

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

5.11. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 10 (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

¿Cómo es que si ponemos en contacto un cuerpo caliente y uno frío, el calor tiende a pasar del caliente al frío y no al revés? ¿Hay alguna ley o principio que trate esta situación?

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.

Este tema ha sido enseñado a pocos alumnos de 1º de Universidad (Biológicas) y a todos los de 3º de Físicas.

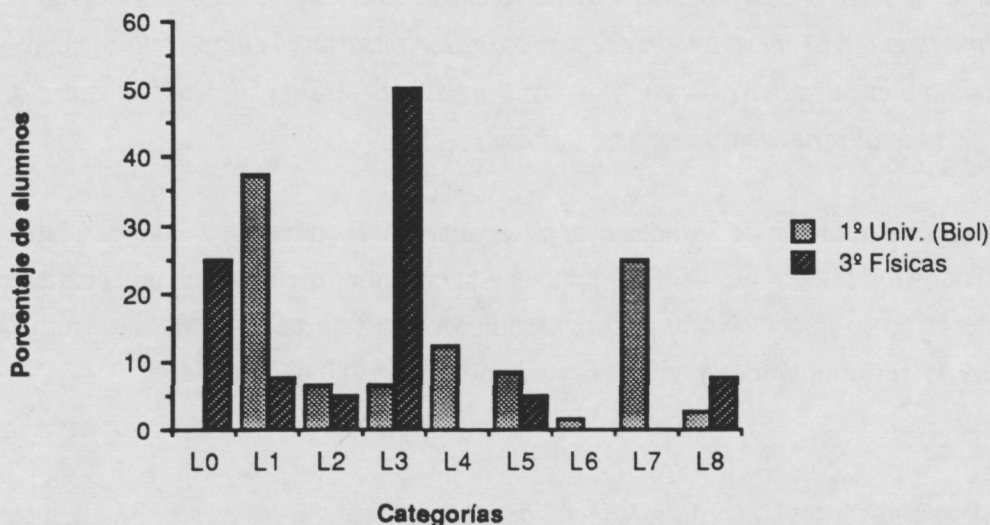
Las respuestas han sido codificadas separadamente para la 1ª y 2ª parte de la cuestión. Para la primera parte las categorías establecidas son:

- L₀- La Naturaleza se comporta de esta manera
- L₁- Hay una tendencia a la homogeneidad
- L₂- Por una tendencia a la mínima energía
- L₃- Esta es la 2ª ley
- L₄- Debido a propiedades de los cuerpos calientes/ de los cuerpos fríos
- L₅- Debido a propiedades del calor
- L₆- No es cierto. Se niega el fenómeno
- L₇- Sin respuesta
- L₈- Otros

Veamos la tabla de respuestas comparando los dos grupos de la muestra:

| | 1º Univ. (Biol) | 3º Físicas |
|----------------|-----------------|------------|
| L ₀ | 0% | 25% |
| L ₁ | 37.5% | 7.5% |
| L ₂ | 6.3% | 5% |
| L ₃ | 6.3% | 50% |
| L ₄ | 12.1% | 0% |
| L ₅ | 8.5% | 0% |
| L ₆ | 1.4% | 0% |
| L ₇ | 24.8% | 0% |
| L ₈ | 2.8% | 7.5% |

Diagrama para cuestión 10 (Q-3A), para categorías L1, frecuencias en %



L₀- Ningún estudiante de primero considera que es posible responder a una cuestión empírica diciendo que la Naturaleza se comporta de este modo.

En cambio, un 25% de los estudiantes de 3º Físicas responden con este tipo de explicación: *"Es un hecho que tiene lugar en la naturaleza y que a priori no le podemos dar ninguna explicación"* *"Siempre ha sido así. No hay ninguna explicación del porque es así. Podríamos encontrar otro universo en que no fuera así..."* (3º Fis)

L₁- El mayor porcentaje (37.5%) de estudiantes en 1º corresponde a las explicaciones en que se argumenta la tendencia a igualarse algunas propiedades o atributos de los cuerpos: su energía, su temperatura, su velocidad molecular, su entropía etc. Sólo un 7.5% de estudiantes en 3º de Físicas responde con estos razonamientos. *"El sistema tiende a equilibrarse y el cuerpo con más energía (más caliente) transmite energía al de menor (más frío)"*. (3º Fís) *"Lo único que pasa es que se tiende a conseguir una temperatura media entre los dos"* (1º Univ)

L₂- La tendencia a la mínima energía es también un argumento utilizado por los dos grupos de estudiantes en porcentajes similares.

L₃- Un salto importante desde 1º Univ. a 3º de Físicas lo encontramos en el reconocimiento de la cuestión como una forma de enunciar la 2ª ley de la Termodinámica. Se pasa de un 6.35% en 1º a un 50% en 3º.

L₄ y L₅- Un escalón en sentido opuesto observamos en el porcentaje de alumnos cuyas explicaciones están basadas en las propiedades de los cuerpos calientes y fríos o en las

propiedades del calor. Desde un 20.5% en 1er. curso pasamos a un 5% en 3º de Físicas. *"Las partículas del cuerpo caliente tienen energía cinética, están en movimiento al haber recibido una cierta energía térmica, por esta razón pasarán al cuerpo frío"*(1º Univ), *"esto es debido a que el calor es la energía más degradada"* (3º Fis) *"El calor es energía, el frío no lo es. El calor puede transmitirse"* (3º Fis)

L₆-Ningún estudiante de 3º niega esta observación al fenómeno y sólo 2 de 1º lo hacen.
L₇- Todos los estudiantes de 3º responden a la cuestión mientras que una cuarta parte de los de 1º no lo hacen. No es sorprendente, ya que éste es un tema de estudio en los cursos de Termodinámica y sólo los estudiantes de 3º lo han recibido.

Quisiera realizar un comentario general después de analizar las frases. En algunos casos, las palabras utilizadas por los estudiantes no me permiten distinguir cuáles piensan que la Naturaleza se comporta según el dictado de leyes físicas y cuáles piensan que las leyes físicas son una consecuencia del análisis de la Naturaleza. A pesar de que no en todos los casos es posible diferenciar a los estudiantes según esta idea, algunas respuestas de ambos grupos son claras: *"La 2ª ley explica porque hay procesos que funcionan unicamente en una dirección. El hecho que el cuerpo caliente se calentara más y el frío se enfriara más, está prohibido por las leyes de la Termodinámica"* (3º Fis) o bien *"La segunda ley rige que este proceso no pueda darse en dirección contraria. Si la entropía ha de ser creciente en un sistema aislado formado por un cuerpo caliente y otro frío, se puede demostrar que el calor pasa del caliente al frío y no al contrario"* (3º Fís)

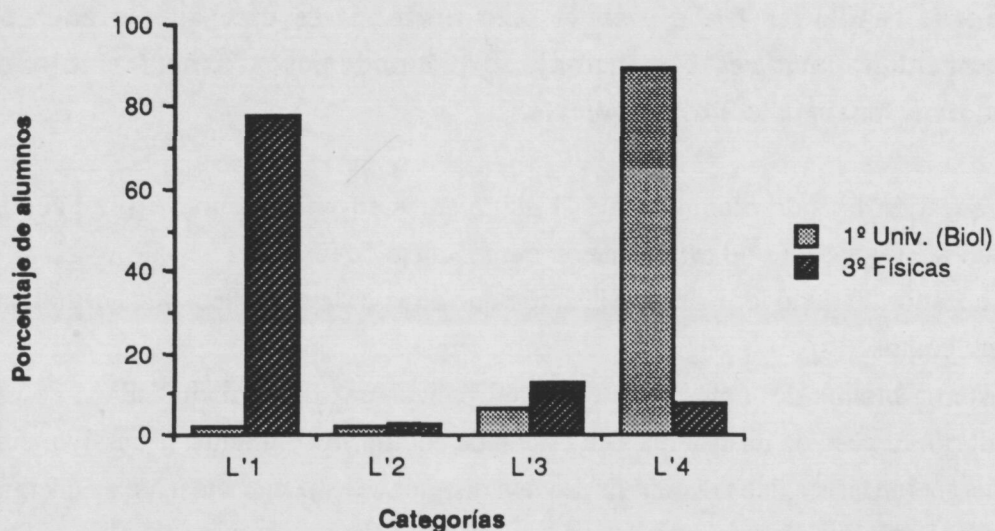
El enfoque opuesto es: *"Esto es un hecho experimental. La ley que trata de esta situación es la segunda ley en su forma de Clausius"* o bien *"No sé porque ocurre, siempre ha sucedido y una interpretación de este hecho la da el 2º principio de la Termodinámica"*. (3º Fis).

La segunda pregunta de esta cuestión 10 (Q-3A) trata de conocer hasta qué punto reconocen en el enunciado de la cuestión alguna ley física.

- L'₁- La 2ª ley de la Termodinámica
- L'₂- La ley de la mínima energía
- L'₃- Otras
- L'₄- Sin respuesta

| | 1º Univ. (Biol) | 3º Físicas |
|-----|-----------------|------------|
| L'1 | 2.1% | 77.5% |
| L'2 | 2.1% | 2.5% |
| L'3 | 6.3% | 12.5% |
| L'4 | 89.4% | 7.5% |

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



Cerca de un 90% de los estudiantes de 1º Universidad (Biológicas) desconocen que ley trata de este fenómeno mientras que un 77.5% de los estudiantes de 3º Físicas saben que se trata de la 2ª ley. Ya es un hecho esperado después de conocer la formación que sobre la 2ª ley han recibido los estudiantes de 1er. curso. Con relativa frecuencia invocan el principio de Chatelier como causa de que el calor pase de los cuerpos calientes a los fríos. "El principio de Chatelier dice precisamente esto. Una reacción tiende a equilibrarse" (1º Univ)

Es curioso constatar que un 12.5% de los estudiantes de 3º no consideran que este fenómeno esté relacionado con la 2ª ley sino con la ley cero, el primer principio o el tercer principio.

