “...Lo mismo puede afirmarse de todos los cuerpos en la naturaleza: son sólidos o líquidos, o están en el estado de vapor aeriforme, de acuerdo a la proporción que existe entre la **fuerza atractiva** inherente a sus partículas y la **potencia repulsiva del calor** que actúa sobre estas... Es difícil comprender estos fenómenos sin admitirlos como los efectos de una **sustancia real** y material, un fluido muy sutil, que insinuándose entre las partículas de los cuerpos, las separa unas de otras... Esta sustancia, sea lo que fuera, siendo la causa... de la sensación que llamamos tibieza causada por [su] **acumulación**...”
- “... Hemos distinguido la **causa del calor**, o ese fluido exquisitamente elástico que lo produce, mediante el término **calórico**...”

• [2] Traducido de R. Kerr, Edimburgo, 1790; de Maurice Crosland, ed., *The Science of Matter: a Historical Survey*, Harmondsworth, UK: Penguin, 1971. Accesible en <http://web.lemoyne.edu/~giunta/papers.html>.

- Términos que ayudan a identificar el lenguaje esencial de la teoría del calórico:
  - **Calor**
  - **Equilibrio de calor**
  - **Termómetro**
  - **Temperatura**
  - **Igualdad de calor**
  - **Cantidad de calor**
  - **Cantidad de materia de calor**
  - **Intensidad (de calor)**
  - **Distribución del calor**
  - **Calor absorbido**
  - **Capacidad**
  - **Calor latente**
  - **Potencia repulsiva del calor**
  - **Calórico**
  - **Partículas de calórico**

- El término **calor** es central:

Constituye la causa del fenómeno térmico. No puede existir fenómeno térmico sin su presencia, en términos más precisos correspondientes a esta teoría, sin esa sustancia llamada **calórico**.

## Las voces “caloricistas” en los estudiantes:

- “... Entonces el cuerpo va a tomar **calor** y la **temperatura** del cuerpo aumenta...” (estudiante I1 de Ingeniería).
- “...en el caso de madera o metal el **calor** lo va a **absorber** el cuerpo... todo el cuerpo de madera o metal que no se llega a fundir... porque la **temperatura** no ha de llegar al **punto de fusión**. En cambio en el hielo, parte del **calor** lo utiliza para fundirse y tal vez alcance a elevarse la **temperatura** cuando pasa a agua. Depende de la **cantidad de calor** que le estoy entregando...” (estudiante B1 de Licenciatura en Bioquímica).
- “...como es aislante, el **calor** lo va a **absorber** el cuerpo y no hay pérdidas...ese **calor** va haciendo fundir el hielo... El **calor** que reciben los dos es el mismo. El otro va a aumentar la **temperatura**...” (estudiante B2 de Licenciatura en Bioquímica).
- “... el **calor** lo va a **absorber** el cuerpo... parte del **calor** lo utiliza para fundirse y tal vez no alcance a elevarse la **temperatura** cuando pasa a agua, depende de la **cantidad de calor** que le estoy **entregando**. Si le **entrega** suficiente para fundirse o si además para elevarle la **temperatura** al agua... con la **cantidad de calor** que **le entregamos** a ambos...” (estudiante B3 de Licenciatura en Bioquímica).

