

Algunos conceptos implícitos en la 1ª y la 2ª Leyes de la
Termodinámica: una aportación al estudio de las
dificultades de su aprendizaje.

Tesis doctoral de M^a Roser Pintó Casulleras
presentada al
Departamento de Físicas de la
Universidad Autónoma de Barcelona

Director : Prof. Paul Black
King's College
University of London

Tutor: Dr. David Jou Mirabent
Departamento de Físicas
Universidad Autónoma de Barcelona



Bellaterra, Noviembre 1991

5.3. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 3 (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

¿Qué significa degradación de la energía?

Esta cuestión ha sido formulada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología), 100 estudiantes en primer curso en Físicas y 40 estudiantes en tercer curso en Físicas.

Las respuestas se han codificado de acuerdo con las siguientes categorías:

C₁ Cambio de forma o de calidad

C₁₁- Se confunde con "transformación de energía"

C₁₂- Transformación en energía menos útil

C₂- Pérdida de alguna cantidad de energía

C₂₁-Realizando trabajo, o no se especifica como se pierde

C₂₂-En un sistema abierto

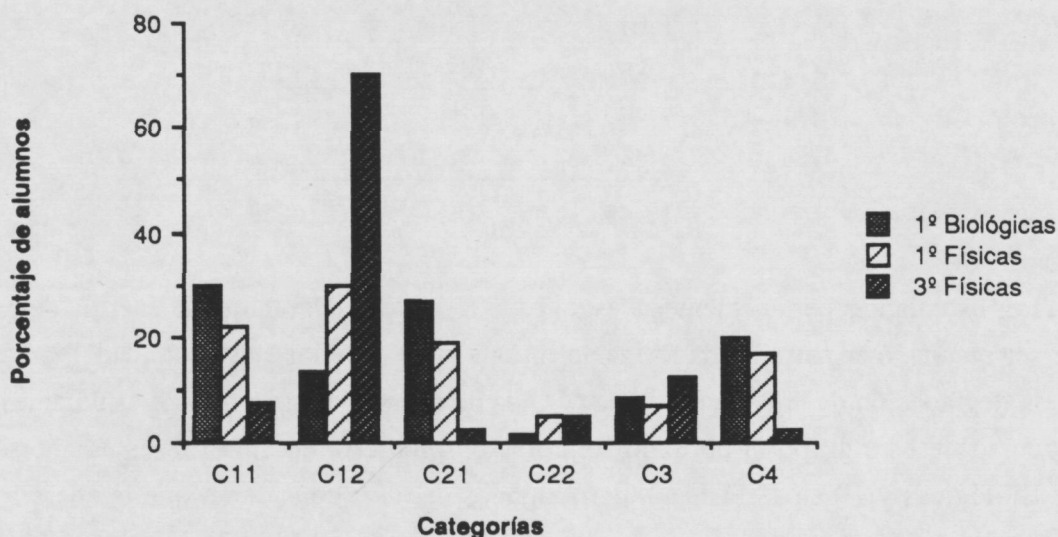
C₃- Otros

C₄- Sin respuesta

Podemos comparar los resultados obtenidos por los distintos grupos de estudiantes:

	1º Biológicas	1º Físicas	3º Físicas
C₁₁	29.8%	22%	7.5%
C₁₂	13.4%	30%	70%
C₂₁	27%	19%	2.5%
C₂₂	1.4%	5%	5%
C₃	8.5%	7%	12.5%
C₄	19.9%	17%	2.5%

Diagrama para cuestión 3 (Q-3A), frecuencias en %



Hay una considerable mejora entre las respuestas de los estudiantes en 1º de Universidad a 3º de Físicas. Mientras que 42 estudiantes (29.8%) en 1º Biológicas y 22 en 1º de Físicas confunden degradación de la energía con transformación de la energía, sólo 3 hacen lo mismo en 3º de Físicas (grupo C11). Uno de estos últimos estudiantes dice: *"Degradación de la energía es un cambio de la energía o de una forma de manifestación de la energía en otra forma de energía"* (3º Fis).

C12. La mayoría de los estudiantes (70%) en 3º curso responden que la degradación de la energía significa su "transformación en menos útil", un relativamente alto porcentaje (30%) en 1º de Físicas dicen lo mismo mientras que esta es la respuesta sólo para el 13.4% de estudiantes de 1º de Biológicas.

Pero en el interior de este grupo podemos hacer diferencias de acuerdo a como o porque consideran que la energía ha pasado a ser menos útil.

Algunos consideran que es menos útil porque se ha transformado en calor: **C121.** *"Significa una transformación de la energía en calor, como por ejemplo debido a rozamientos"* (1º Fis).

Algunos no dan explicación de porque la energía degradada ha pasado a ser menos útil: **122** *"Significa que en sucesivas transformaciones de la energía cada vez cuesta más de aprovecharla"* (1º Bio).

Otros dicen que la energía es menos útil para realizar trabajo: **C123** *"Significa que la capacidad del sistema para realizar trabajo disminuye con el tiempo"* (3º Fis). A pesar de que sólo dos de las respuestas explicitan la segunda ley de la termodinámica, en muchas de las frases de los alumnos de 3º de Físicas, se constata su conocimiento.

	1ºBiol	1º Fis	3º Fis
C ₁₂₁	2.8%	14%	15%
C ₁₂₂	7.8%	11%	15%
C ₁₂₃	<u>2.8%</u>	<u>5%</u>	<u>40%</u>
	13.4%	30%	70%

Los estudiantes pertenecientes a este grupo C₂ no consideran que la energía degradada sea resultado de cambios de forma de energía ni de cambios en su cualidad. Piensan que la degradación de la energía es una pérdida de energía. La mayoría de estudiantes de 1º curso de este grupo () no explican como se pierde la energía (38 estudiantes de 1º Biológicas y 19 en 1º Físicas), pero algunos de ellos consideran que la energía se ha perdido porque ha pasado a un sistema exterior (grupo C₂₂). "*La degradación de la energía es la pérdida de la misma, a consecuencia de un fenómeno concreto que requiere un consumo de energía*" (1º Bio) y "*Significa que un sistema puede perder energía debido a que una parte del sistema da energía a otra...*" (3º Fis). Son frases significativas de ambos grupos respectivamente.

Un 27% en 1º Biológicas, un 19% en 1º de Físicas y sólo un estudiante en 3º de Físicas responden de este modo.

C₃. Algunos estudiantes hacen frases difíciles de codificar. Por ejemplo: "*Degradación de la energía equivale al fenómeno de pérdida de claridad en todo lo que nos rodea*" (3º Fis). "*Es un intento de explicar el ¿a donde va? la energía*" (3º Fis). Un 12,5% de respuestas de esta categoría en 3º de Físicas no es un bajo porcentaje. De la misma manera algunos estudiantes de 1º curso dan explicaciones que muestran no conocer lo que significa degradación de la energía. Por ejemplo: "*La degradación significa el momento final de una cosa. Como la energía no se termina, ya que se mantiene constante, creo que es una paradoja*" (1º Bio).

C₄ Encontramos un 19,9% de estudiantes que no responden a la cuestión en 1º de Biológicas, similar a un 17% en 1º de Físicas y sólo un estudiante de 3º curso.

La tabla completa de resultados es:

	1º Biológicas	1º Físicas	3º Físicas
C ₁₁	29.8%	22%	7.5%
C ₁₂₁	2.8%	14%	15%
C ₁₂₂	7.8%	11%	15%

C_{123}	2.8%	5%	40%
C_{21}	4.3%	1%	0%
C_{22}	22.7%	18%	2.5%
C_{23}	1.4%	5%	5%
C_3	8.5%	7%	12.5%
C_4	19.9%	17%	2.5%

5.4.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 4a (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

Explica, tan claramente como puedas, lo que dice la 2ª Ley de la Termodinámica

Esta cuestión ha sido planteada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y 40 estudiantes en tercer curso en Físicas.