5.12. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 11 (O-3A)

Enunciado de la cuestión:

Un gran bloque de hielo en el Sahara puede producir trabajo si hace funcionar una central termoeléctrica aprovechando la diferencia de temperaturas entre la arena y el hielo. Pero, mediante este procedimiento, no puede realizarse trabajo en el polo norte. Si se dice que la energía es la capacidad para realizar trabajo, ¿qué podemos afirmar: el bloque de hielo tiene energía o no? 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 de Físicas.

Esta cuestión trata de la conceptualización que de la 2ª ley han hecho los estudiantes de ambos grupos.

El sistema bloque de hielo-entorno puede realizar trabajo (trabajo útil) si no está en equilibrio. El paso de un sistema a su estado de equilibrio no implica necesariamente que su energía intrínseca deba disminuir. Lo que disminuye es la capacidad de su energía para realizar trabajo útil.

El máximo trabajo útil que el sistema bloque de hielo-ambiente puede realizar puede medirse por la disminución de su energía libre.

$$W_{\max} = -\Delta(U + pV - TS) = -\Delta(H - TS) = -\Delta F$$

o bien:

$$dW_{\max} = -(dU + pdV - TdS) = -\Delta(H - TdS) = -dF$$

El bloque de hielo tiene energía intrínseca pero ello no es razón para que pueda realizarse trabajo o no. La capacidad de realizar trabajo depende de la posibilidad de que la energía libre del sistema pueda o no disminuir.

Después de recordar lo anterior podemos decir que todas o casi todas las respuestas de los estudiantes son sorprendentes. Veamos como han sido codificadas.

La capacidad para realizar trabajo depende de

M₀ - que el proceso pueda representar un $\Delta S > 0$ o bien un $\Delta F < 0$

M₁ - que exista una desigualdad energética o una diferencia de temperaturas en el sistema

M₂ - que el hielo tenga energía para extraer y se den ciertas condiciones térmicas o exista una adecuada tecnología

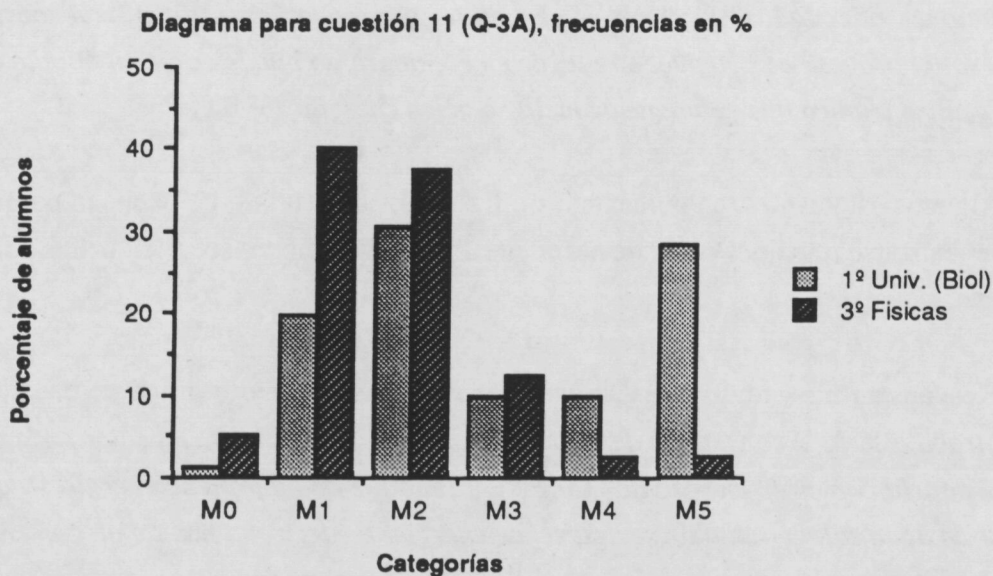
M₃ - Sin explicación o argumentos sobre su respuesta afirmativa o negativa

M₄ - Otros

M₅ - Sin respuesta

La tabla y diagrama que nos permite comparar los resultados en cada grupo son:

| | 1º Univers. (Biol) | 3º Físicas |
|----------------------|--------------------|------------|
| M₀ | 1.4% | 5% |
| M₁ | 19.9% | 40% |
| M₂ | 30.5% | 37.5% |
| M₃ | 9.9% | 12.5% |
| M₄ | 9.9% | 2.5% |
| M₅ | 28.4% | 2,5% |



M₀ Sólo dos estudiantes de 1º de Universidad y 2 de 3er. curso de Físicas utilizan claramente la 2ª ley para resolver la cuestión. "Puede realizarse trabajo si, en las condiciones del sistema, el proceso puede ser espontáneo, es decir, si puede suponer un incremento positivo de la entropía del universo" (3º Fís) "El bloque de hielo tiene energía, lo que sucede es que en el polo norte la energía libre en el medio será idéntica a la del bloque de hielo por lo que no existirán diferencias de temperatura, ambos tienen la misma entropía". (1º Univ)

M₁- Hay un elevado porcentaje de estudiantes, especialmente de 3º, que utilizan la idea de necesidad del sistema de encontrar el equilibrio. Esta tendencia al equilibrio es la que hace posible, dicen, que el sistema pueda realizar trabajo. Un 40% de estudiantes de 3º y un 20% de 1º responden de este modo. *"El hielo tiene la misma energía en los dos casos pero en esta situación para extraer trabajo es necesaria una diferencia de temperaturas entre las dos fuentes de calor que consideremos"* (3º Fis) *"En el caso del hielo en el Sahara sí que se producirá trabajo debido a la diferencia de temperaturas entre el hielo y el ambiente, pero no en el caso del hielo en el polo norte porque no hay una diferencia de temperatura"* (1º Univ)

M₂ El tercer grupo de respuestas es el de los estudiantes que consideran que el bloque de hielo tiene energía que ha de extraerse para realizar trabajo y, para ello, debe haber un proceso tecnológico adecuado o han de darse ciertas condiciones ambientales: *"El bloque de hielo tiene cierta energía que sólo se podrá expresar en forma de trabajo en unas condiciones adecuadas"* (1º Univ) *"El trabajo que podamos extraer dependerá del proceso; el proceso que se puede realizar en el Sahara no puede darse en el polo norte pero esto no implica que el bloque de hielo no tenga energía"* (3º Fis)

M₃ Algunos estudiantes, en porcentaje similar en los dos cursos, no explican porque no puede realizarse trabajo, a pesar de hacer ciertas consideraciones sobre el hielo o sobre el sistema.

M₄ Respuestas sin sentido o disparatadas encontramos en cierto grupo de cada curso: *"...el trabajo sería la conversión de calor en trabajo, en el polo norte tal calor sería nulo y no se podría convertir en trabajo"* (3º Fís) *"El bloque de hielo tiene energía ya que al pasar de agua sólida a líquida se desprende energía. Es decir, ha habido un aumento del desorden y por tanto se ha creado energía"* (1º Univ).

M₅ El porcentaje de estudiantes que no responden a la cuestión es bastante elevado como suele ocurrir en este grupo.

Además de los aspectos codificados comentados hasta ahora, hay también algunos interesantes aspectos a resaltar en las respuestas a esta cuestión.

Muy pocos alumnos ponen en cuestión la definición "energía = capacidad de realizar trabajo": *"No podemos supeditar el concepto de energía a un método particular de extraerla. O sea que por el hecho de no ser capaces de extraer energía del bloque de hielo en el polo norte no podemos afirmar que no tenga energía"* (3º Fís)

El que el bloque de hielo tenga energía es argumentado siguiendo principalmente alguna de estas tres razones:

- a) "El bloque de hielo tiene energía ya que la materia es la materialización de la energía" es una de las líneas argumentales.
- b) "El bloque tiene energía porque todo tiene energía, por lo menos la que mantiene unidas sus moléculas"..
- c) "El bloque tiene energía porque en algunas condiciones es capaz de realizar trabajo"

El que el bloque de hielo no tenga energía viene argumentado principalmente por:

- a) La energía no puede asociarse a un objeto sino a una configuración.
- b) *"Dado que el origen de energías es arbitrario, el bloque de hielo tendrá o no energía según el origen elegido"*. (3º Fís)
- c) *El bloque no tiene energía pero puede realizarse trabajo porque hay una diferencia de temperaturas entre él y la arena* (3º Fís)
- d) *"El bloque no tiene energía porque es frío". "Para tener energía es necesaria una fuente de energía, y el hielo no tiene calor sino todo lo contrario"* (1º Univ)

Encontramos varias respuestas con cada uno de estos argumentos.

Otro aspecto a destacar es como algunos estudiantes utilizan términos sospechosos de una deficiente comprensión del principio de conservación. Todos ellos saben la frase: "la energía no puede crearse ni destruirse..." A pesar de ello, en varias de las respuestas aparece el término crear energía: *"El bloque de hielo, en sí, como sistema aislado no tiene energía. Puede crear energía dependiendo de su situación en su entorno..."* (3º Fís) *"El bloque de hielo tiene energía...es por lo que se ha creado energía"* (1º Univ)

5.13. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 1 (O-3B)

Enunciado de la cuestión:

Escribe dos frases que incluyan la palabra energía

Las respuestas que se analizan ahora corresponden a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas. Como hemos visto en el capítulo anterior, esta cuestión ha sido también formulada a los alumnos de Escuela Primaria.