## b) La concepción “mecanicista” del calor

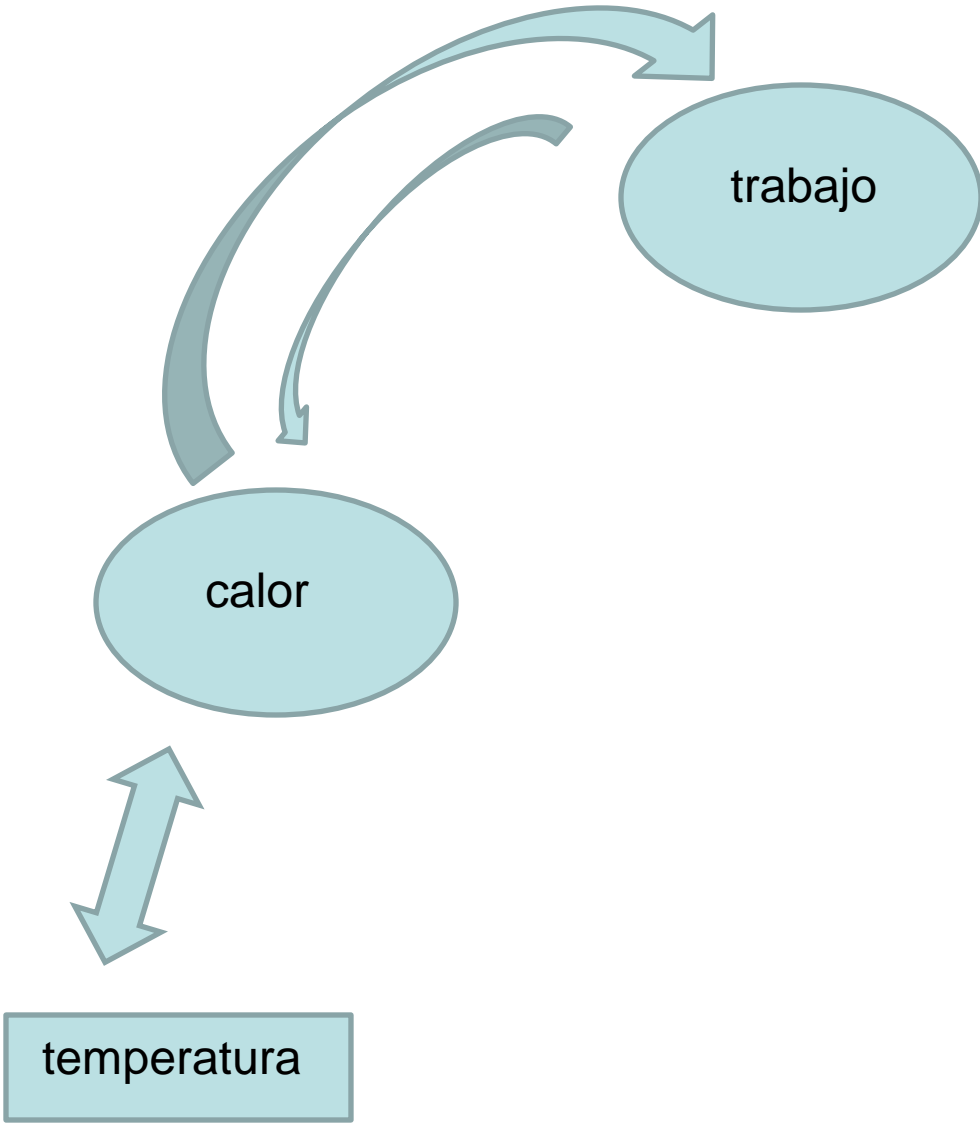
- **Julius Mayer** (1814-1878) escribe en 1842 [3] :
- “...¿qué entendemos por **fuerzas**? y ¿cómo diferentes **fuerzas** se relacionan entre sí? Mientras que el término **materia** implica... propiedades bien definidas tales como **peso** y **extensión**, la palabra **fuerza** genera... la idea de algo desconocido, difícil de analizar e hipotético...”
- “...**Las fuerzas son causas**. Por lo tanto...podemos aplicar...el principio causa aequat effectum. Si la causa “c” tiene el efecto “e”, entonces  $c = e$ . Si, a su vez, “e” es causa de un segundo efecto “f” tendremos  $e = f = \dots = c$ ...”

[3] Traducido de “Remarks on the Forces of Inorganic Nature”. *Annalen der Chemie und Pharmacie* **43**, 233 (1842), traducido por G. C. Foster, *Phil. Mag.* [4] 24, 371 (1862) y reimpresso en W. F. Magie, ed., *A source Book in Physics* (New York: Mc Graw-Hikll, 1935). Accesible en <http://web.lemoyne.edu/~giunta/papers.html>

- “...Si la dada causa “c” ha producido un efecto “e” igual a sí mismo entonces, en ese mismo acto, ha dejado de ser; “c” se ha **transformado** en “e”... Por lo tanto, puesto que “c” se transforma en “e”, y “e” se transforma en “f”, y (siguiendo la cadena) en “c”, debemos considerar a estas varias magnitudes como **diferentes formas** bajo las cuales uno y un mismo objeto hace su aparición...”
- “... Dos clases de **causa** aparecen en la Naturaleza las cuales, de acuerdo a la experiencia, nunca se **transforman** una en la otra. La primera clase incluye causas tales que poseen las propiedades de **peso e impenetrabilidad**; estas son tipos de **Materia**. La otra clase esta compuesta por causas que carecen de las propiedades mencionadas...; es decir las **Fuerzas**... Las **Fuerzas** son... objetos **indestructibles, convertibles e imponderables**...”