Las respuestas se han codificado según el tipo de enunciado con las categoría **D_i** y para 1º de Universidad(Biológicas) de acuerdo su corrección o incorrección científica con las categorías **D'i**. Paso a describirlas y a plasmar los resultados:

D₁ - Respuesta relacionada con el enunciado Kelvin-Planck

D₂ - Respuesta relacionada con el enunciado de Clausius

D₃ - Aumento de entropía y desorden

D₃₁- en relación a cambios químicos

D₃₂- relacionándolo con evolución del Universo o de un sistema aislado

D₃₃- otros contextos

D₄ -Otros

D₄₁- contexto: cambios químicos

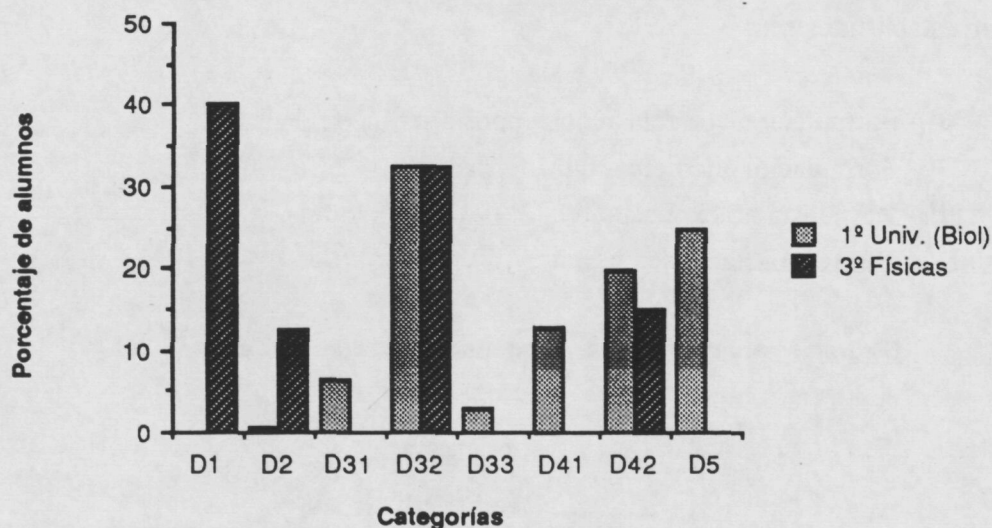
D₄₂- contexto no específico

D₅ -Sin respuesta

Los resultados obtenidos por ambos grupos de estudiantes son:

	1º Univ (Biol)	3rd Físicas
D₁ -	0%	40%
D₂ -	0.71%	12.5%
D₃		
D₃₁ -	6.38%	0%
D₃₂ -	32.62%	32.5%
D₃₃ -	2.84%	0%
D₄ -		
D₄₁ -	12.77%	0%
D₄₂ -	19.86%	15%
D₅ -	24.82%	0%

Diagrama para cuestión 4a (Q-3A), frecuencias en %



La respuesta más frecuente para los estudiantes de 1º Universidad (Biológicas) corresponde a la estereotipada frase: "La 2ª Ley dice que la entropía del Universo aumenta" o que "el desorden del Universo aumenta"

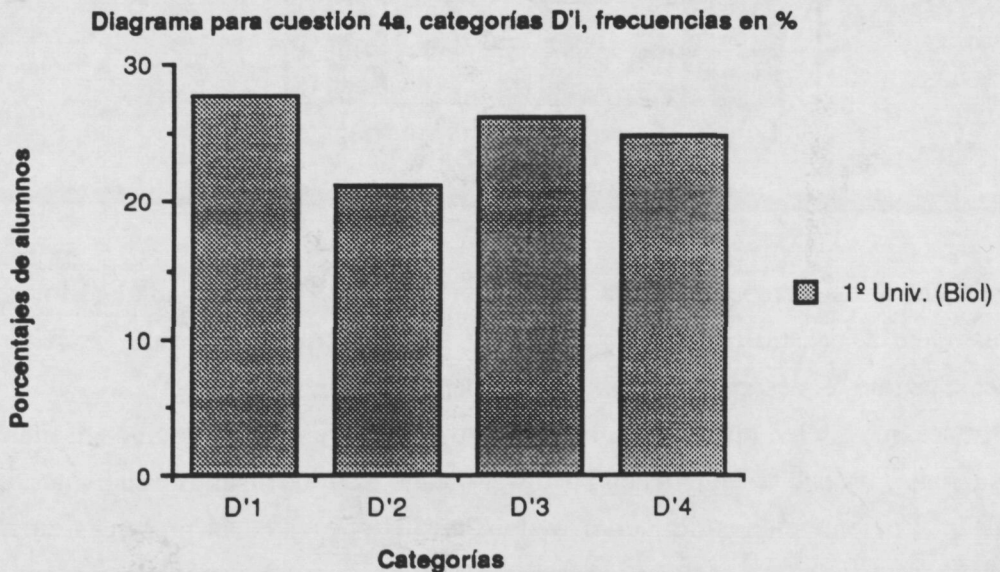
Son frases que suelen aparecer en los primeros niveles en que se recibe enseñanza de estos temas y probablemente tienen poco significado para los mismos estudiantes que las emplean. Los enunciados de Kelvin y de Clausius apenas están presentes en alguna respuesta de estos alumnos de primer curso. Es probable que las conocieran si sus vagas nociones sobre la 2ª ley procedieran de cursos de Física en lugar de Química. En muchas de las respuestas aparece la referencia a cambios químicos, es por lo que se han definido las categorías **D₃₁** y **D₄₁**.

En cambio, es curioso constatar que a los alumnos de 3º de Físicas les resulta más familiar el enunciado de Kelvin (**D₁** -40%) que cualquier otro y, en particular, les resulta mucho más distante la formulación de Clausius (**D₂** - 12.5%). Sigue siendo bastante elevada la proporción de estudiantes que responden con el enunciado aprendido en los primeros niveles y que hemos calificado de respuesta estereotipada: **D₃₂**. Estos estudiantes no hacen referencia a los cambios químicos, por lo que las categorías **D₃₁** = 0 y **D₄₁** = 0.

Todos los alumnos de 3º de Físicas dan alguna respuesta, lo cual es natural en su nivel de formación, como también es comprensible que casi una cuarta parte de los alumnos de 1º de Universidad se sientan inseguros y no contesten a la cuestión. (categoría **D₅**).

Se ha codificado también el nivel de precisión con que los alumnos de 1º respondían a la cuestión. De la lectura de las respuestas se desprende que responder o no a la cuestión puede ser más debido a una actitud personal que a un conocimiento real. Los criterios de calidad establecidos son:

- D'1- Formulación correcta aunque podría ser incompleta
- D'2- Formulación incorrecta o inadecuada de la 2ª Ley
- D'3- Respuesta no expresando la 2ª Ley, ignorándola.
- D'4- Sin respuesta



El diagrama nos muestra como parecidos porcentajes obtienen los cuatro niveles de calidad. Podemos afirmar con seguridad que la 2ª ley ha sido enseñada, por lo menos, a algo más de la mitad de los alumnos ($D'1= 39$ y $D'2=30$). De los alumnos que la ignoran ($D'3$) o que no responden ($D'4$) no podemos asegurar nada.

5.5. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 4b (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

¿Tiene alguna consecuencia (la 2ª ley) en la vida cotidiana? Explícalo.

Después de haber respondido en el apartado anterior de la cuestión 4, cuál era el enunciado de la 2ª ley de la Termodinámica, se pretendía saber ahora si le encontraban alguna aplicación en la vida cotidiana.

La cuestión ha sido formulada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Las respuestas se han codificado según dos criterios: su capacidad o no de explicar alguna situación cotidiana mediante la 2ª ley, y entre los que saben aplicarla se ha codificado la calidad de la respuesta. De acuerdo con la capacidad de aplicar la 2ª ley, se han establecido las siguientes categorías:

E₁-Sí

E₁₁- Dan una aplicación

E₁₁₁- en un contexto cotidiano concreto

E₁₁₂- en un contexto abstracto

E₁₂- Frases sin significado

E₂- No

E₃- Sin respuesta

Los resultados obtenidos por ambos grupos de estudiantes son:

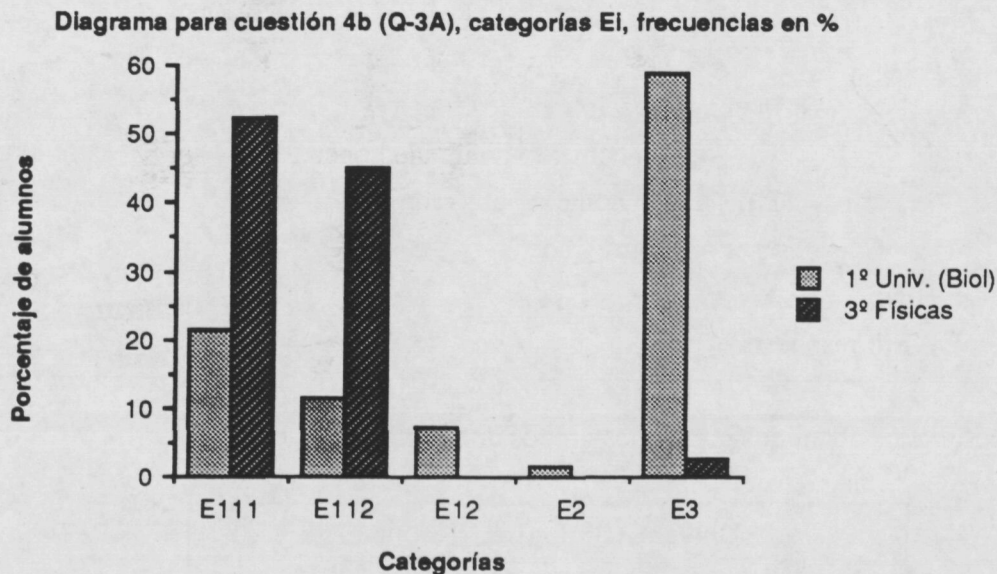
	1º Univers. (Biolog)	3º
Físicas		
E₁₁₁	21%	52.5%
E₁₁₂	11.5%	45%
E₁₂	7%	0%
E₂	1.5%	0%
E₃	58.8%	2.5%

La mayoría de estudiantes de 1º no han respondido a la cuestión.