Las respuestas se han codificado según los mismos criterios que para los alumnos de Escuela Primaria. Según hemos visto, la clasificación se realiza de acuerdo con las siguientes categorías:

Se asocia la energía a un concepto científico: **Sci**

Se asocia la energía a algo útil: **Us**

Otros/ Sin respuesta: **Oth**

Comparemos los resultados para cada frase en las dos muestras de estudiantes universitarios

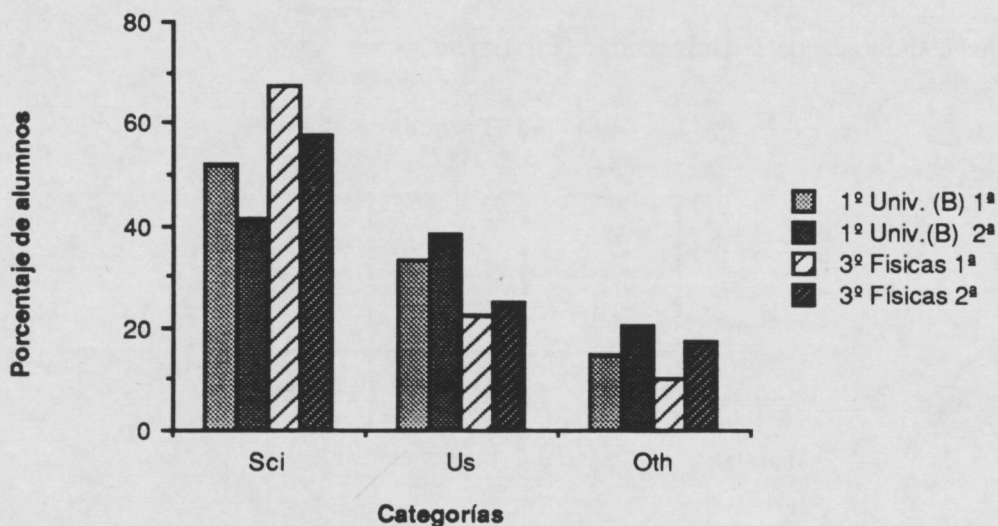
Para la 1ª frase:

| | 1º Univ.(Biol) | 3º Físicas |
|-------------|----------------|------------|
| Sci- | 51.8% | 67.5% |
| Us- | 33.3% | 22.5% |
| Oth- | 14.9% | 10% |

Para la segunda frase:

| | 1º Univ.(Biol) | 3º Físicas |
|-------------|----------------|------------|
| Sci- | 51.8% | 67.5% |
| Us- | 33.3% | 22.5% |
| Oth- | 14.9% | 10% |

Diagrama para cuestión 1 (Q-3B), frecuencias en %



Mayor número de estudiantes en 3º de Físicas que en 1º de universidad escriben frases en las que la energía se utiliza como un concepto científico. *"La energía se conserva"*, *"La energía cinética depende de la velocidad"*, etc son frases comunes que se han codificado como Sci.

Cerca de una tercera parte de estudiantes de 1º y una cuarta parte en 3º utilizan el término energía para designar algo útil: *"El frigorífico consume energía"*, *"una dinamo tiene suficiente energía para generar luz"*, etc son frases de la categoría Us.

Comparando las dos tablas anteriores, no observamos demasiadas diferencias entre los porcentajes correspondientes a las dos frases para cada categoría. ¿Es por casualidad? o ¿es debido a que algunos estudiantes escriben frases en un contexto científico mientras otros sólo se refieren a la utilidad de la energía? Para responder a tales preguntas podemos realizar las tablas de contingencia y así conocer cuantos estudiantes dan respuestas codificadas de la misma manera en las dos frases.

Para los estudiantes de 1ª Universidad (Biológicas)

Observed Frequency Table

| | Sci | Us | Oth | Totals: |
|---------|-----|----|-----|---------|
| Sci | 45 | 12 | 1 | 58 |
| Us | 21 | 31 | 2 | 54 |
| Oth | 7 | 4 | 18 | 29 |
| Totals: | 73 | 47 | 21 | 141 |

Expected Values

| | Sci | Us | Oth | Totals: |
|---------|-------|-------|------|---------|
| Sci | 30.03 | 19.33 | 8.64 | 58 |
| Us | 27.96 | 18 | 8.04 | 54 |
| Oth | 15.01 | 9.67 | 4.32 | 29 |
| Totals: | 73 | 47 | 21 | 141 |

Coded Chi-Square X₁: NI 1ª Y₁: NI 2ª

Summary Statistics

| | |
|--------------------------|--------------|
| DF: | 4 |
| Total Chi-Square: | 83.6 p=.0001 |
| G Statistic: | 70.4 |
| Contingency Coefficient: | .6 |
| Cramer's V: | .5 |

Mayor número de estudiantes de los que aleatoriamente esperaríamos, repiten categoría. Podemos constatar en la tabla de resultados que la correlación es significativa al nivel de 0.0001.

Para los estudiantes de 3º Físicas:

Observed Frequency Table

| | Sci | Us | Oth | Totals: |
|---------|-----|----|-----|---------|
| Sci | 20 | 2 | 1 | 23 |
| Us | 3 | 7 | 0 | 10 |
| Oth | 4 | 0 | 3 | 7 |
| Totals: | 27 | 9 | 4 | 40 |

Expected Values

| | Sci | Us | Oth | Totals: |
|---------|-------|------|-----|---------|
| Sci | 15.52 | 5.18 | 2.3 | 23 |
| Us | 6.75 | 2.25 | 1 | 10 |
| Oth | 4.72 | 1.58 | .7 | 7 |
| Totals: | 27 | 9 | 4 | 40 |

Coded Chi-Square $X_1: NI 1^2$ $Y_1: NI 2^2$

Summary Statistics

| | | |
|--------------------------|------|---------|
| DF: | 4 | |
| Total Chi-Square: | 26.3 | p=.0001 |
| G Statistic: | . | |
| Contingency Coefficient: | .6 | |
| Cramer's V: | .6 | |

En 3º de Físicas constatamos también que la mayoría de estudiantes escriben frases que pertenecen a la misma categoría.

Esto permite clasificar a los estudiantes en tres niveles:

Estudiantes **Sci-Sci**: Hay 45/141 en 1º y 20/40 en 3º. Se mueven sólo en el contexto científico

Estudiantes **Us-Us**: Hay 31/141 en 1º y 7/40 en 3º. Sólo se refieren a la utilidad de la energía

Estudiantes indefinidos o sin respuesta: **Sci-Us, Sci-Oth, Us-Oth, Oth-Oth**: Hay 65/141 en 1º y 13/40 en 3º

Estas proporciones son bien distintas de las que observábamos en los alumnos de Primaria.

Esto implica que los estudiantes son consistentes en el contexto en que utilizan el término energía. Supone pues, un salto cualitativo importante con respecto a los alumnos de Primaria. Estos últimos no mantienen su punto de vista y sus frases no muestran obedecer criterio alguno. En cambio, es más probable que las asociaciones con la energía que realizan los estudiantes de 1º Universidad y de 3º de Físicas pertenezcan a un solo contexto.

Podemos ver la evolución de los estudiantes en estos tres niveles:

| | <u>En Primaria</u> | <u>1º Univ (Biol)</u> | <u>3º Físicas</u> |
|---|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Sci-Sci | 19% | 32% | 50% |
| Us-Us | 47% | 22% | 17.5% |
| Sci-Us, Sci-Oth, Us-Oth, Oth-Oth | 34% | 46% | 32.5% |

(Hemos tomado los datos de los alumnos de Primaria del capítulo anterior)

A medida que va aumentando el nivel de formación hay mayor número de alumnos que emplean repetidamente el contexto científico. Por el contrario, el contexto utilitario de la energía se repite con menor frecuencia a medida que avanzan en el nivel de estudios.

Si construimos la tabla de contingencia entre los tres niveles de enseñanza y los porcentajes de repetición de categorías, obtenemos un valor de $\chi^2 = 32.5$ que, con 4 grados de libertad, equivale a que podamos afirmar la anterior relación con mas de un 99.99 % de confianza.

Podremos comparar este resultado con lo que ocurre acerca de otros conceptos como el de entropía, degradación de la energía, etc. La cuestión de la consistencia o inconsistencia es relevante a la hora de analizar como se forman o se aprenden los conceptos, como se construyen los modelos mentales, etc. Será tratada con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

Por el momento sólo se trata de destacar que ante un concepto -en este caso el de energía- del que se va mejorando la conceptualización en sucesivos niveles de enseñanza, la consistencia con la que los estudiantes se refieren a él cada vez es mayor. Cuanto más profundo es el aprendizaje de un concepto, mayor es la consistencia del significado que se le da en los diferentes momentos en que se emplea.

5.14. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 2 (O-3B)

Enunciado de la cuestión:

¿Podemos decir que los combustibles tienen energía? ¿Por qué?

Las respuestas que se analizan corresponden a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Como hemos visto en el capítulo anterior, una cuestión similar ha sido también formulada a los alumnos de Escuela Primaria. Allí se preguntaba: "El butano tiene energía?"

Si la cuestión pretende conocer cual es la conceptualización que de la energía se han formado los estudiantes de distintos niveles, lo más interesante no será su respuesta afirmativa o negativa, sino los argumentos que dan.

La mayor parte de estudiantes de ambos cursos responden afirmativamente. P_1 . Pero encontramos también, especialmente en 1º, algunas respuestas evasivas o negativas

| | 1º Univ.(Biol) | 3º Físicas |
|--------------------------|----------------|------------|
| Si. Tienen energía P_1 | 72.3% | 90% |
| No. No tienen P_2 | 19.1% | 2.5% |
| Indeciso P_3 | 3.5% | 5% |
| Sin respuesta P_4 | 5% | 2.5% |

P_2 - "Los combustibles no tienen energía pero pueden producirla" (1º Univ) es la línea de argumentación más frecuente para las respuestas negativas.

Las respuestas codificadas como "Indecisos" son similares pero los estudiantes no se atreven a pronunciarse explícitamente. "Un combustible en una reacción puede producir energía" (3º Fis)

Respuestas afirmativas iguales no implican la misma concepción de la energía. Los argumentos para justificarlas se han codificado como: P_{1j}

Los combustibles tienen energía porque:

| | | |
|----------------------------------|-------|-------|
| pueden realizar trabajo P_{11} | 29.8% | 47.5% |
| pueden producir cambios P_{12} | 5.7% | 7.5% |
| tienen energía interna | | |

| | | |
|---|-------|------|
| que se libera durante la combustión P ₁₃ | 20.5% | 25% |
| producen calor P ₁₄ | 9.2% | 2.5% |
| Respuestas vagas P ₁₅ | 7.1% | 7.5% |
| TOTAL | 72.3% | 90% |

P₁₁ - Cerca de la mitad de los estudiantes de 3er. curso argumentan su respuesta afirmativa diciendo "porque pueden realizar trabajo". y a pesar de no representar más que una tercera parte de las respuestas de 1º, P₁₁ también supone el porcentaje más elevado.