- “...La química, cuyo problema es el de plantear en ecuaciones la conexión causal existente entre diferentes tipos de materia, nos enseña que la **materia, como causa**, tiene a la **materia como efecto**. Pero estamos también justificados para afirmar que a una **fuerza como causa** le corresponde una **fuerza como efecto**. Puesto que  $c = e$  y  $e = c$ , no es natural denominar a un término de la ecuación como **fuerza** y al otro como un **efecto de la fuerza** o fenómeno, asignándole diferentes nociones a las expresiones **fuerza** y **fenómeno**... si la causa es materia, el efecto es materia; si la causa es una fuerza, el efecto también será una fuerza.”
- “... Una causa que produce la elevación de un peso es una **fuerza**. Su efecto (el peso levantado) es, por lo tanto, igualmente una **fuerza**; ... la separación en el espacio de objetos ponderables es una fuerza. Puesto que esta **fuerza** causa la caída de los cuerpos, la llamamos **fuerza de caída**. La **fuerza de caída** y la caída, o más general aun, la **fuerza de caída** y el **movimiento**, son fuerzas relacionadas entre sí como causa y efecto—fuerzas que son convertibles una en la otra—dos formas diferentes de uno y un mismo objeto. Por ejemplo, un peso apoyado sobre el suelo no es una fuerza: no es ni la causa de movimiento ni del levantamiento de otro peso. Se **transforma** en una, sin embargo, en proporción a su elevación por encima del suelo: la causa—la distancia entre el peso y la tierra—y el efecto—la **cantidad de movimiento** producida—mantienen entre ellas, como sabemos de mecánica, una relación constante...”



## Helmholtz (1821-1894) [4]

[4] Traducido de “On the Conservation of Force”, Introduction to a Series of Lectures delivered at Karlsruhe in [...] 1862–1863 by H. von Helmholtz, traducción de E. Atkinson. Accesible en <http://web.lemoyne.edu/~giunta/papers.html>

- “... La ley en cuestión afirma que la **cantidad de fuerza** que puede ser llevada a la acción en el conjunto de la Naturaleza es incambiable y no puede ser aumentada ni disminuida...”
- “... Consideremos ahora aquella **fuerza motriz** que conocemos mejor, y que es la más simple- la **gravedad**. Actúa... en aquellos relojes impulsados por un peso. Este peso, atado a una cuerda enrollada en una polea conectada a la primera rueda dentada del reloj, no puede obedecer la tracción de la **gravedad** sin iniciar el **movimiento** de todo el reloj... el peso no puede iniciar el **movimiento** del reloj sin a su vez descender... Por lo tanto, si se pretende que el reloj funcione, el peso debe continuamente descender... tanto como para que la cuerda que lo sostiene se acabe. Entonces, el reloj se detiene. El efecto del peso se ha **consumido**. Su gravedad no se ha perdido ni disminuido... pero la **capacidad** de esta gravedad para producir el movimiento de los engranajes del reloj se ha perdido. Sólo puede mantener el peso en la parte más baja de su descenso y no puede seguir haciéndolo mover... podemos ‘darle cuerda’ al reloj a partir de la **potencia** del brazo mediante el cual elevamos el peso. Al hacer esto, el peso ha recuperado su previa **capacidad** y puede nuevamente poner en **movimiento** al reloj...”

- “... Podemos aplicar esta medida de **trabajo** a todo tipo de máquinas pues podemos ponerlas a todas en **movimiento** por medio de suficientes **pesos** como para hacer girar una polea. Podríamos entonces siempre expresar la magnitud de cualquier **fuerza motriz**, para cualquier máquina, mediante la magnitud y altura de caída de tal peso como sería necesario para mantener la máquina... en funcionamiento hasta haber realizado cierto **trabajo**... Al ‘darle cuerda’ al reloj acumulamos una reserva de **capacidad de trabajo** en ella...”
- “... Si apoyo suavemente la cabeza de un martillo sobre un clavo, ni su pequeño **peso** ni la **presión** de mi brazo serán suficientes para clavar el clavo en la madera; pero si alzo el martillo y lo dejo caer con gran **velocidad**, adquiere una nueva **fuerza** que puede superar mucho mayores obstáculos... Estos ejemplos nos muestran que la **velocidad** de una **masa en movimiento** puede actuar como **fuerza motriz**. En mecánica, la **velocidad** en cuanto que es **fuerza motriz** y puede producir **trabajo**, se denomina **vis viva**....”