La mejor comprensión hace posible que más de la mitad de los estudiantes de 3º den alguna respuesta que muestra su capacidad para aplicar la 2ª ley a alguna situación cotidiana específica (E₁₁₁). Veamos algunos ejemplos: *"Toda factura derivada de la utilización de energía (teléfono, luz, gas,...) sería más barata si no fuera por la 2ª ley. Se podrían crear móviles perpetuos de 2ª especie"* (3º Fís).

A pesar de este aspecto positivo, también hay que dar cuenta de que casi otra mitad de alumnos de 3º (45%) no consiguen superar el nivel abstracto de la segunda ley y expresar su respuesta en términos cotidianos. E₁₁₂ Así tenemos respuestas como: *"Ya que en un proceso reversible, $dQ/T > 0$, la entropía de todo proceso realizable, aumenta."* Sólo consiguen expresarse en los términos aprendidos de forma académica, de los que no harán uso en su vida cotidiana.

No se han encontrado frases sin sentido en 3º pero hay un grupo de 10 alumnos de 1º cuyas repuestas no son interpretables. Así: *"Se produce en todas las reacciones químicas"* (1º Univ. B)



De todos modos, comparando los dos grupos de estudiantes, lo más destacable es el descenso del grupo E₃ en 3º; casi todos los estudiantes responden de una forma u otra a la cuestión.

El grupo E₁₁ se ha subdividido en tres categorías, según la corrección con que se aplicaba la 2ª ley a situaciones cotidianas.

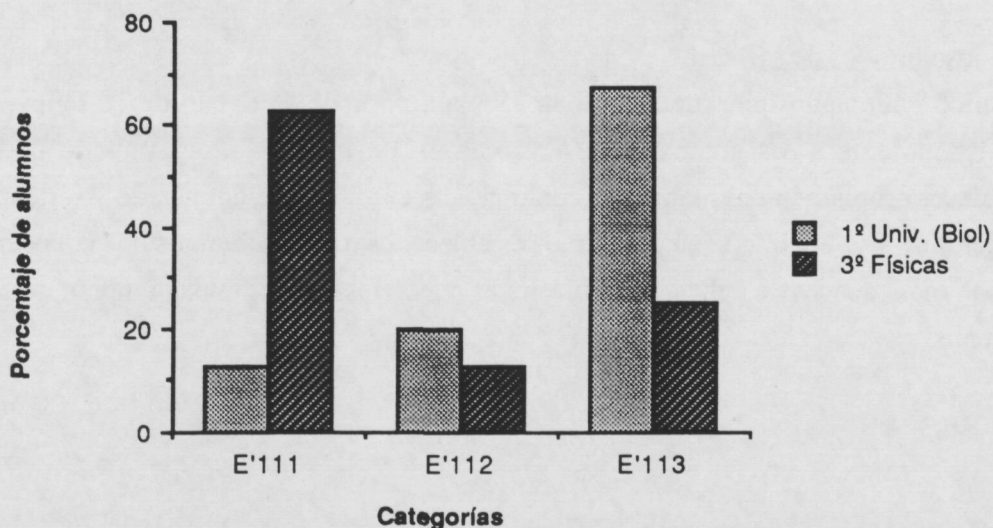
E'111 -Aplicación correcta de la 2ª ley

E'112 -Aplicación incorrecta

E'113 -Respuesta ambigua o incodificables

	1º Univ,	3º Físicas
E'111	39%	64%
E'112	61%	12%
E'113	0%	23%

Diagrama para cuestión 4b (Q-3A), categorías E'I, frecuencias en %



Se constata una mejor comprensión de la 2ª ley en los alumnos de 3º. Podemos encontrar frases como: *"Prohíbe procesos en los que la entropía disminuiría, como por ejemplo, la libre contracción de un gas"*.

De todos modos, no resulta muy convincente este grupo de alumnos E'112 que después de su curso en Termodinámica puedan aplicar incorrectamente la 2ª ley: *"Si consideramos la entropía de los seres vivos, encontramos que es negativa"*

En algunos casos, en 3º, es imposible codificar como correctas o incorrectas algunas respuestas ya que son indefinidas o simple repetición de algún libro de texto E'113: *"Es imposible construir móviles perpetuos. No podemos obtener energía gratis, hay que pagar de alguna manera"* Una explicación más amplia nos podría dar mayor información de su comprensión de la 2ª ley.

Podríamos preguntarnos si existe alguna correlación entre responder con un determinado enunciado de la 2ª ley (como se ha hecho en la cuestión 4a) y saber aplicarla a alguna situación cotidiana (cuestión 4b).

Para ello realizamos las tablas de contingencia entre las categorías Di y las Ei, con los datos obtenidos en 1º Univ (Biol) y en 3º Físicas. Ver las tablas en el Anexo.

Para los alumnos de 3º

El valor de χ^2 obtenido es 3,125 con un grado de significación de 7,931.

No hay pues mayor probabilidad de saber aplicar la 2ª ley entre los alumnos de 3º que dan cierto enunciado que los que dan otro distinto.

Para los alumnos de 1º.

El único enunciado que, prácticamente, los alumnos de 1º daban de la 2ª ley era el correspondiente a los aumentos de entropía en un proceso. Por tanto no podemos establecer propiamente las tablas de contingencia entre tipo de enunciado y ser capaz de aplicar la 2ª ley. Lo único que podríamos establecer es que los alumnos que conocen la 2ª ley son más capaces de aplicarla a situaciones concretas que los que la ignoran, lo cual es evidente.

5.6.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 5a (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

Escribe dos frases que incluyan la palabra entropía.

Esta cuestión ha sido planteada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso en Físicas.

Las respuestas se han codificado siguiendo dos criterios

Aspecto 1: tipo de contexto que se ha utilizado en la respuesta

Aspecto 2: conceptos con los que se relaciona la entropía.

En el aspecto 1: Tipo de contexto, las respuestas se han codificado en las siguientes cuatro categorías:

F₁- Aplicación en situación cotidiana

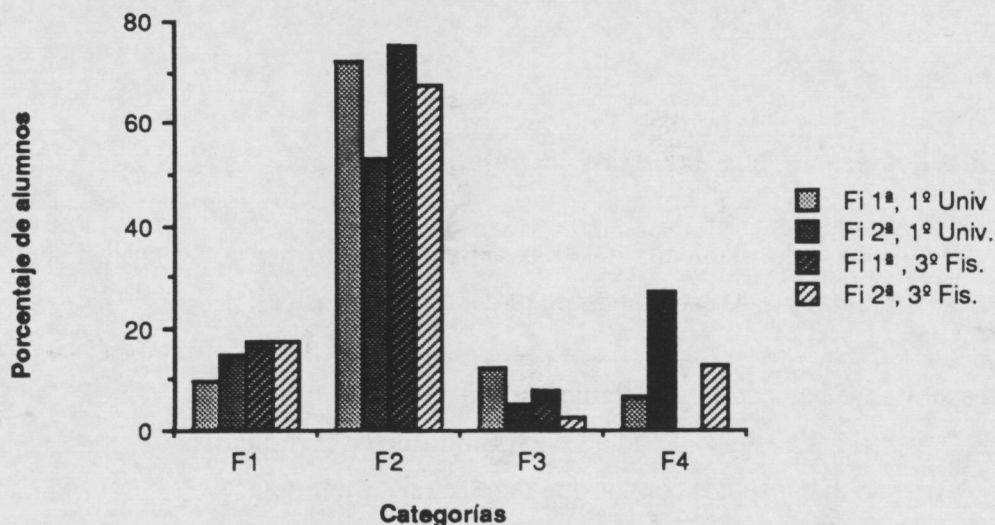
F₂- Utilización únicamente de contexto científico abstracto

F₃- Frases sin sentido físico

F₄- Sin respuesta

	1º Universidad (Biológicas)		3º Físicas	
	1ª frase	2ª frase	1ª frase	2ª frase
F₁	10%	10%	20%	15%
F₂	72%	57%	75%	67.5%
F₃	6%	5%	7.5%	5%
F₄	12%	27%	0%	12.5%

Diagrama para cuestión 5a (Q-3A), categorías FI, frecuencias en %



Como observamos en la tabla, el mayor porcentaje en ambos cursos y en cada una de las frases corresponde a frases en que el término entropía se utiliza en un contexto abstracto, formal o académico sin hacer referencia a situación concreta alguna. Frases de este tipo F_2 son por ejemplo: "La entropía nos da idea del desorden de las cosas" o bien "La entropía del universo está aumentando".