Como hemos visto en la cuestión 1 (Q-3A) ("Qué se entiende por energía?"), muchos estudiantes consideran que la energía es la capacidad para realizar trabajo. Entonces, si los estudiantes son coherentes en sus afirmaciones, muchos de ellos deben responder que los combustibles tienen energía porque pueden realizar trabajo.

Podemos elaborar la tabla de contingencia para comprobar cuán grande es la coherencia entre la respuesta a la cuestión 1-Q-3A y la dada en la presente cuestión. Los detalles se encuentran en el Anexo.

Para los estudiantes de 1º Universidad (Biológicas)

Observed Frequency Table

| | P11 | no P11 | Totals: |
|---------|-----|--------|---------|
| A1 | 24 | 41 | 65 |
| no A1 | 18 | 58 | 76 |
| Totals: | 42 | 99 | 141 |

Para los estudiantes de 3º de Físicas

Observed Frequency Table

| | P11 | no P11 | Totals: |
|---------|-----|--------|---------|
| A1 | 13 | 10 | 23 |
| no A1 | 6 | 11 | 17 |
| Totals: | 19 | 21 | 40 |

No podemos asegurar que haya correlación entre el argumento utilizado para justificar que los combustibles tienen energía porque pueden realizar trabajo y la definición de energía dada por cada uno. χ^2 es demasiado pequeña en ambos grupos. Con frecuencia, los estudiantes hacen razonamientos sobre el concepto de energía que no corresponden a la definición que han dado previamente.

P₁₂ El argumento "Los combustibles tienen energía porque pueden producir cambios (movimiento, poner en funcionamiento etc) es poco utilizado por ambos grupos de estudiantes, como muestra la tabla. Frases como "*Los combustibles tienen energía porque pueden poner algo en movimiento*" (1º Univ) se encontraban con frecuencia en los alumnos de Primaria.

P₁₃ Más popular es considerar que "los combustibles tienen energía (energía interna) porque la liberan durante la combustión"

Algunos nombran explícitamente la energía interna o la energía de los enlaces químicos: "*porque puede aprovecharse la energía de sus enlaces por medio de la combustión*" (3º Fis) o "*porque podemos aprovechar rentablemente su energía interna*"

Otros utilizan la conservación de la energía para apoyar su afirmación: "*porque podemos extraer energía del combustible, desde el momento que podemos extraer será porque tiene. De donde no hay no se puede sacar*" (3º Fis).

Cerca de 1/4 parte de los alumnos de ambos niveles responden de este modo.

P₁₄ Considerar que los combustibles tienen energía porque producen calor es una línea argumental menos frecuente de lo que a primera vista parecía que ocurriría. (9.2% en 1º y 2.5% en 3º)

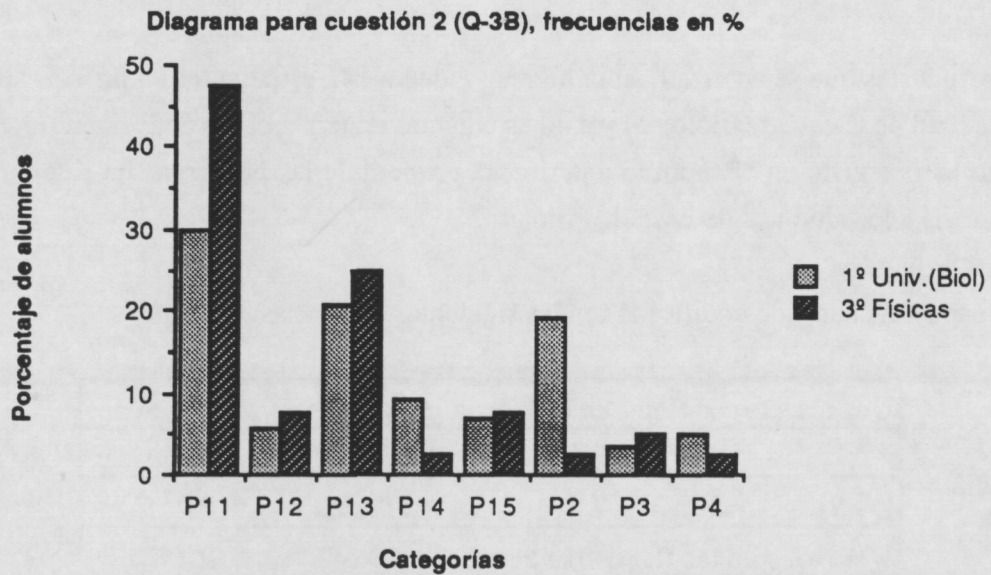
P₁₅ Como en muchas otras cuestiones, algunos alumnos dan respuestas tan ambiguas que es imposible clarificar lo que piensan.

La tabla total de respuestas para los dos grupos es:

| | 1º Univ (Biol) | 3º Físicas |
|--|----------------|------------|
| Sí P₁ | | |
| P₁₁ C. pueden realizar trabajo | 29.8% | 47.5% |
| P₁₂ C. producen cambios | 5.7% | 7.5% |
| P₁₃ C. tienen energía interna | 20.6% | 25% |
| P₁₄ C. producen calor | 9.2% | 2.5% |
| P₁₅ Explicación ambigua | 7.1% | 7.5% |

| | | |
|-------------------------------|-------|------|
| No. No tienen. P ₂ | 19.1% | 2.5% |
| Indecisos P ₃ | 3.5% | 5 % |
| Sin respuesta P ₄ | 5 % | 2.5% |

El diagrama correspondiente:



5.15. Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 3 (O-3B)

Enunciado de la cuestión:

Una maceta con flores en un balcón ¿tiene energía? ¿Y una maceta sin flores? ¿por qué?

Las respuestas que se analizan ahora corresponden a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Como hemos visto en el capítulo anterior, la primera de las preguntas ha sido también formulada a los alumnos de Escuela Primaria.

Las respuestas han sido codificadas en las siguientes categorías:

| Una maceta con flores en un balcón ¿tiene energía? | | |
|--|-----------------|------------|
| | 1º Univ. (Biol) | 3º Físicas |
| Q ₁ Si | 77.3% | 97.5% |
| Q ₂₁ No, sólo las flores o la tierra | 13.5% | 2.5% |
| Q ₂₂ En ningún caso | 2.8% | 0% |
| Q ₃ Sin respuesta | 6.4% | 0% |

Q₁- La gran mayoría de estudiantes de estos dos niveles universitarios consideran que la maceta, con flores o sin ellas tiene energía. Era de preveer.

Q₂₁- Pero encontramos en todos los grupos de estudiantes, una respuesta que era ya muy frecuente en los alumnos de Primaria: la maceta tiene energía por las flores que contiene, sin flores no tendría. Es decir, la energía potencial gravitatoria que podemos asociar a la maceta con respecto al suelo de la calle (o al nivel cero que tomemos) pasa desapercibida para ellos. La energía proviene de las flores o del tierra. Esta era la respuesta para un 59% de los alumnos de Primaria. Aquí la encontramos en porcentajes muy inferiores pero, dado el nivel de formación, aún sorprendentes. *"Con flores tiene energía, sin flores no. Esto es debido a que para poder hacer la fotosíntesis necesitan energía que toman del sol"* (1º Univ). La energía procedente del sol y la energía química de la tierra de la maceta son los argumentos utilizados en estos casos. *"Un tiesto con flores tiene energía y sin flores también. El primero por la energía de las flores que proviene del sol, el segundo por la energía que la tierra desprende al exterior"* (1º Univ) En los alumnos de Primaria veíamos que utilizaban argumentos utilitaristas para negar la posibilidad de asociar energía a la maceta con flores. Decían por ejemplo: *"No tiene*

energía porque no nos da nada". Este tipo de argumento lo encontramos en un alumno de 3º de Físicas: *"La maceta con flores si; sin flores no. Esto es porque las flores pueden producir trabajo, en cambio una maceta sin flores no puede hacer nada por sí sola"*. Es curioso constatar como hay una serie de argumentos que aparecen en todos los niveles, aunque vayan disminuyendo los más erróneos a medida que se avanza en la formación.

Q22- La posibilidad o no de realizar trabajo es un argumento para negar que pueda asociarse energía a la maceta, con flores o sin ellas. *"Ninguna de las dos tiene energía porque ninguna puede realizar trabajo"* (1º Univ). A pesar de no ser una respuesta frecuente en los alumnos universitarios sigue existiendo, al igual que observábamos en los alumnos de Primaria. Sin la referencia de lo que ocurría en este último nivel quizás habríamos podido interpretar que la cuestión no se entendía.

Q3- Un pequeño grupo de alumnos de 1º y ninguno de 3º dejan la cuestión sin respuesta.

Si bien el número de respuestas afirmativas Q₁ es elevado, las maneras de justificarlas nos permiten observar grandes diferencias entre ellos. Veámoslas.

Q11- El argumento más frecuente es el referido a la energía potencial gravitatoria. Encontramos similares porcentajes en los dos grupos, aproximadamente los 2/3 de cada muestra.

"Tanto el tiesto con flores como el tiesto sin flores tienen una energía potencial debido a que están situados a una cierta altura del suelo" (1º Univ)

Q12- Algunos estudiantes piensan en la energía potencial gravitatoria y también en la energía debida a la fotosíntesis. *"Los dos tienen energía potencial pero además el tiesto con flores tiene una energía que le viene suministrada por las flores, es la energía fotosintética"* (1º Univ). El pensar en la energía debida a la fotosíntesis es más frecuente en los alumnos de 1º, quizás porque son más sensibles a este fenómeno al prepararse para una licenciatura en Ciencias Biológicas. Sólo un estudiante de 3º de Físicas considera esta energía proporcionada por el sol.