Helmholtz introduce el calor:

- “... era conocido que siempre que hubiera **fricción** mutua entre dos objetos **en movimiento**, se producía **calor**... Este hecho está universalmente reconocido; el eje de un carruaje que está mal engrasado y en el cual la **fricción** es grande, se pondrá tan caliente que se podrá incendiar; las ruedas con ejes de hierro que giren a gran **velocidad** pueden calentarse tanto como para soldarse a sus encastres...es suficiente **fricciónar** las manos secas para sentir el **calor** producido por la **fricción** y que es mucho mayor que el calentamiento producido cuando las manos se apoyan suavemente una sobre otra... Pero el **calor** también se puede producir a través de la **fricción** de líquidos, donde no se pueden considerar cambios de estructura o la liberación de **calor latente**...
- “... Si resumimos los resultados de todas estas situaciones, que cada uno de ustedes puede añadir a sus propias experiencias cotidianas, podemos ver que la **fricción** y los **impactos inelásticos** constituyen procesos en los cuales **se destruye trabajo mecánico y se produce calor** en su lugar...”

## Helmholtz acude a los experimentos de Joule:

- “... Los experimentos de Joule... nos llevan un paso más adelante. Él ha medido en pies-libras la **cantidad de trabajo** que es **destruida** por la **fricción** de sólidos y por la **fricción** de líquidos, y, por otro lado, ha determinado la **cantidad de calor** que se ha producido y ha establecido una relación definida entre ambos... Así, entonces, una cierta **cantidad de calor** puede ser **cambiada** a una cierta **cantidad de trabajo**; esta **cantidad de trabajo** puede también ser vuelta a **transformar** en **calor** y, por cierto, en la misma **cantidad de calor** de la cual se originó; desde un punto de vista mecánico, resultan exactamente equivalentes. El calor es una nueva forma en la cual puede aparecer una cantidad de trabajo...”
- “... Estos hechos no nos permiten seguir considerando al **calor** como una sustancia ya que su cantidad no es inmodificable. Se puede producir nuevamente a partir de la **vis viva** del **movimiento** destruido; puede ser **destruido** y entonces producir **movimiento**. Debemos, más vale, concluir que el calor en sí mismo es un movimiento, un movimiento interno invisible de las partículas elementales más pequeñas de los cuerpos...”

Los párrafos de Mayer y Helmholtz giran en torno de:

- **“fuerza”** (como sinónimo de algo subyacente a los fenómenos)
- **Cantidad de fuerza**
- **Trabajo**
- **Cantidad de trabajo**
- **Fuerza motriz**
- **Movimiento**
- **Capacidad de trabajo**
- **Velocidad**
- ***Vis viva***
- **Calor**
- **Potencia mecánica**
- **Fricción**
- **Se destruye trabajo mecánico**
- **Se produce calor**
- **Cantidad de calor**
- **Transformar**
- **Transfiere**
- **Acumula**

- ✓ **Calor y trabajo** se proponen como **dos formas de la “fuerza”** (o energía, ya que se miden en unidades de energía mecánica) para series de distintos fenómenos.
  
- ✓ Su transformación mutua sólo refleja la **constancia de su esencia**, desligándolos de un carácter material.