F_1 Mayor número de alumnos en 3º de Físicas que en 1º de Universidad son capaces de formular frases en las que el concepto de entropía está aplicado a situaciones concretas. Tenemos pues una nueva confirmación de que un concepto mejor comprendido permite ser utilizado con varios ejemplos distintos y en situaciones alejadas del contexto académico. Los estudiantes de 3º son más capaces de hacerlo, comprenden mejor el concepto de entropía, como era de esperar. Alrededor de un 20% de estos estudiantes son capaces de hacerlo con facilidad durante la administración del cuestionario. Esto supone aproximadamente el doble que en 1er. curso, aunque no sea un elevado porcentaje.

F_3 Es curioso constatar que el porcentaje de alumnos que intentan eludir la cuestión con frases escapatorias sin significado físico, es aproximadamente el mismo en ambos cursos. Introducen la palabra entropía en una frase pero sin que muestren su conceptualización; por ejemplo: "Actualmente se habla mucho de entropía sin que esto se tenga demasiado claro" (3º Fís) o bien: "Los aumentos de entropía se escriben abreviadamente mediante ΔG " (1º Univ.)

F₄ Todos los alumnos de 3º dan alguna respuesta a la cuestión a pesar de que un 12.5% sólo redactan una sola frase. Entre los alumnos de 1er. curso hay un 12% que no responde y un 15% que sólo hace una frase.

Podríamos preguntarnos si es por azar que los alumnos responden en un contexto u otro, o bien, si es que hay grupos de alumnos que con mayor probabilidad hacen frases en un contexto mientras otro grupo de alumnos lo hacen en otro. Para ello podríamos realizar las tablas de contingencia correspondientes pero el elevado número de respuestas en ambos cursos y en ambas frases hace inadecuado este tipo de análisis estadístico. (Ver Anexos)

Aspecto 2: Conceptos con los que se relaciona la entropía

Al analizar el contenido de las frases encontramos que los estudiantes relacionan la entropía con:

- F'₁- Desorden
- F'₂- Espontaneidad e irreversibilidad
- F'₃- Cambios químicos
- F'₄- Estados de la materia
- F'₅- Sólo con aumentos y disminuciones de entropía
- F'₆- Aumento "en el Universo" o en un sistema aislado
- F'₇- Con una magnitud física con algunas características
- F'₈- Equilibrio de los sistemas
- F'₉- Otros
- F'₁₀- Sin respuesta

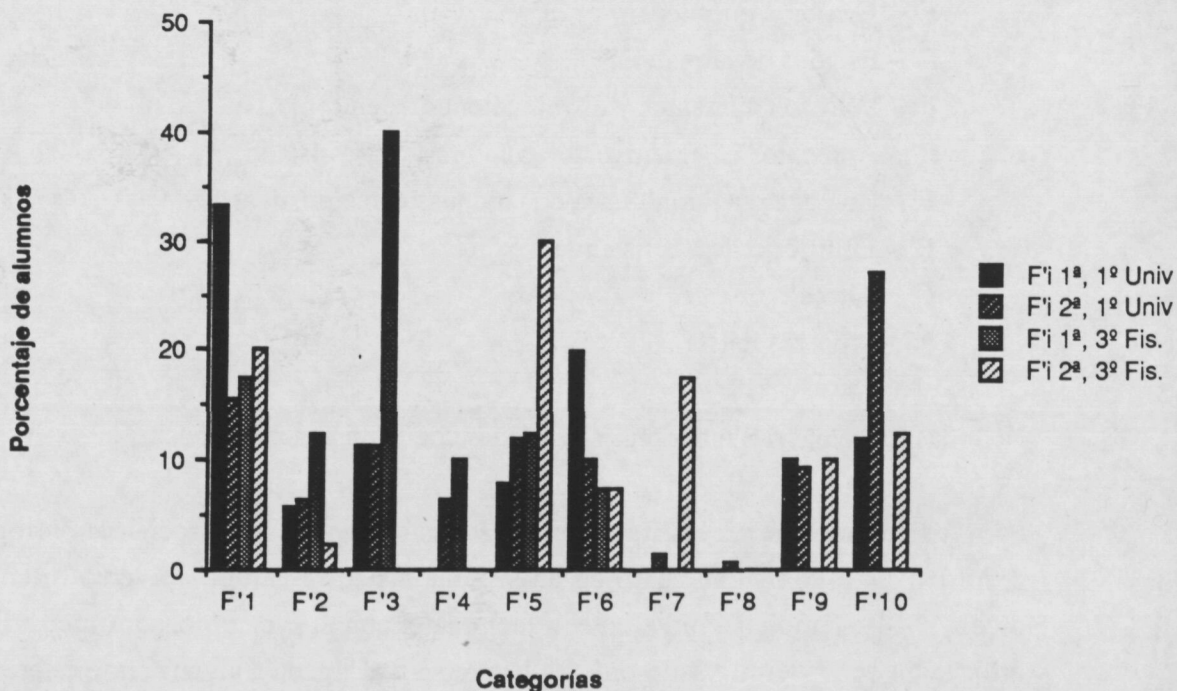
No todas las categorías anteriores son citadas con la misma frecuencia.

Para los alumnos de 1º, las frases más frecuentes son las que asocian la entropía con desorden: F'₁, con su aumento en un sistema aislado ("en el Universo" como ellos dicen) F'₆ y también como algo relacionado con los cambios químicos F'₃. La utilización de los términos desorden y Universo está ligada a alguna frase estereotipada sacada de algún libro de texto introductorio de la 2ª ley. Probablemente, estos estudiantes no conocen el significado que tiene el término desorden, aplicado a sistemas termodinámicos. Dicen por ejemplo: "*La entropía mide el desorden*" o "*La entropía del Universo está aumentando*". El hecho que relacionen la entropía con los cambios

químicos corrobora una vez más que es en los cursos de Química y no de Física donde han aprendido este término de entropía.

	1º Universidad (Biolog)		3º Físicas	
	1ª frase	2ª frase	1ª frase	2ª frase
F'1	33%	16%	17.5%	20%
F'2	5%	6%	12.5%	2.5%
F'3	11%	11%	0%	0%
F'4	0%	6%	0%	0%
F'5	8%	12%	40%	30%
F'6	20%	10%	10%	7.5%
F'7	0%	1%	12.5%	17.5%
F'8	0%	1%	0%	0%
F'9	10%	10%	7.5%	10%
F'10	12%	27%	0%	12.5%

Diagrama para cuestión 5a (Q-3A), para categorías F'i, frecuencias en %



Para los alumnos de 3er curso de Físicas, el término entropía lo asocian principalmente con algo que aumenta o disminuye: F'6. Son frecuentes las frases como: "En un proceso real la entropía de los sistemas sólo puede aumentar". También asocian la entropía con el

desorden y, con una frecuencia muy superior a los de 1º, con una magnitud física que tiene algunas particularidades: F'_7 (*función de estado, no medible, un potencial etc*)

Digno de destacar son también las ausencias. Prácticamente ningún estudiante de los dos cursos asocia la entropía al equilibrio de los sistemas. Frases del tipo: *"El estado de equilibrio se alcanza en un sistema aislado, cuando la entropía es máxima* o frases relacionando la entropía con una tendencia de la naturaleza hacia la homogeneidad están absolutamente ausentes. También son escasas las referencias, en ambos grupos, a la espontaneidad de los procesos, la irreversibilidad F'_2 o la flecha del tiempo.

No se constata pues que para los alumnos de 3, la entropía haya ganado mucho en significación física. Si sólo es una magnitud que aumenta o disminuye y que está vagamente relacionada con algo que se denomina orden, poca será su aplicabilidad para analizar el transcurso de procesos o para dar explicación de fenómenos. Los cambios que se detectan en el paso de 1er. curso a 3º de Físicas son pues, más bien mejoras en el conocimiento formal de la entropía que en su significación real. Otras cuestiones nos permitirán corroborar tal afirmación.

5.7. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 5b (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

¿Qué crees que debe ser mayor, a temperatura ambiente: la entropía de un mol de hielo o la de un mol de agua líquida? ¿Por qué?