Q13- Los dos grupos anteriores respondían a la cuestión diciendo qué clase de energía tenían las macetas con o sin flores. Nombraban una forma de energía, una energía asociada a una definición, pero no daban argumentos que permitieran conocer su concepción de la energía. ¿Por qué podemos asignar energía a un cuerpo situado a cierta

altura? Los estudiantes del grupo Q13 explican el porque creen que tienen energía las macetas en el balcón: tienen energía porque pueden realizar trabajo si caen libremente.

"Cualquier objeto en un campo gravitatorio tiene energía. Si la maceta cae desde el balcón es capaz de realizar un trabajo al llegar al suelo, hundir un clavo, por ejemplo". (3º Fís)

Un 20% de estudiantes de 3º da estos argumentos y en cambio ninguno en 1º. Como hemos visto, empleaban algunos estudiantes de 1º argumentos similares para dar una respuesta negativa.

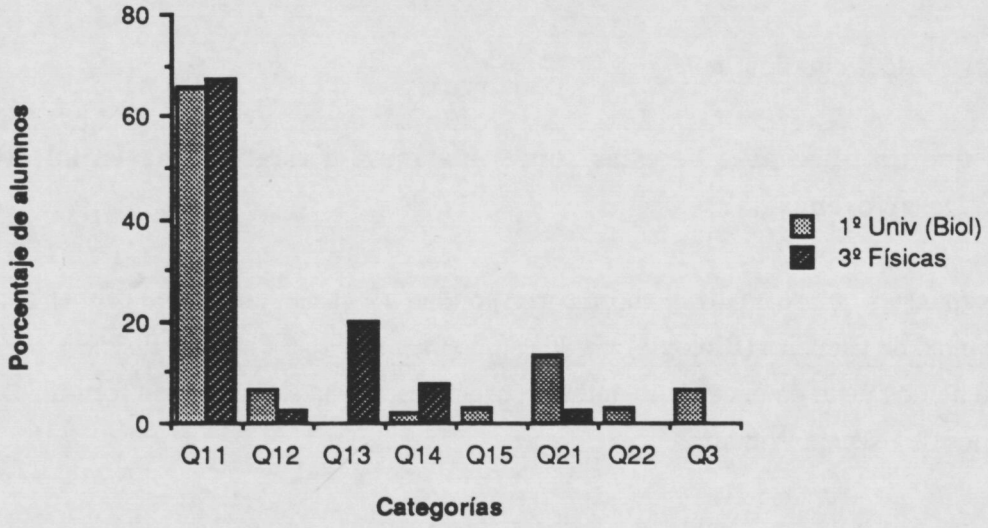
Q14- Un pequeño grupo que se repite en varias cuestiones responde positivamente a la pregunta pero su argumento es que todos los objetos tienen energía. *"Todo tiene energía interna"* (1º Univ) o *"una maceta tiene energía con flores, sin ellas o no importa como. Todos los cuerpos tienen energía"* (3º Fís)

Q15- Unas respuestas aquí poco numerosas, pero que hemos visto aparecían con frecuencia en los alumnos de Primaria, son las que corresponden al llamado punto de vista antropocéntrico. *"Las macetas tienen energía porque alguien las ha colocado en el balcón y, para ello es necesario energía"*. Ningún alumno de 3º se refiere a la necesidad de este agente externo para asociar energía a la maceta.

Resumiendo todas las categorías, podemos establecer la tabla y el diagrama para comparar las respuestas de los alumnos de los dos niveles considerados.

| Una maceta con flores en un balcón ¿tiene energía? | | |
|--|-------------------|------------|
| | 1º Univers.(Biol) | 3º Físicas |
| Q₁ Si | | |
| Q ₁₁ Ep gravitatoria | 66% | 67.5% |
| Q ₁₂ Ep + E. fotosíntesis | 6.4% | 2.5% |
| Q ₁₃ porque puede realizar W | 0% | 20% |
| Q ₁₄ . Todo tiene energía | 2.1% | 7.5% |
| Q ₁₅ Alguien ha proporcionado E. | 2.8% | 0% |
| Q₂ No, sólo las flores o la tierra | | |
| Q ₂₁ No, sólo las flores o la tierra | 13.5% | 2.5% |
| Q ₂₂ En ningún caso | 2.8% | 0% |
| Q₃ Sin respuesta | | |
| Q ₃ Sin respuesta | 6.4% | 0% |

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



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

Enunciado de la cuestión:

Para que un libro pase de estar sobre una mesa a estar arriba en un estante ¿es necesario energía?

Las respuestas que se analizan ahora corresponden a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Como hemos visto en el capítulo anterior, esta cuestión ha sido también formulada a los alumnos de Escuela Primaria.

Las respuestas han sido codificadas del siguiente modo:

Es necesario energía?

R₁- Sí, es necesario energía

-para que pueda moverse: **R₁₁**

-porque es necesario realizar un W: **R₁₂**

-para aumentar su Ep: **R₁₃**

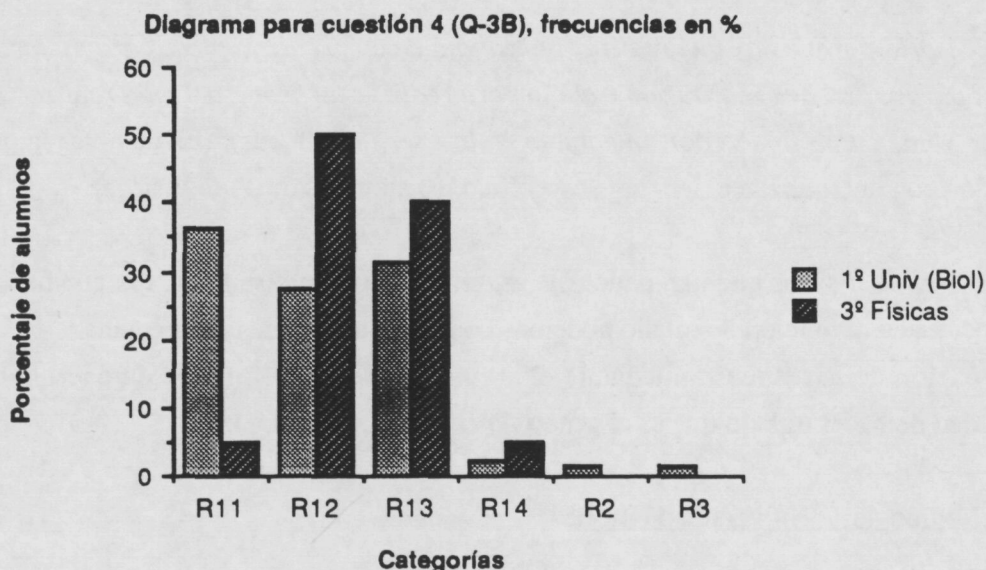
-sin explicación / otros: **R₁₄**

R₂- No. No lo es

R₃- Sin respuesta

Podemos comparar los resultados obtenidos por ambos grupos de estudiantes:

| | 1º Universidad (Biol) | 3º Físicas |
|-----------------------|-----------------------|------------|
| R₁ | 97.2% | 100% |
| R₁₁ | 36.2% | 5% |
| R₁₂ | 27.7% | 50% |
| R₁₃ | 31.2% | 40% |
| R₁₄ | 2.1% | 5% |
| R₂ | 1.4% | 0% |
| R₃ | 1.4% | 0% |



Todos los estudiantes de 3º de Físicas responden afirmativamente a la cuestión y casi todos los de 1º Univ. también. Las únicas respuestas negativas corresponden a los que consideran que es necesario un trabajo pero no energía. "No, es necesario un trabajo pero no energía" dice un alumno de 1º.

Hemos observado que al formular esta cuestión a los alumnos de Primaria, con frecuencia respondían afirmativamente pensando en el movimiento del libro. Sabemos que los niños asocian con frecuencia energía y movimiento. Podremos constatar como cambia este punto de vista en los alumnos con formación en Física.

Entre las respuestas afirmativas podemos observar diferencias interesantes:

R11- Para este grupo, para levantar el libro es necesario energía debido al movimiento que implica. Consideran que sin energía no hay movimiento. "Para realizar cualquier movimiento se necesita energía" (1º Univ)"se necesita energía porque por sí solo no subirá". (3º Fís)

Son respuestas comparables a las que encontramos en Primaria. Allí leíamos: "Se necesita energía porque el libro no puede moverse por sí solo"

Casi una tercera parte (32.6%) de los estudiantes de 1º dan este argumento mientras sólo un 5% lo hace en 3º de Físicas. Representa un claro progreso.

R12- Hemos visto en la cuestión 1 (Q-3A) que muchos estudiantes definían la energía como la capacidad para realizar trabajo. Es de esperar que muchos alumnos justifiquen su respuesta diciendo que se necesita energía porque es necesario realizar un trabajo. Así es: la mitad de los alumnos de 1º y aproximadamente un tercio de los de 1º Univ. dan este argumento.

"Es necesario porque hay que realizar un trabajo en contra de la fuerza gravitatoria"(1º Univ) *"porque hay que realizar un trabajo para realizar tal proceso y toda realización de trabajo viene cuantificada por un cambio en la energía"* (3º Fís). (Es de notar la mayor precisión con que utilizan el lenguaje específico los alumnos de 3º de Físicas)

Cabe comprobar si los que han dado este argumento son precisamente los que han dado la mencionada definición. Para ello podemos construir la tabla de contingencia: Justificación de la respuesta mediante el argumento R₁₂ - definición de energía como capacidad de hacer trabajo que es el grupo A₁ (ver cuestión 1-Q-3A).

Para el grupo de 1º Universidad (Biol):

Observed Frequency Table

| | R12 | no R12 | Totals: |
|---------|-----|--------|---------|
| A1 | 25 | 40 | 65 |
| no A1 | 14 | 62 | 76 |
| Totals: | 39 | 102 | 141 |

Los detalles pueden encontrarse en el Anexo. El valor de χ^2 es insuficiente para decir que hay mayor probabilidad de dar tal definición de energía y justificar la respuesta a esta pregunta (4 de Q-3B) mediante R₁₂.