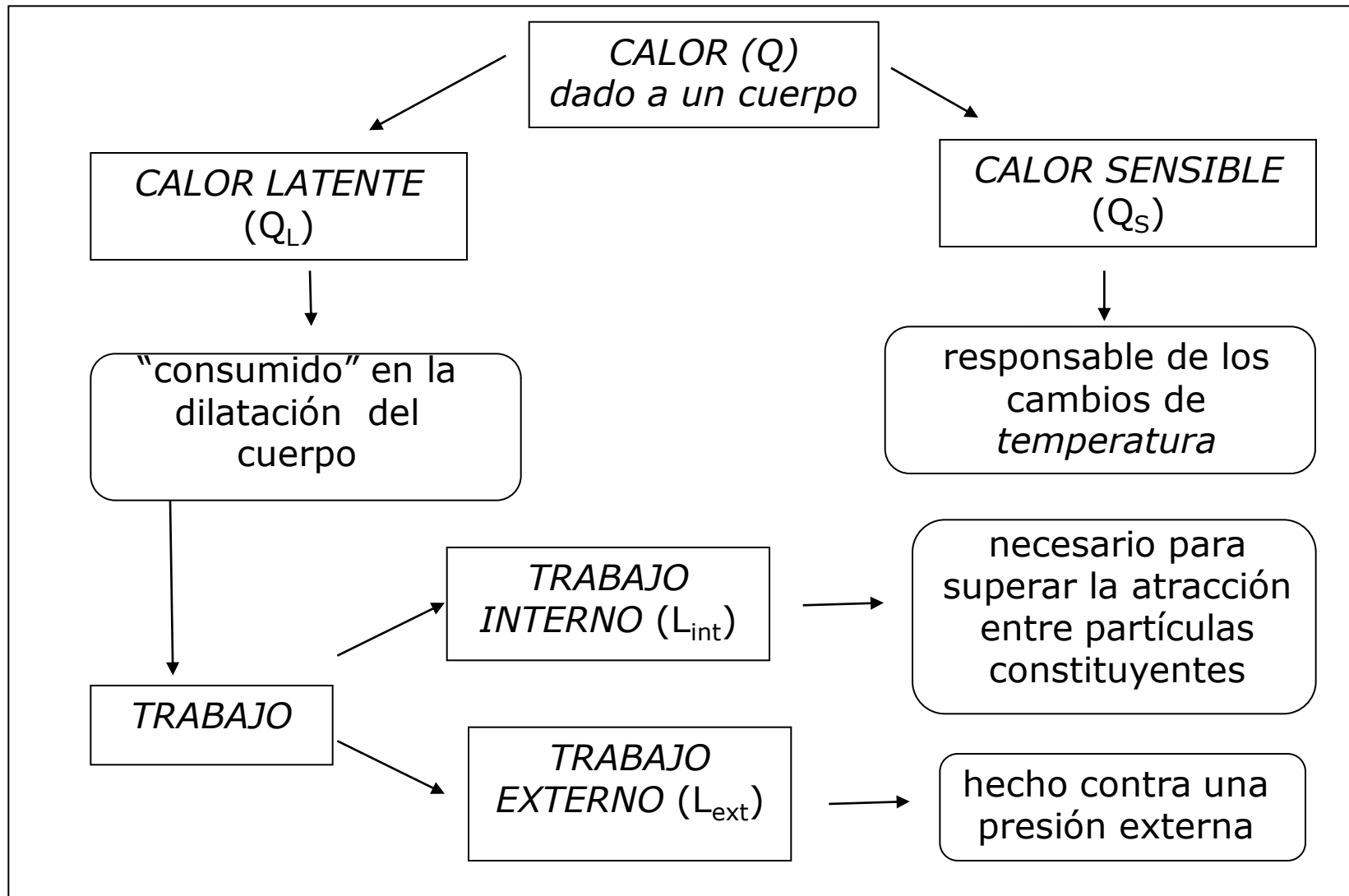
Ideas similares pueden encontrarse en **Clausius** (1822-1888) quien, en 1850 y sobre la base de los trabajos de Carnot, Mayer, Helmholtz y Joule, apuntó a generar una herramienta teórica que explicara la relación entre trabajo mecánico y calor.