Esta cuestión ha sido planteada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Las respuestas se han codificado de acuerdo con las siguientes categorías y subcategorías:

G₁- $S_{\text{agua líquida}} > S_{\text{hielo}}$

G₁₁ - Mayor desorden, mayor libertad, menor interacción entre las moléculas del agua líquida

G₁₂ - El hielo funde espontáneamente, tendencia del proceso

G₁₃ - Sin explicación de la respuesta o incorrecta

G₂- $S_{\text{hielo}} > S_{\text{agua líquida}}$ debido a:

G₂₁ - Mayor desorden de las moléculas del hielo

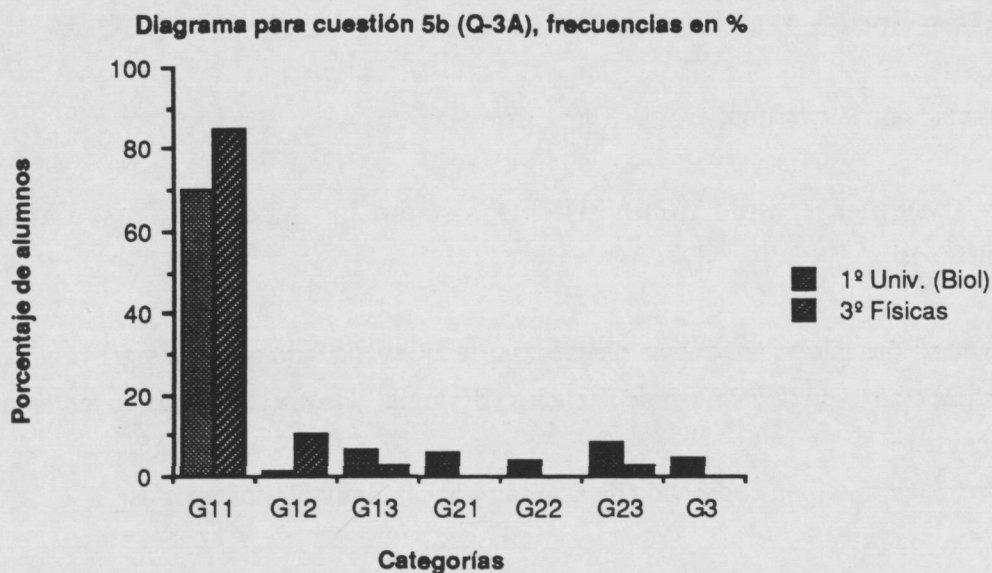
G₂₂ -Razonamientos sobre el hielo a temperatura ambiente

G₂₃ -Explicaciones vagas o contradictorias

G₃ - Sin respuesta

La comparación de resultados entre los dos cursos, lo cual nos permite ver el progreso con un mayor nivel de enseñanza:

	1º Univ	3º Físicas
G₁		
G₁₁	70.2%	85%
G₁₂	1.4%	10%
G₁₃	6.4%	2.5%
G₂		
G₂₁	5.7%	0%
G₂₂	3.5%	0%
G₂₃	8.5%	2.5%
G₃	4.3%	0%



Observando la tabla y el diagrama se evidencia un claro progreso entre las respuestas de los dos grupos de estudiantes.

G₁₁ "La mayor libertad de las moléculas del agua líquida", "el menor orden interior" y "la mayor estructuración del hielo" son los argumentos más comunes que utilizan los estudiantes de ambos cursos para justificar su respuesta. *"Es mayor la entropía de un mol de agua líquida porque en el agua líquida el desorden es mayor y la entropía es la medida del desorden"*

G₁₂ Bastante menos frecuente es pensar en la dirección del cambio físico a temperatura ambiente. En 3er. curso encontramos un 10% de respuestas pero en 1º apenas hay quien mencione la tendencia del hielo a fundirse. De todos modos, los estudiantes, incluso los de 3º, piensan más en las propiedades de la materia (líquido o sólido) que en el proceso, la tendencia o la espontaneidad del cambio.

Podrían también referirse a la necesidad de absorción de calor del hielo para fundirse, lo que podría corresponder a una definición macroscópica de entropía, pero no lo hacen. La relación entropía-desorden está muy arraigada y, a pesar de la sutileza del concepto de orden, es la más utilizada para justificar las respuestas. Así los porcentajes en **G₁₁** entre los dos cursos no difieren demasiado.

G₂ Aproximadamente un 18% de los estudiantes de 1º consideran que S_{hielo} es mayor que la $S_{\text{agua líquida}}$ y, curiosamente, una tercera parte de ellos también lo argumentan por *"el mayor orden de las moléculas del agua líquida"*. Ninguna respuesta de este tipo encontramos en los estudiantes de 3º.

5.8. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 6 (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

**¿En cualquier cambio de un sistema aislado, la entropía siempre aumenta?
Explícalo.**

Esta cuestión, que es una forma de expresar la 2ª ley, ha sido planteada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Las respuestas se han codificado de acuerdo con las siguientes categorías:

H₁- Sí Explicación a partir de razonamientos como:

H₁₀- Sólo $\Delta S > 0$ si el proceso es irreversible

H₁₁- Se tiende siempre a máxima entropía

H₁₂- Lo afirma la 2ª ley de la Termodinámica

H₁₃- Se tiende al desorden

H₁₄- Se tiende al equilibrio. Espontaneidad

H₂-No siempre. Sólo en algunos cambios

H₂₁- S puede aumentar o disminuir

H₂₂- Hay procesos que pueden ir del desorden al orden

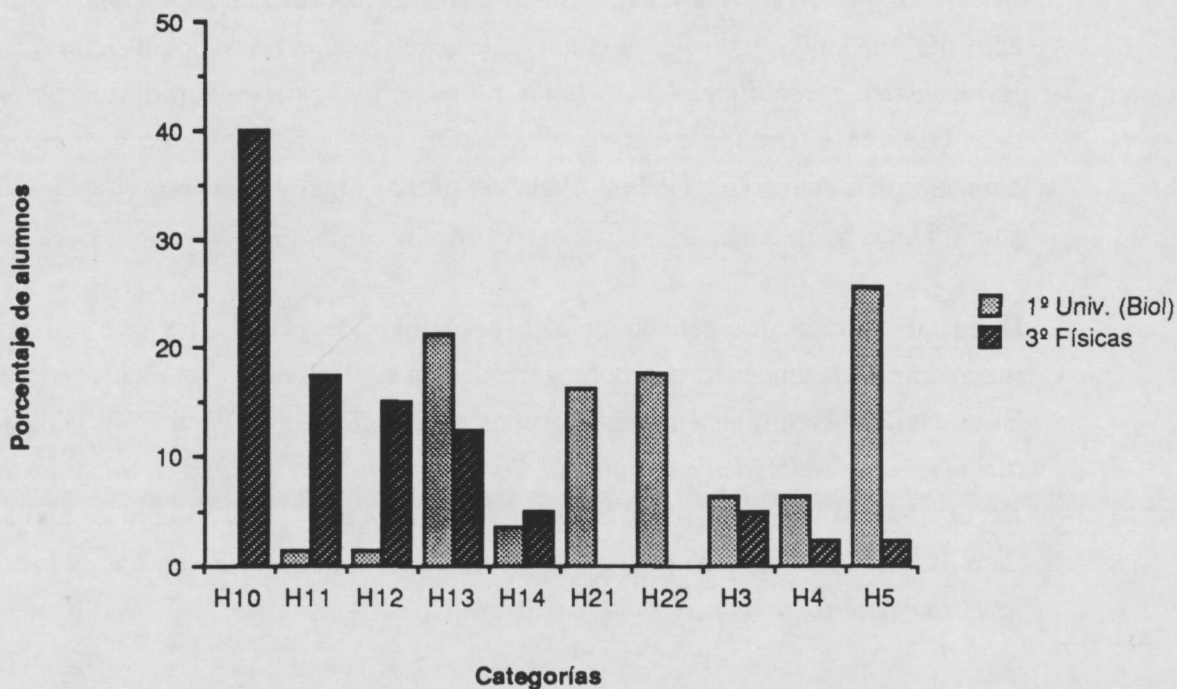
H₃- Nunca- S= constante si el sistema está aislado

H₄- Otros- Respuestas vagas, irrelevantes

H₅- Sin respuesta

	1º Univ.(Biol)	3º Físicas
H₁		
H₁₀	0%	40%
H₁₁	1.4%	17.5%
H₁₂	1.4%	15%
H₁₃	21.3%	12.5%
H₁₄	3.5%	5%
H₂		
H₂₁	16.3%	0%
H₂₂	17.7%	0%
H₃	6.4%	5%
H₄	6.4%	2.5%
H₅	25.5%	2.5%

Diagrama para cuestión 6 (Q-3A), frecuencias en %



Las respuestas más precisas son las que corresponden a **H₁₀**. Los estudiantes son capaces de distinguir $\Delta S > 0$ si el proceso es irreversible y $\Delta S = 0$ si es reversible. Un 40% de estudiantes de 3º y ninguno de 1º dan este tipo de respuesta. Eran unos valores esperados para 3º, ya que se trata de una cuestión formulada en términos abstractos y explicada en cursos de Física de forma similar.