Para el grupo de 3º de Físicas:

Observed Frequency Table

| | R12 | no R12 | Totals: |
|---------|-----|--------|---------|
| A1 | 13 | 11 | 24 |
| no A1 | 7 | 9 | 16 |
| Totals: | 20 | 20 | 40 |

También para este grupo de estudiantes, el valor de χ^2 es demasiado pequeño para poder decir que los que han dado tal definición de energía la utilizarán con gran probabilidad para argumentar la respuesta a esta cuestión 4 (Q-3B).

No observamos pues, que exista coherencia entre dar una definición de un concepto y utilizarla para dar argumentos sobre tal concepto. ¿Es una casualidad para esta cuestión o es frecuente la incoherencia entre definiciones y una conceptualizaciones de lo definido? Nuevas cuestiones nos permitirán tener más datos.

R₁₃- La idea de aumento de energía potencial es nombrada por algunos estudiantes. *"Al pasar a un nivel más alto hace falta más energía, ya que aumenta la altura (E. potencial)"* (1^º Univ) *"porque la energía potencial del libro en la estantería (más alta que la mesa) es mayor que cuando estaba sobre la mesa"* (3^º Fís)

Aproximadamente, otra tercera parte de los estudiantes de 1^º justifica de este modo su respuesta y un 40% lo hace en 3^º Físicas.

En otro orden de cosas cabe señalar que una de las ideas encontradas con frecuencia en los alumnos de Primaria aparece también aquí. Se trata de la necesidad de razonar teniendo en cuenta quien es el autor material responsable de los cambios de energía. Es lo que hemos denominado necesidad de un agente externo. Los estudiantes de Primaria para responder a esta cuestión se referían con mucha frecuencia al esfuerzo humano que era necesario para levantar el libro.

Este aspecto se ha analizado también en los dos grupos de estudiantes universitarios. Se ha constatado que en un 25.5% de los alumnos de 1^º y en un 25% de los de 3^º se recurre a ello. *"Es necesario tener alguna energía (músculo del brazo) capaz de hacer un trabajo"* (3^º Fis) *"Se necesitará una energía que gastará nuestro brazo para coger el libro y ponerlo en el estante"* (1^º Univ).

Frases de signo totalmente opuesto, en los que sólo se tienen en cuenta los cambios de energía sin buscar un responsable, son, por ejemplo: *"porque el gradiente de energía potencial no es constante con la altura, es una función proporcional a la altura"* *"Puede ser necesario o más bien comportar un incremento de energía del libro. Este incremento puede ser positivo o negativo según que el proceso sea o no espontáneo"*. La necesidad de un agente externo ha desaparecido totalmente.

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

Enunciado de la cuestión:

Una bala que sale disparada de una pistola ¿tiene energía? ¿Por qué?

De nuevo, una cuestión que ya ha sido formulada a los alumnos de Primaria y que nos permitirá comprobar el progreso al pasar a estos niveles universitarios.

Las respuestas que se analizan ahora corresponden a 141 estudiantes en primer curso en la Facultad de Ciencias (Biología) y a 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Han sido codificada en las siguientes categorías:

S₁- Si, la bala tiene energía

Debido a la fuerza o impulso dado por la pistola: **S₁₁**

Energía cinética. Energía debido a su movimiento: **S₁₂**

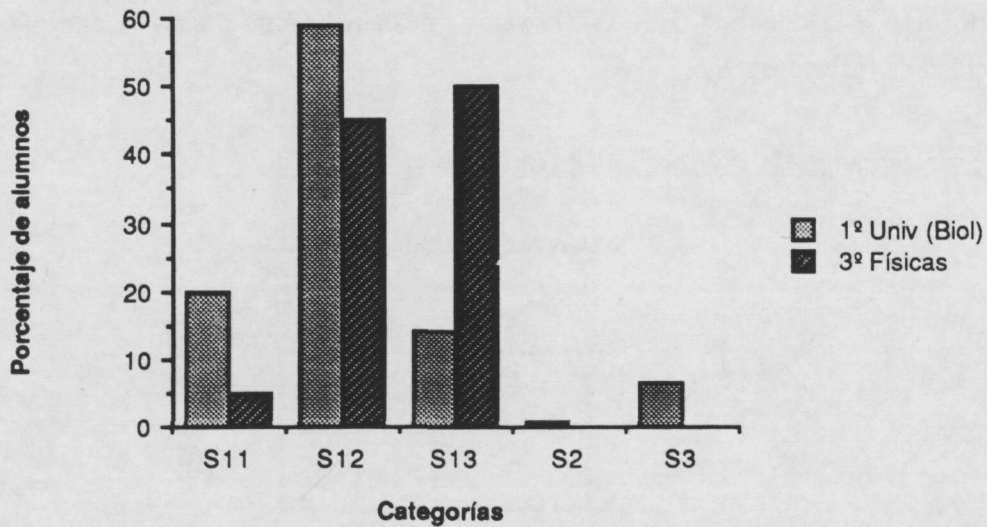
Porque es capaz de realizar trabajo o provocar cambios: **S₁₃**

S₂- Respuesta ambigua

S₃- Sin respuesta

| | 1º Univers (Biol) | 3º Físicas |
|-----------------------|-------------------|------------|
| S₁ | 93% | 100% |
| S₁₁ | 19.9% | 5% |
| S₁₂ | 58.9% | 45% |
| S₁₃ | 14.2% | 50% |
| S₂ | 0.7% | 0% |
| S₃ | 6.3% | 0% |

Diagrama para cuestión 5 (Q-3B), frecuencias en %



S₁₁- Algunos estudiantes se refieren al impulso o a la fuerza que la pistola ha dado a la bala como la causa de que ésta tenga energía. Este tipo de razonamiento aparecía aún con mayor frecuencia en los alumnos de Primaria. *"porque la pistola le da un impulso que le hace coger una velocidad que le da la fuerza necesaria para vencer la fuerza de rozamiento del aire y en esto se gasta energía"* (1º Univ) *"Hay algo que le ha dado suficiente energía a la bala para que pueda salir"* (3º Fís)

S₁₂- Muchos de los estudiantes de los dos grupos ahora considerados justifican su respuesta por el movimiento de la bala. El concepto de energía cinética encaja bien con la idea más primitiva que asocia energía con movimiento.

Frases como *"La bala tiene energía cinética por el hecho de tener una velocidad"* están presentes en más de la mitad de los alumnos de 1º Univ. y en casi la mitad de los de 3º de Físicas.

S₁₃- Otro grupo numeroso de estudiantes justifica su respuesta considerando que la bala puede realizar trabajo debido a su energía cinética.

"Tiene una capacidad para desarrollar trabajo: se le asocia una energía de movimiento o cinética" (3º Fis) *"Tiene una energía que le permitirá perforar un objeto, realizar un trabajo aunque sea para romperlo"* (1º Univ)

Esta es la respuesta más frecuente en los alumnos de 3º

Sería de interés comprobar cuantos de los alumnos que dan este tipo de explicación habían definido la energía como capacidad para realizar trabajo o provocar cambios.

Podemos elaborar la tabla de contingencia siguiente entre los que han dado/ o no esta justificación a la cuestión 5 de Q-3B y los que han definido/o no la energía como capacidad de realizar trabajo.

Para los estudiantes de 1º Universidad (Biológicas)

Observed Frequency Table

| | S13 | no S13 | Totals: |
|---------|-----|--------|---------|
| A1 | 11 | 54 | 65 |
| no A1 | 9 | 67 | 76 |
| Totals: | 20 | 121 | 141 |

El valor de χ^2 es muy pequeño para poder decir que hay relación entre dar tal argumento y dar tal definición. (Para detalles de las tablas ver Anexo)

Para los estudiantes de 3º de Físicas:

Observed Frequency Table

| | S13 | no S13 | Totals: |
|---------|-----|--------|---------|
| A1 | 13 | 11 | 24 |
| no A1 | 7 | 9 | 16 |
| Totals: | 20 | 20 | 40 |

Calculado el valor de χ^2 se observa que es insuficiente (para 1 grado de libertad) para que haya una relación significativa entre las variables

Seguimos pues observando que los términos utilizados por un estudiante en la definición de un concepto no son relevantes para conocer cual es la conceptualización que de él se ha formado. Una correcta definición no parece implicar una correcta conceptualización.

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

Enunciado de la cuestión:

¿Si la energía se conserva, por qué se habla con frecuencia de la crisis de la energía?

La 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 han sido codificadas de acuerdo con:

T₁- Enfoque no científico

No hay relación entre conservación de la energía y crisis energética: **T₁₁**

Debido a que los recursos energéticos se están agotando: **T₁₂**

Debido a que parte de la energía se pierde, no se conserva: **T₁₃**

T₂- Enfoque científico

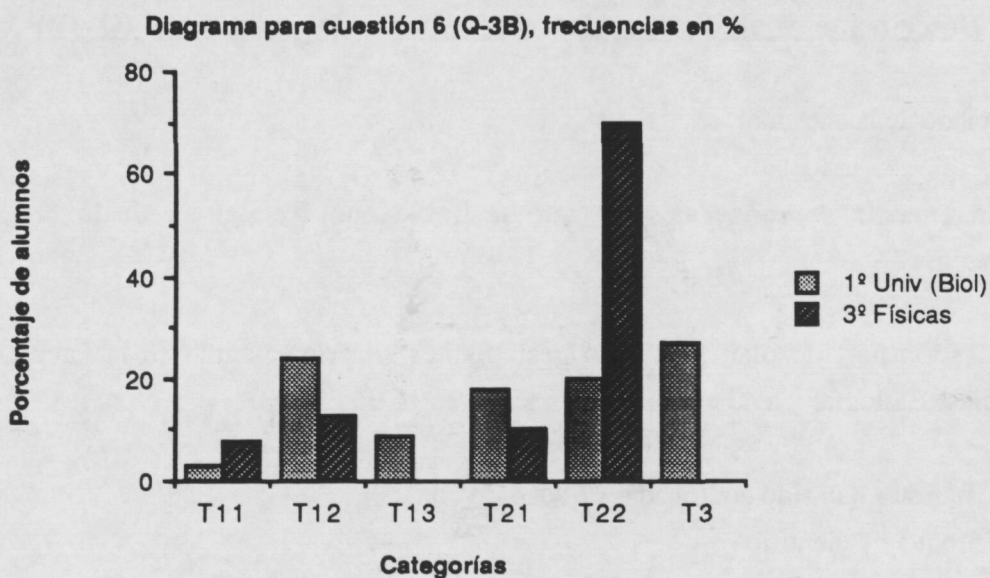
Se ignora la 2ª ley: "Aún no sabemos como aprovechar bien la energía": **T₂₁**

Se utiliza la 2ª ley. Degradación de la energía: **T₂₂**

T₃- Sin respuesta

Podemos ver la tabla comparativa de las distintas respuestas de los estudiantes de los dos niveles.

| | 1º Univer. (Biol) | 3º Físicas |
|-----------------------|-------------------|------------|
| T₁ | | |
| T₁₁ | 2.8% | 7.5% |
| T₁₂ | 24.1% | 12.5% |
| T₁₃ | 8.5% | 0% |
| T₂ | | |
| T₂₁ | 17.7% | 15% |
| T₂₂ | 19.9% | 65% |
| T₃ | 27% | 0% |



La primera clasificación T_2 y T_1 nos permite distinguir entre los alumnos que comprenden el problema planteado y los que están lejos de ello, respectivamente.