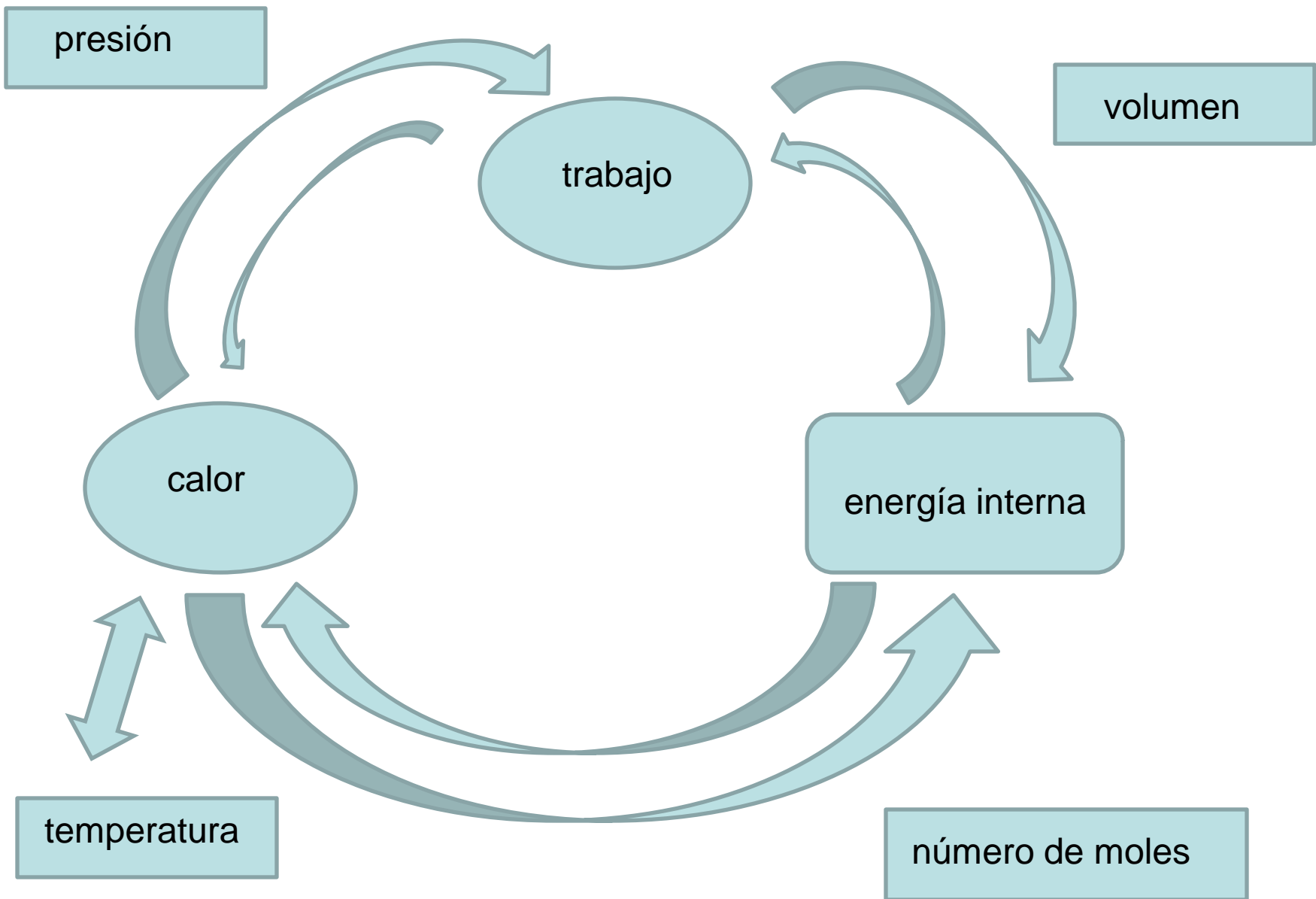


# El modelo de Clausius

$$\Delta U = L_{\text{int}} + Q_s$$

$$Q = L_{\text{ext}} + \Delta U$$





## Las voces “mecanicistas” en los estudiantes:

- “...**la energía que va ganando el cuerpo es el trabajo que se ejerce y es calor...** veo lo mismo para los dos: **el trabajo que se hizo se convirtió en energía, en calor que adquirió el cuerpo, en ambos en energía interna...** Es decir, **el trabajo se convirtió en calor**, vendría a ser, en **energía interna** del cuerpo...” (alumno Q1 de Licenciatura en Química)
- “... se va a liberar energía porque como es rugoso, por el roce, **va a liberar energía en forma de calor ... lo liberó en sí mismo, porque como el calor es una forma de energía , entonces va pasando energía de cinética a calor...**” (alumno Q2 de Licenciatura en Química)
- “... de la **fricción** se está perdiendo **energía potencial** porque se encuentra en un plano inclinado así que... **el intercambio de calor es la energía interna...**” (alumno I3 de Ingeniería)

- “...una **cierta energía potencial** que se va utilizando en generar **calor** y al mismo tiempo en una **energía cinética**... la **energía potencial se transforma** en una **energía cinética más un calor**... el problema tiene un punto mecánico, es decir, de ver la parte de la energía potencial, que después se transforma en energía cinética por el principio de conservación... en definitiva, en la parte mecánica uno lo ve como el trabajo de una fuerza no conservativa y punto. Pero si lo ve de la parte termodinámica, se ve que **la energía inicial** tiene que ser **calor más la energía cinética**...” (alumno F1 de Licenciatura en Física).
- “... **ese trabajo** va a liberar **un calor**... porque al absorber el cuerpo ese **calor** que genera el **trabajo** de la fuerza de roce...” (alumno B4 de Licenciatura en Bioquímica)
- “... **el trabajo** se convirtió en **calor** y el calor varía la **energía interna** del cuerpo...” (alumno Q3 de Licenciatura en Química).
- “... Se haría un **trabajo** sobre el bloque... se empezaría a derretir porque hay una **transformación a energía calórica**...” (alumno de I4 Ingeniería).