También son mucho más elevados los porcentajes de estudiantes de 3º que dan una respuesta afirmativa de la cuestión, argumentando que la entropía tiende a aumentar **H₁₁** o bien que la 2ª ley lo establece **H₁₂**. *"En un sistema aislado la entropía aumenta o se mantiene constante. No puede disminuir tal como asegura el 2º principio de la Termodinámica"*. (3º Fís)

H₁₃ Es probablemente significativo que el número de estudiantes que razonan diciendo que "la entropía aumenta porque aumenta el desorden", decrece de 1º a 3º. En su mente, el concepto de orden/desorden, al igual que el de equilibrio de un sistema, está lejos de la concepción que se le da en Termodinámica. Para muchos estudiantes orden equivale a equilibrio. Un sistema aislado está en equilibrio y por tanto -piensan- en orden. Un cambio en el sistema sólo puede producir desorden. Entonces, la entropía tendrá que aumentar. Así pues, en su mente, el equilibrio no es una situación a la que llegará el

sistema en el cual la entropía llegará a su máximo. Así, leemos por ejemplo: "Sí, *S* aumenta porque en un sistema aislado hay equilibrio. Si lo modificamos creamos un desorden en el sistema, tenderá de nuevo al equilibrio pero para conseguirlo necesita reaccionar y como el sistema está aislado siempre provocará un incremento positivo de la entropía" (1º Univ.) y otro estudiante: "Cualquier cambio o variación en un sistema que se encuentre en equilibrio (la cuestión no hacía mención de equilibrio) supondrá en principio una alteración del sistema, es decir, un desorden o un caos que implica un aumento de la entropía". (1º Fís). Parecido tipo de argumentaciones encontramos en el grupo H₄.

H₁₄ Hay también que señalar el bajo porcentaje de estudiantes que utilizan como razonamiento la tendencia a la homogeneidad, la evolución de los procesos espontáneos. El porcentaje es similar en ambos grupos de estudiantes (3.5% y 5%). "Los sistemas aislados siempre tienden al equilibrio y al ser la entropía máxima en tal situación, para llegar a ello la entropía siempre tendrá que aumentar" (3º Fis) o bien un alumno de 1º dice: "Un sistema aislado sólo puede evolucionar en el sentido en que el proceso sea favorable ($\Delta S > 0$) al no poder intercambiar nada con el exterior".

Otra línea de razonamientos: "Si aislamos un sistema pasará del caos al equilibrio y por tanto del desorden al orden. Por tanto, la entropía disminuirá" (1º Univ). "En un sistema aislado no hay intercambio de energía ni de materia, así que un cambio en el sistema implicará una nueva distribución de la que se encontraba en él. Por tanto esta nueva distribución puede suponer una disminución de orden" (1º Univ)

El desconocimiento de la 2ª ley está bien comprobado para estos estudiantes de los grupos H₂₁ y H₂₂. Es adecuado contrastar con las respuestas de estudiantes a la cuestión 4a en la que se preguntaba directamente por la 2ª ley.

No hay ningún alumno de 3º que responda con estos tipos de argumentos.

H₃ Resulta sorprendente que un 5% de estudiantes de 3º consideren que en todo cambio, la entropía de un sistema aislado no puede cambiar puesto que está aislado: "No, porque no hay ningún agente que la haga cambiar - se refiere a la entropía-" (3º Fís). Un porcentaje similar encontramos en 1er. curso de Universidad y los razonamientos son iguales: "Si un sistema está aislado, su entropía no puede aumentar ni disminuir, siempre será la misma" (1º Univ)

H₅ Una cuarta parte de los estudiantes de 1º no se sienten seguros de responder a esta cuestión. Veremos si corresponden a los mismos que no han respondido a la cuestión 4a.

Relación entre las respuestas a diferentes cuestiones

Podemos preguntarnos si los alumnos que mejor responden a esta cuestión 6-Q-3A son también los que mejor han respondido a la cuestión en que se pedía que enunciaran la 2ª ley de la Termodinámica, cuestión 4a-Q-3A.

Establecemos la tabla de contingencia entre los valores encontrados para los alumnos de 1ª Universidad (Biológicas) en las cuestiones 4a y 6: Para ello agruparemos en las grandes categorías en que se han codificado: categorías **D₁**, **D₂**, **D₃**, **D₄** y **D₅** para la cuestión 4a y categorías **H₁**, **H₂**, **H₃** junto a **H₄** y **H₅** para la anterior cuestión 6-Q-3A.

Observed Frequency Table

	D2	D3	D4	D5	Totals:
H1	0	20	11	8	39
H2	0	21	14	13	48
H3+H4	0	4	10	4	18
H5	1	14	11	10	36
Totals:	1	59	46	35	141

Observando la tabla nos damos cuenta que no hay relación entre haber respondido bien una cuestión y haberlo hecho en la otra. Además si hacemos cálculos estadísticos encontramos $\chi^2 = 9.44$, un valor extremadamente pequeño para el número de grados de libertad de la tabla. Haber enunciado con mayor o menor precisión y corrección la 2ª ley en la cuestión 4a no implica conocer que en un proceso que tenga lugar en un sistema aislado, la entropía no puede disminuir.

5.9. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 8 (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

Planck decía que el principio de conservación de la energía era muy fácil de aceptar porque permitía considerar la energía como si fuera una sustancia cuasi-material. (Por lo tanto, sería fácil imaginar que hay siempre una misma cantidad). Otros colegas decían que no podía hacerse este paralelismo porque observamos que los objetos materiales se gastan, se rompen, se hacen viejos etc y según esta semblanza algo similar le ocurriría a la energía. ¿Quién tenía razón? ¿Por que?

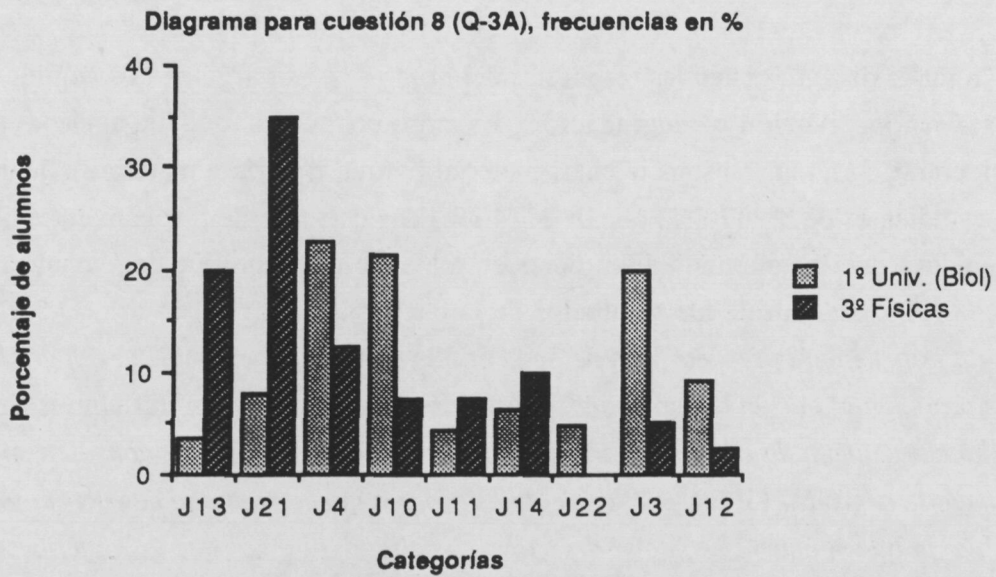
Esta cuestión ha sido planteada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología), a 100 estudiantes en primer curso en Físicas y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Las respuestas se han codificado, según el tipo de razonamiento que cada estudiante daba, en las siguientes categorías:

- J₁- Se acepta el paralelismo entre energía y materia**
 - porque energía y materia se conservan y transforman: **J₁₀**
 - porque energía y materia se degradan o gastan: **J₁₁**
 - porque la materia tiene energía que se gasta /
 - cuando la materia se gasta pasa a ser energía.....**J₁₂**
 - dada la unificación $E = mc^2$ **J₁₃**
 - otras relaciones entre energía y materia.....**J₁₄**
- J₂- No aceptan el paralelismo**
 - argumentos diversos considerando que energía difiere de materia.....**J₂₁**
 - argumentando que energía es un concepto abstracto.....**J₂₂**
- J₃- No comparan energía y materia**
- J₄ Sin respuesta o sin argumentos.**

Puede compararse los porcentajes en cada categoría de los alumnos de dos de los cursos de la muestra. Del otro grupo de respuestas (alumnos de 1º de Físicas) se ha hecho sólo un análisis cualitativo para alguna de las categorías.