T₁₁- Hay algunos alumnos que no vislumbran el problema. No consideran que haya relación entre hablar de crisis energética y de conservación de la energía. *"No tiene nada que ver una idea con la otra. La crisis de la energía vendrá producida por la falta de recursos energéticos, por la política económica de un país..."* (3º Fís)

T₁₂- Un grupo bastante numeroso de estudiantes de 1º tampoco ve el problema porque para ellos la crisis energética es sólo un problema de que los recursos energéticos se están terminando y es difícil conseguirlos. No retienen la idea de que la energía se conserva. Un 24.1% de 1º Univ. y un 12.5% de 3º Fís. dan esta respuesta

T₁₃- Hay un pequeño grupo de estudiantes de 1º que consideran que la crisis de la energía es debida a la pérdida de energía, a su no conservación. Responden por ejemplo: *"porque al ser transformada se pierde parte de esta energía"*, *"porque la energía ya se ha transformado en trabajo"*. En esta última frase aparece una idea que ya hemos encontrado en otras ocasiones: el trabajo es una forma de energía que consume energía. No hay ningún estudiante de 3º Físicas que dé este tipo de respuestas.

Los tres grupos anteriores representan un 35.4% de 1º Univ y un 20% de 3º Fís. A pesar de estos porcentajes relativamente elevados, la mayoría de estudiantes de los dos niveles comprende el problema: ¿Cómo podemos decir que la energía se conserva y a la vez decir que hay crisis de energía?. Forman el grupo T_2 .

Algunos conocen la explicación científica (grupo T₂₂), otros desconocen o no son capaces de aplicar la 2ª ley y consideran que la crisis energética puede ser resuelta cuando la técnica mejore, cuando sepamos utilizar mejor la energía (grupo T₂₁).

T₂₁- En este último grupo podemos encontrar frases como: *"Hay energías que aún no se ha encontrado la manera de volver a utilizarlas"* (1º Univ) *"Muchas veces la conservación es en formas no aprovechables mediante los dispositivos mecánicos actuales"* (3º Fís)
Encontramos porcentajes similares en los dos cursos de la muestra (15% en 3º y 17.7% en 1º)

T₂₂- La respuesta más popular en 3º Físicas (aunque sólo es de un 65%) es la que relaciona la crisis energética y la conservación de la energía con la degradación de la energía y la 2ª ley.

Así encontramos respuestas como: *"Porque la energía se transforma y se pierde en forma de calor, que por el Th. Kelvin no podemos volver a utilizarla toda para hacer trabajo"* (3º Fís) o *" La forma de energía que nosotros podemos utilizar se pierde transformándose en otros tipos de energía inutilizable para nosotros"* (1º Univ)

No son muchos los estudiantes de 1º Univers. cuyas respuestas pueden codificarse en esta categoría; no es de extrañar, ya que su conocimiento de la 2ª ley hemos ido constatando que es muy parco.

T₃- Lo anterior se manifiesta también porque más de una cuarta parte (27%) de estudiantes de 1º no responden a la cuestión mientras que todos los de 3º Físicas lo hacen.

5.19. Descripción y análisis de las respuestas al apartado a) de la cuestión 7 (O-3B)

Enunciado de la cuestión:

Decimos que al caer una piedra desde cierta altura, la energía potencial gravitatoria se va convirtiendo en energía cinética.

a) ¿Al llegar al suelo, la energía se conserva?

b) Si así fuera, ¿por qué no puede utilizar esta energía para vencer la gravedad y volver a subir por sí sola?

Las respuestas han sido codificadas de forma distinta para el apartado a) y el apartado b). En el apartado a) se pretendía conocer la concepción que se habían formado de la conservación de la energía: U_i . En el b) su forma de razonar ante un proceso irreversible U'_i .

Del primer apartado pasamos a describir los resultados obtenidos por 141 estudiantes en 1er. curso en la Facultad de Ciencias (Biología), 100 estudiantes en 1er. curso en la Facultad de Ciencias (Físicas) y 40 estudiantes en tercer curso de Físicas.

Las respuestas sobre si la energía se conserva, se han clasificado como:

Sí: U_1 A su vez, U_1 se ha subclasificado: $\left\{ \begin{array}{l} U_{11} \\ U_{12} \\ U_{21} \end{array} \right.$

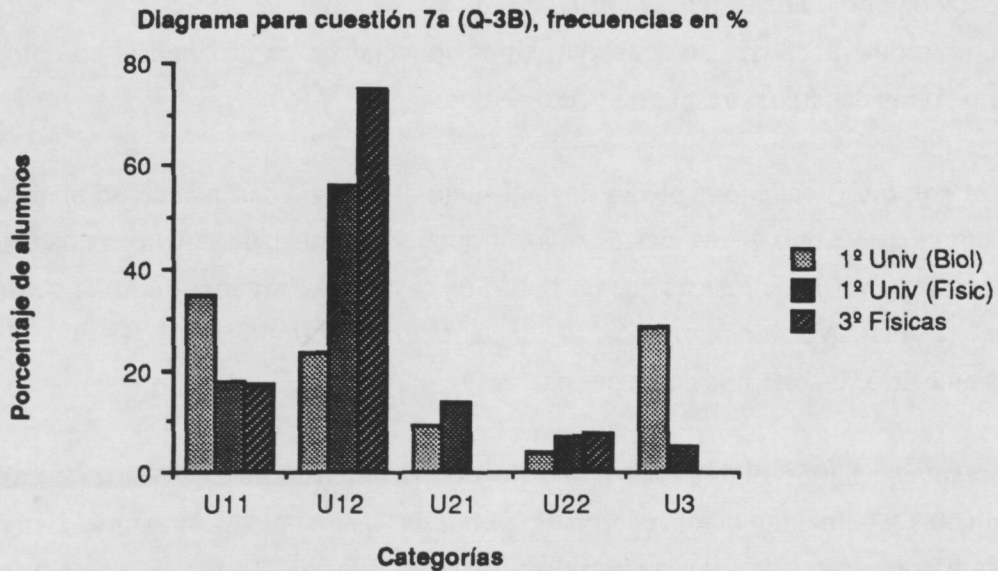
No: U_2 A su vez, U_2 se ha subclasificado: $\left\{ \begin{array}{l} U_{21} \\ U_{22} \end{array} \right.$

Sin respuesta: U_3

La comparación entre los tres grupos nos permite escribir la siguiente tabla:

| | 1º Biológicas | 1º Físicas | 3º Físicas |
|---|---------------|------------|------------|
| U_{11} Energía pasa a ser E_k : | 34.8% | 18% | 17.5% |
| U_{12} :E se ha disipado en el suelo: | 23.4% | 56% | 75% |
| U_{21} E. se ha perdido | 9.2% | 14% | 0% |
| U_{22} E no se conserva en la piedra sino en el sistema | 4.3% | | 7% |
| | 7.5% | | |
| U_3 Sin respuesta/ Ambigua | 28.4% | 5% | 0% |

El diagrama de barras correspondiente:



U₁₁ Es el grupo que considera que la piedra cuando ha llegado al suelo tiene energía cinética. Encontramos un 34.8% de estudiantes de 1º Universidad (Biológicas) que desciende a un 18% en 1º Universidad (Físicas) y un 17.5% en 3º Físicas. Este grupo no se da cuenta que la energía potencial gravitatoria inicial está asignada al sistema piedra-Tierra. Responden como autómatas: la energía potencial se ha transformado en cinética. Así por ejemplo: *"La energía se conserva siempre. En este caso, inicialmente la energía cinética es cero: $E_{c1} = 0$ y la energía potencial es $E_{p1} = mgh$ (h =altura). En el estado final $E_{p2} = 0$ y la energía cinética es $E_{c2} = 1/2 mv^2$ (m = masa, v = velocidad,) $mgh = 1/2 mv^2$ "* (3º Fís). Son muchos los estudiantes de 1er. curso que dicen simplemente: *"Antes de caer tenía toda la energía en forma potencial y al caer toda la energía se ha transformado en energía cinética"* (1º Univ. Biol)

U₁₂ Es el grupo de estudiantes que consideran que la energía se ha transformado en "energía térmica" o en energía interna del suelo en que ha caído la piedra. Como podemos observar en la tabla, ésta es la respuesta más frecuente de los estudiantes de 3º Físicas (75%) y de 1º de Físicas. *"La energía total se conserva, es decir, si a cierta altura teníamos E_{p1} y E_{c1} , cuando caiga al suelo tendremos E_{p2} , E_{c2} y calor que se pierde calentando el suelo. Entonces $E_{p1} + E_{c1} = E_{p2} + E_{c2} + \text{Energía disipada al fregar con el suelo}$ ".*

Los dos grupos anteriores U_{11} y U_{12} responden que la energía se conserva a pesar de que dan distintas razones. Decir que no se conserva seguramente suena mal después de haber oído tantas veces que la energía se conserva. Los estudiantes de estos dos grupos han optado por dar una respuesta afirmativa.