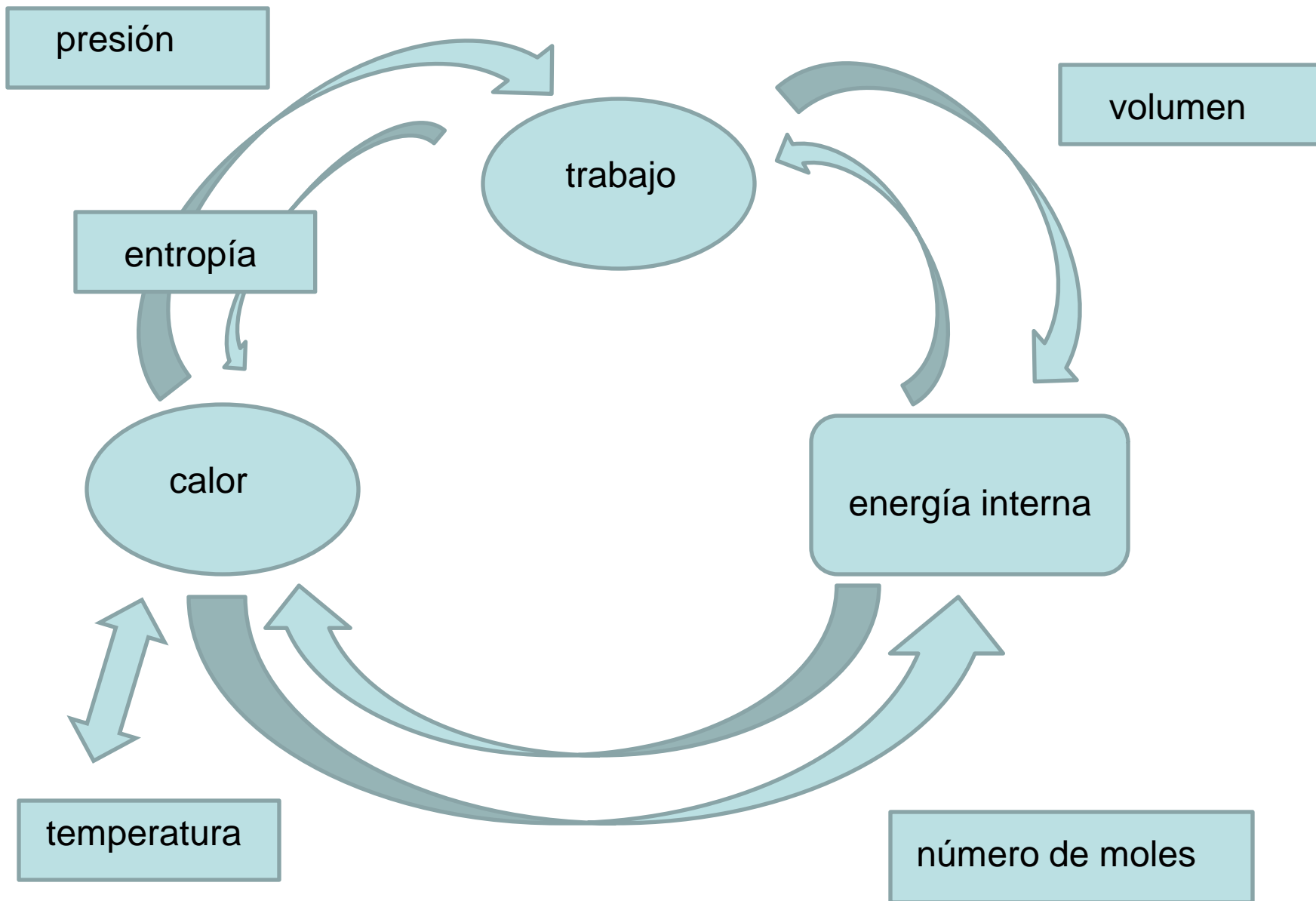
- “... lo que vi en clase, que **el roce** contra la superficie crea en sí **calor**. No **transferencia** de **energía**, pero **la energía se pierde** allí. Me acuerdo que dijo el profesor que **la energía se perdía** y el proceso no puede volver atrás...” (alumno I5 de Ingeniería).
- “... el hielo va a **absorber** para poder derretirse y el metal también va a **absorber el calor** del roce... puede ser que la energía se transforme en energía calórica, la que **absorbe** el metal y el hielo para poder derretirse... **la energía potencial** que va **disminuyendo**, parte se **transforma** en **energía cinética** y parte en **calórica**...” (alumno I6 de Ingeniería).
- “... si le hacen un **trabajo**, va a haber una **variación del calor** del cuerpo... Si hay una **variación de la energía**, va a haber una **variación de la energía interna** del cuerpo. Entonces de allí viene la relación, porque si le hacen un **trabajo** al cuerpo, va a haber una **variación de calor** y eso viene de la **variación de energía interna**...” (alumno I7 de Ingeniería).
- “... va a **liberar energía** en forma de **calor**. Si me dice que es aislante no va a haber **intercambio de calor** entre los dos cuerpos... Lo liberó en sí mismo, porque como el calor es una forma de energía entonces va **pasando energía** de **cinética a calor**... el calor no se puede recuperar. Es una **forma de energía que no se puede recuperar**...” (alumno Q5 de Química).