	1º Univ.(Biol)	3º Físicas
J₁	44.7%	82.5%
J ₁₀	21.3%	20%
J ₁₁	4.3%	35%
J ₁₂	9.2%	12.55
J ₁₃	3.5%	7.5%
J ₁₄	6.4%	7.5%
J₂	12.8%	10%
J ₂₁	7.8%	10%
J ₂₂	5%	0%
J₃	19.9%	5%
J₄	22.7%	2.5%



Observamos importantes diferencias entre los resultados obtenidos por los alumnos de 1º y los de 3º. Estas diferencias van en sentido contrario del que se esperaba. Quizás algunas ideas relativistas son la causa de estos inesperados resultados. Quizás es la autoridad del nombre de Planck en la cuestión provocan estos resultados. Algunas ideas relacionando la energía con el vector de Pointyng no han aparecido hasta este momento.

J₁ Mientras un 25% de estudiantes de 3º en la cuestión 1 (de Q-3A) definían la energía como un concepto abstracto, ahora un 82.5% (**J₁**) consideran que la energía puede

considerarse como una sustancia cuasi-material, que es comparable a la materia. A pesar de ello, las razones que apoyan tal paralelismo son bien distintas.

Los estudiantes de 1º Universidad (Biolog) aceptan el paralelismo energía y materia en un 45% de los casos pero hay que tener en cuenta que un 23% de ellos no responden a la cuestión.

El grupo J₁₀ considera que la energía puede compararse a la materia porque ambas se conservan y transforman a lo largo de los cambios. Esta es la razón para un 20% de los estudiantes de 3º y un 21.3% de los de 1er. curso. Así pues, tenemos un porcentaje similar. Frases significativas de esta categoría son por ejemplo: *"Tenía razón Planck porque la energía únicamente se transforma, no se pierde y aunque los objetos materiales se gasten o rompan la materia no se destruye"* (1º Univ.) o bien: *"Planck tenía razón porque lo único que le ocurriría a un objeto cuando se gasta o rompa sería equivalente a una transformación de la energía en otro tipo de energía; la total se conserva"* (3º Fís). Todas las respuestas de este grupo contienen la idea de conservación y transformación de la energía.

J₁₁ Un matiz distinto tienen las respuestas del grupo J₁₁. Sus argumentos contienen las ideas de conservación y degradación. Este grupo acepta que la energía puede considerarse como una sustancia cuasi-material porque energía y materia se degradan. Más estudiantes de 3º (12.5%) que de 1º (4.3%) dan este tipo de razonamiento. Quizás es debido a que los alumnos de 3º conocen mejor lo que significa degradación de la energía (Este era uno de los resultados de la cuestión 3 del cuestionario Q-3A). *"La energía está siempre presente pero no de la misma forma ya que también se degrada y se transforma, igual que un objeto cuando pasa de ser nuevo a ser viejo"* (1º Univ). *"La idea de Planck es buena, la energía podría pensarse como un material que conserva su masa pero que se degrada"* (3º Fís.). *"Planck tenía razón ya que la cantidad de energía total no cambia, lo que sí ocurre es que se deteriora su calidad, al igual que los objetos cuando envejecen pierden calidad, análogamente a la energía que lo único que hacemos es cambiar su calidad (al envejecerla) pero no disminuirla"*. (3º Fís)

El grupo J₁₂ es el más sorprendente. Corresponde a los estudiantes que mezclan los conceptos de energía y materia de una manera evidente. Para ellos cuando un objeto material se gasta su energía se degrada, o al revés, si la energía de un objeto se degrada dicho objeto se gasta.

Encontramos un 12.5% de estudiantes de 3º de Físicas en este grupo: *"Podemos pensar que cuando una cosa se hace vieja, hay una degeneración de la energía"* o bien: *"El hecho de envejecer, romperse, etc un material, no implica que continuará habiendo la misma cantidad de material. Entonces la energía se podrá degradar, (disminuirá la capacidad para producir trabajo útil) pero la cantidad de energía continuará siendo la misma"*. *"El hecho*

que los materiales se gasten, se rompan y envejecan quiere decir que la energía pasa a otras formas de energía" (3º Fís)

Frases similares encontramos en los estudiantes de 1er. curso y en un porcentaje (9.2%) no demasiado distinto que en 3º. Algunas frases expresan exactamente la misma idea: objeto usado implica degradación de su energía. *"Al romperse un objeto, su energía se transforma en calor, en trabajo ..."* , *"Si vemos cambiar los objetos es porque su energía pasa a otro nivel"* (1º Univ.) Otras frases presentan un matiz algo distinto: la energía de un objeto disminuye cuando se estropea. Por ejemplo: *"Si un cuerpo pierde energía al envejecer, un nuevo cuerpo tendrá más energía y se compensará"* (1º Univ)

En este grupo J₁₂ se ha incluido también las respuestas en que se manifiesta una idea singular: La materia se convierte en energía cuando un objeto se gasta. Del 9.2% del grupo un 4.2 % manifiesta esta idea. Por ejemplo: *"La materia degradada se transforma en energía. Así, la energía y la materia (que también es energía) son constantes"*, o también *"La energía puede ser tratada como materia. De hecho, cuando hay una diferencia de materia en una reacción, es que la materia se ha convertido en temperatura"*.(1º Univ).

A la vista de estas singulares ideas, se ha intentado constatar si en la muestra de estudiantes de 1º de Físicas también aparecía la anterior idea: la materia se transforma en energía cuando los objetos se gastan. Así es, y podemos leer por ejemplo: *"Planck tenía razón porque cuando los objetos se gastan es debido a algún tipo de trabajo, es decir, que la materia se transforma en energía, y también se da el paso a la inversa, de manera que la energía (entendiéndose la materia como una manifestación) es constante"* (1º Fís)

Quizás algunas ideas sobre relatividad aprendidas en medios divulgativos están interfiriendo un razonamiento más lógico. No tenemos más información para poder interpretar de donde proviene este tipo de argumentos.

En el grupo J₁₃ la idea central para aceptar el paralelismo entre energía y una sustancia cuasi-material es una idea relativista. Encontramos un 3.5% de estudiantes en 1º Universidad (Biólog) y un 7.5% en 3º de Físicas. Dicen por ejemplo: *"Planck tenía razón porque la materia es energía (como ya demostró Einstein)"* (3º Fís)

Otras diversas y vagas razones permiten aceptar el paralelismo entre energía y materia para el grupo J₁₄.

Hasta ahora nos hemos referido a estudiantes que aceptaban dicho paralelismo. Constituyen el 44.7% de estudiantes de 1er. curso y el 82.5% de los de 3º.

Hay también un grupo de estudiantes que rechazan tal paralelismo. Forman el grupo **J₂**. En él encontramos un 10% de estudiantes en 3º y un 12.8% de 1º. Todos ellos consideran que la energía no puede considerarse como materia y un 5% de estudiantes de 1º especifican que ello es debido a que la energía es un concepto abstracto. Ningún estudiante de 3º Físicas da este argumento a pesar que tal ha sido su definición de energía (en la cuestión 1-Q-3A) en el 25% de los casos.

J₃ -Casi un 20% de estudiantes de 1º eluden la cuestión (en contraste con sólo un 5% en 3º Físicas) dando explicaciones sobre transformaciones de la energía, su conservación etc pero sin propiamente responder al problema que se les planteaba.

J₄ -Los estudiantes de 3er. curso parece que se sienten más seguros de contestar a la cuestión y casi todos dan alguna respuesta (97.5%) . En cambio, cerca de otro 20% de estudiantes de 1º no dan respuesta alguna.

5.10. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 9 (O-3A)

La cuestión tiene dos partes.

5.10.1 Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 9 a) (O-3A)

El enunciado de la primera parte dice:

¿Encuentras alguna explicación al hecho que las cosas envejezcan, se estropeen, se gasten? Explícalo.

Esta cuestión ha sido planteada a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso en Físicas.

Las respuestas se han codificado de acuerdo con las siguientes categorías:

K₁- Se da un enfoque termodinámico a la respuesta

K₂- Se considera que la energía de los objetos disminuye al estropearse etc.