Pero, no todos dicen que se conserva: Unos apoyándose en un análisis completo del sistema, otros dando una respuesta poco madura.

Para el grupo U_{21} cuando la piedra llega al suelo, la energía desaparece, se pierde. Sólo encontramos este tipo de respuestas en los grupos de alumnos de 1º Universidad, siendo más frecuente en 1º de Físicas que en 1º Biológicas. *"No. Esta energía la ha perdido al bajar"* (1º Fís). *"No se conserva, al llegar al suelo $E_p = 0$ y $E_c = 0$ "* (1º Fís). Ningún estudiante de 3º da este tipo de respuestas.

Las respuestas más elaboradas han sido codificadas como: U_{22} . En este caso los estudiantes argumentan que la energía no se conserva en la piedra sino en el sistema ya que la piedra no puede tomarse como un sistema aislado. *"La piedra no conserva su energía aunque esta energía no se pierde, se transforma quizás en calor"* dice un estudiante de 1er. curso (Biol). Podemos comparar el uso más preciso del lenguaje en los alumnos de 3er. curso: *"Evidentemente la piedra no conserva su energía. Pero la energía total, sí. La energía que tenía la piedra pasa al medio ambiente bien en forma de calor, bien en forma de energía cinética en otros objetos (piedras más pequeñas, polvo etc)"*

En estos casos la piedra se toma como sistema abierto y en éstos la energía no tiene porque conservarse.

Una respuesta curiosa de un estudiante de 3º de Físicas parece permitirnos conocer la clave de que se den tales diferentes tipos de respuestas. Dice: *"No se conserva en el sentido que se le da en el principio de conservación pero se conserva si se tiene en cuenta que se ha producido una deformación en el suelo y por tanto una variación de energía interna y además se ha emitido energía en forma de calor"*. ¿Qué es lo que cree que dice el principio de conservación? Supongo que es $E_{c1} + E_{p1} = E_{c2} + E_{p2}$ como muchos libros explican. Pero esta expresión es válida para sistemas con una sola partícula pero no para sistemas con un número incontable de partículas.

Podemos agrupar las respuestas más correctas y las menos. Esto nos permite comparar mejor los grupos y su progreso.

Los estudiantes de U_{11} no disponen de mucha información acerca del proceso y como han aprendido que en el suelo (si se toma como nivel cero) $E_p = 0$ y que la energía se conserva, la energía tiene que ser cinética.

El grupo U_{12} al darse cuenta que en el suelo $v = 0$ y puesto que $E_p = 0$, dicen que la energía tiene que haberse perdido.

Entre los otros dos grupos U_{22} y U_{12} , la diferencia está en que unos tienen claro que la piedra no puede tomarse como un sistema aislado en el que la energía se conserve y otros no lo toman en consideración.

Por tanto las respuestas más correctas son U_{22} y U_{12} ; las más incorrectas U_{12} y U_{21} . Si agrupamos en sólo dos categorías tenemos:

| | 1º Biológicas | 1º Físicas | 3º Físicas |
|--|---------------|------------|------------|
| Respuesta correcta ($U_{22} + U_{12}$) | 29% | 63% | 82.5% |
| Respuesta incorrecta ($U_{11} + U_{21}$) | 42.6% | 32% | 17.5% |
| Sin respuesta/Ambigua U_3 | 28.4% | 5% | 0% |

Como podíamos esperar, los estudiantes de 3º de Físicas responden mejor que los de los otros grupos. También los estudiantes de 1º de Físicas dan mejores respuestas que los de 1º de Biológicas aunque la mayor diferencia no está en los aciertos o errores sino en el porcentaje de alumnos que responden a la cuestión.

5.20. Descripción y análisis de las respuestas al apartado b) de la cuestión 7 (O-3B)

El enunciado de este apartado:

b) Si así fuera, porque no puede utilizar esta energía para vencer la gravedad y volver a subir por sí sola?

Este apartado de la cuestión pretende aportar datos para conocer como se conceptualiza la 2ª ley de la Termodinámica. Si en el primer apartado se hacía referencia al principio de conservación de la energía y puesto que, según éste, todos los procesos podrían ser reversibles es de interés ver como se interpreta la irreversibilidad. Las respuestas de los estudiantes permiten saber de su conocimiento de la 2ª ley pero a la vez de su idea de la gravitación.

Las respuestas analizadas corresponden a tres grupos de estudiantes: 141 de 1ª Universidad (Biológicas), 100 de 1ª Universidad (Físicas) y 40 de 3ª de Físicas.

Las respuestas han sido codificadas de acuerdo con la explicación que da cada estudiante de la imposibilidad (o la gran improbabilidad) de que la piedra vuelva a subir hasta su altura inicial.

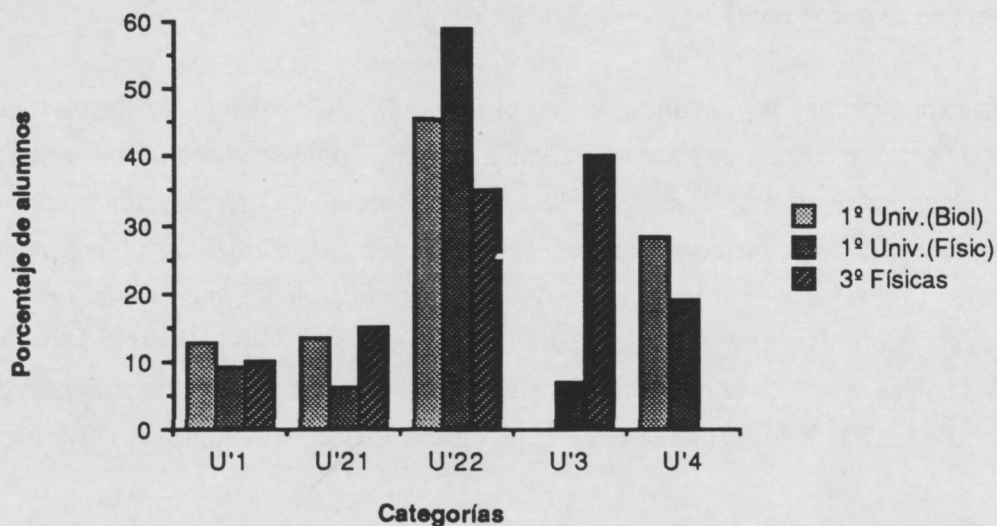
Tal imposibilidad es argumentada refiriéndose a:

- U'1- La gravedad
- U'21- Energía y gravedad
- U'22- Transferencias de energía
- U'3- La 2ª ley de la Termodinámica
- U'4- Sin respuesta o explicación

Los resultados obtenidos por los tres grupos de estudiantes podemos observarlos y compararlos en la tabla y el diagrama de barras:

| | 1º Biol. | 1º Físicas | 3º Físicas |
|---------------------------------|----------|------------|------------|
| Gravedad: U'1 | 12.8% | 9.1% | 10% |
| Energía + Gravedad: U'21 | 13.5% | 5.1% | 15% |
| Transferencias de energía: U'22 | 45.4% | 59.6% | 35% |
| 2ª Ley: U'3 | 0% | 7.1% | 40% |
| Sin respuesta: U'4 | 28.4% | 19.1% | 0% |

Diagrama para cuestión 7b (Q-3B), frecuencias en %



Las respuestas más pobres son las codificadas como U'1. En ellas los estudiantes no se dan cuenta del problema que se les plantea: ¿por qué si la energía se conserva no poder disponer de ella? Sus respuestas atribuyen a la gravedad el hecho de no poder volver la piedra a su altura inicial. Así dicen: *"La piedra no puede subir porque la gravedad atrae todos los objetos hacia el centro de la Tierra"* (1º Univ), o bien: *"Para subir tendría que tener una fuerza mayor que la gravedad"* (3º Fis)"

Las respuestas más sorprendentes son las del grupo U'21. Los estudiantes utilizan la fuerza gravitatoria como energía, hacen comparaciones entre energía y fuerza como si fueran magnitudes comparables (¿ambas vectoriales? ¿ambas escalares?). Así leemos: *"La fuerza de la gravedad es mucho mayor que la energía de la piedra. Tendríamos que añadir mucha más energía para que la piedra venciera la gravedad"*.(1º Univ)

El grupo U'22 es el más numeroso y da sus argumentos apoyándose en transferencias de energía entre la piedra y el suelo pero no mencionan la dificultad o la imposibilidad del proceso inverso. Para algunos da la impresión que consideran que la energía ya se ha consumido *"la piedra ha perdido parte de la energía que tenía cediendo al suelo, al aire etc"*, otros lo analizan como un problema de transformación de energía potencial y cinética: *"la energía potencial se ha transformado en cinética pero la cinética no pasa a potencial"* y finalmente hay muchos que de forma más o menos explícita se refieren a la disipación de la energía en el suelo. *"En el momento del choque parte de la energía se transmite al suelo y también parte de la energía ha dejado de tener carácter de cinética o potencial"* Pero, en ningún caso de los codificados en este grupo se busca una

explicación al porque después de transmitirse al suelo, disiparse, "perderse en el suelo" la energía no se puede reutilizar.

Estas explicaciones las encontramos en el grupo U'3. Unas veces de forma implícita, otras de forma explícita, se hace referencia a la 2ª ley. *"porque ahora tenemos una forma de energía no recuperable, es decir, se ha transformado en deformación y también en calor. Por el 2º principio sabemos que el calor no se puede transformar íntegramente en trabajo"* (3º Fis) o *"porque esto supondría una disminución de la entropía y el proceso sería reversible. La entropía de la piedra ha aumentado"* (3º Fís) Un elevado porcentaje 40% (aunque menos de la mitad) de los alumnos de 3º responden con argumentos de este tipo. Sólo un 7% de los estudiantes de 1º de Físicas lo hace y ninguno de 1º Biológicas.

U'4- Como en muchas otras cuestiones el grupo de alumnos de 1º de Universidad que no responde es bastante elevado, siendo algo mayor para los de 1º de Biológicas que para 1º de Físicas.