## c) El eje puesto en las funciones de estado

J. W. Gibbs (1839-1903) [6]

- “... Las propiedades termodinámicas más importantes de un **fluido** están determinadas por las relaciones que existen entre el **volumen**, la **presión**, la **temperatura**, la **energía** y la **entropía** de una dada masa de fluido en un **estado de equilibrio termodinámico**. Lo mismo vale para un **sólido**... Pero todas las relaciones existentes entre esas cinco cantidades para cualquier sustancia (tres relaciones independientes) pueden deducirse de una única relación para esa sustancia entre el **volumen**, la **energía** y la **entropía**. Esto puede hacerse por medio de la **ecuación fundamental**:  $dU = T dS - p dV...$ ”

[6] Traducido de J. W. Gibbs, en *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 1876, “On the equilibrium of heterogeneous substances”. Accesible en <http://web.lemoyne.edu/~giunta/papers.html>



- ✓ El eje de análisis deja de estar en los **procesos** (calor y trabajo) y pasa a la relación entre **funciones** (dependientes de las variables termodinámicas) y **estados termodinámicos**.
- ✓ No se han podido identificar estas ideas ni lenguaje en ninguno de los estudiantes entrevistados

**Clausius**

$$Q = L_{ext} + \Delta U$$

**Gibbs**

Procesos con el entorno

$$\Delta U = Q + L_{ext}$$

Sistema

Fronteras o paredes



# Conclusiones

- ✓ Existe relación entre ideas y terminología utilizadas por estudiantes universitarios al intentar explicar una situación que incluye fenómenos térmicos y las correspondientes a varios referentes de la ciencia del siglo XIX.
- ✓ El calor resulta el eje del análisis:
  - Para un grupo de estudiantes, este concepto se interpreta de manera similar a la planteada en la denominada **teoría del calórico**
  - En otros estudiantes se detecta una **asociación entre calor y energía**, acercándose a la interpretación de mitad del siglo XIX evidenciada en las frases e ideas de Mayer, Helmholtz y Clausius.
- ✓ No se registraron expresiones de los estudiantes en las que se utilizara al **calor como un proceso** que permite un cambio de estado en el sistema.
- ✓ El **Primer Principio no es utilizado** como herramienta de análisis de fenómenos térmicos. La energía interna y el trabajo aparecen como conceptos secundarios.

- ✓ Desde el ángulo didáctico, pareciera que no se realiza el suficiente esfuerzo en la **discusión de los diferentes modelos** que la ciencia ha utilizado en su desarrollo.
- ✓ No se registra la inclusión de **otras herramientas metodológicas** como la identificación del objeto de estudio ni del tipo de fronteras que lo separan del entorno.
- ✓ Resulta sugestivo, asimismo, “escuchar” las voces de la historia de la disciplina ya que contribuyen a la discusión necesaria sobre los conceptos involucrados. Discutir y hacer explícito su significado en el marco termodinámico actual, diferenciando sentidos coloquiales y académicos y distinguiendo los diferentes modelos planteados en distintas etapas de la disciplina, debería considerarse una tarea ineludible en el aula ya que el uso de terminología no garantiza una adecuada interpretación conceptual.

MUCHAS GRACIAS...