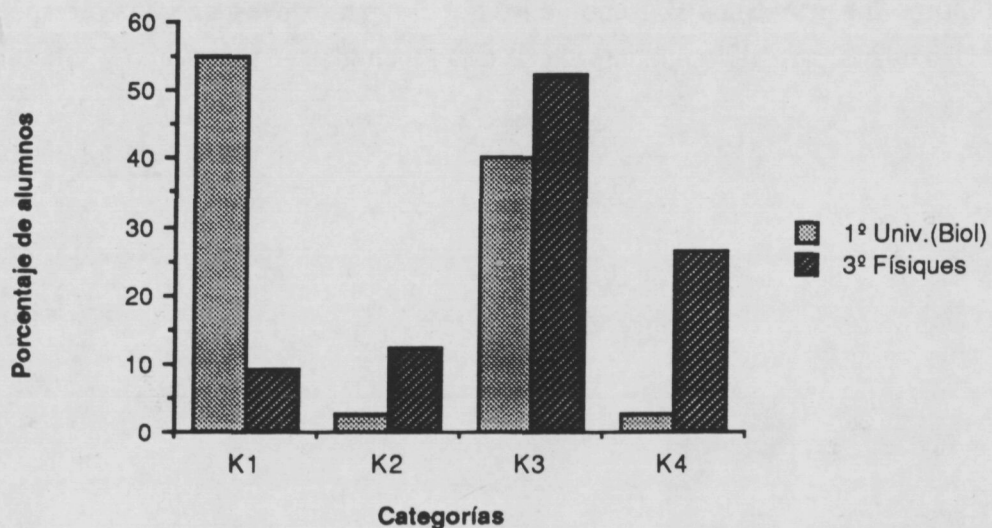
K₃- Se da una explicación en términos cotidianos (con el tiempo, con el uso las cosas se gastan, etc)

K₄- Otros y Sin respuesta

Podemos observar el gran progreso entre las respuestas de 1º Univ. y 3º Físicas en la tabla y en el diagrama:

	1º Univ.(Biol)	3º Físicas
K₁	9.2%	55%
K₂	12.1%	2.5%
K₃	52.5%	40%
K₄	26.2%	2.5%

Diagrama para cuestión 9 (Q-3A), categorías K1, frecuencias en %



Más de la mitad de los alumnos de 3º dan una respuesta con un enfoque termodinámico: *"Las cosas materiales evolucionan también hacia formas y estados de energía mínima y entropía máxima. Sólo es un sistema termodinámico que obedece a la 2ª ley"* (3º Fís). Los alumnos de 1º suelen valerse de su idea de orden-desorden: *"El hecho es que cuando una cosa es nueva está ordenada, entera. Cuando va deteriorándose su desorden aumenta"* (después lo relaciona con los aumentos de entropía)

Es evidente la mayor precisión con que utilizan los conceptos físicos los alumnos de 3º.

Al segundo grupo **K₂** pertenecen los estudiantes que razonan diciendo que un objeto tiene cierta energía (podemos suponer que se refieren a la energía asociada a los enlaces químicos) y cuando se estropea, su energía disminuye. Un grupo de 12.5% de estudiantes de 1º razonan de este modo frente a sólo un 2.5% en 3º. *"Las cosas se erosionan porque reciben energía de un sistema externo, por otra parte pierden energía que dan a otro sistema"* (3º Fís). *"Podría ser debido a una pérdida de su energía interior. A menor energía menor capacidad de trabajo, mayor desgaste"* (1º Univ).

K₃ No son demasiado distintos los porcentajes de alumnos que razonan sin utilizar conceptos físicos. Su argumento es: la materia es destructible, el tiempo y el uso imponen el deterioro, la acción constante sobre los objetos o la interacción con las condiciones ambientales los estropea etc. *"Es el resultado de un cierto número de procesos que actúan sobre las cosas (golpes, calentamientos, etc.)"* (3º Fís). No podemos saber si los estudiantes están pensando en la flecha del tiempo, en el comportamiento y evolución general de la Naturaleza o bien simplemente dan explicaciones domésticas.

K₄ En último lugar tenemos el grupo de los que no dan respuesta alguna o respuestas vagas. Una cuarta parte de estudiantes de 1º están incluidos en este grupo y sólo uno de 3º Físicas

5.10.2. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 9 (Q-3A)

La segunda parte de la cuestión tiene el siguiente enunciado:

"¿Hay alguna relación entre lo anterior y la 2ª ley de la Termodinámica?"

Las respuestas han sido codificadas de acuerdo con las siguientes categorías:

K'1- Sí

K'11- Aplican algún razonamiento acerca de la 2ª ley

K'12- Utilizan confusas y vagas nociones acerca de la 2ª ley

K'13- Hacen una errónea interpretación de la 2ª ley

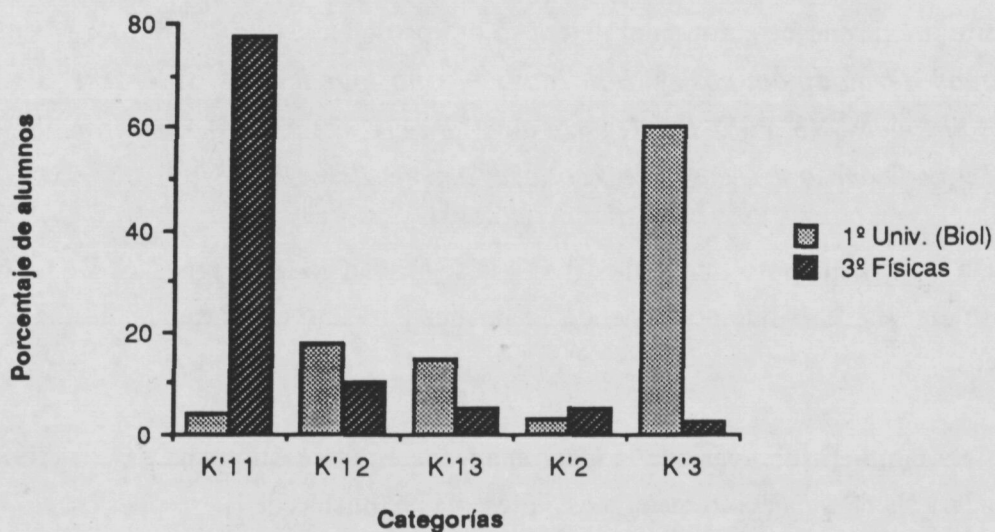
K'2- No

K'3- Sin respuesta

Podemos de nuevo comparar las respuestas entre los dos grupos de la muestra.

	1º Univ. (Biol)	3º Físicas
K'1		
K'11	4.3%	77.5%
K'12	17.7%	10%
K'13	14.9%	5%
K'2	2.8%	5%
K'3	60.3%	2.5%

Diagrama para cuestión 9 (Q-3A), categorías K'i, frecuencias en %



K'11- La razón por la que las cosas se estropean gastan etc es explicada claramente por la 2ª ley de la Termodinámica para los estudiantes del grupo., con un elevado porcentaje de estudiantes de 3º Físicas y un pequeño grupo de 1º Univ. (4.3%): *"El segundo principio establece claramente el sentido en el que discurren los procesos (Por ello una copa hecha añicos no se "autoreconstruye espontáneamente" (3º Fis) "La segunda ley dice que la capacidad de hacer trabajo se pierde con el tiempo" (1º Univ) "La 2ª ley sostiene que la entropía crece y esto es lo que ocurre cuando se rompe o envejece un objeto" (1º Univ)*

K'12- Otras respuestas relacionan el deterioro de las cosas con la 2ª ley de un modo más vago. Utilizan únicamente la idea de orden-desorden, objeto nuevo-objeto estropeado. Está en la línea de los que relacionan: orden, pulcritud, equilibrio, regularidad, armonía etc, es decir el uso cotidiano que damos al término orden. *"Cuando un objeto se rompe se deshace en varios trozos, estas piezas desordenadas pierden su inicial homogeneidad". (1º Univ) "Debido a los factores externos el cuerpo tenderá a aumentar su desorden interno" (3º Fís).* El mayor porcentaje de estudiantes de 1º corresponde a este grupo y un pequeño porcentaje en 3º.

K'13- Otros estudiantes, especialmente de 1er. curso, dan respuestas totalmente incorrectas en cuanto a interpretación de la 2ª ley. Algunas veces relacionan la evolución de los objetos con la conservación de la energía: *"La 2ª ley nos indica que los cuerpos pierden parte de su energía transformándola, una vez la han perdido toda no crean más y por esta razón se estropean y ya no funcionan" (1º Univ.)*

Algunos estudiantes, un porcentaje similar en 3º que en 1º, consideran que la 2ª ley no permite interpretar el porque del deterioro de los objetos. *"La 2ª ley sólo se aplica a sistemas termodinámicos y las "cosas " no pueden considerarse sistemas termodinámicos" (3º Fís). "La pregunta anterior se refiere a sistemas macromoleculares y la Termodinámica se encarga de casos a nivel molecular" (1º Univ)*

K'3 Un importante paso se da en cuanto a la seguridad en las respuestas. De un 60.3% de estudiantes de 1º que no responden a la cuestión, sólo encontramos un 2.5% en 3º Físicas.

Quisiera también subrayar que la idea -analizada en la cuestión anterior (8-Q-3A)- de considerar la energía como materia está presente en muchas de las respuestas. No hemos codificado las respuestas a la presente cuestión siguiendo esta idea pero podemos encontrar frases como: *"Podemos suponer la energía como un objeto al que se le arrancan*

sus partes debido a una supuesta erosión, y estas partes se transforman en otros objetos o partes de objetos" (1º Univ.)