

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

Quiero resaltar mi profundo agradecimiento a un conjunto de personas e instituciones. Citarlos todos y todas sería muy prolijo, y, seguro, que olvidaría a muchos de ellos. Todos quienes me han ayudado en el proyecto y realización de esta tesis saben ya que cuentan con mi sincera gratitud.

De todas maneras, pienso que debo destacar el papel relevante y el constante estímulo que para mí ha supuesto el Professor Paul Black, Director de la tesis, sin cuyo aliento y soporte moral, difícilmente este trabajo hubiese visto la luz. Ha sido para mí un honor y una suerte poder contar con la orientación de quien domina las técnicas de investigación, la temática científica y dispone a la vez de los recursos humanos para crear un clima de rigor y de serenidad a su alrededor.

Asimismo, agradezco al profesor Dr. David Jou, tutor, su interés, atención y supervisión. Su amplitud de miras y su visión integradora de todos los ámbitos del saber me han dado ánimos para seguir adelante. Sus sugerencias han sido siempre para mí de gran utilidad.

Tampoco olvido a los profesores Dr. Josep Enric Llebot y Dr. Francisco Fernández, que confiaron en la virutalidad de la tesis, como un elemento más de conocimiento de sus alumnos de Física permitiendo que éstos respondieran a los cuestionarios.

Mi reconocimiento a los maestros de la Escuela Catalunya de Sabadell y Orlandai de Barcelona que tuvieron la amabilidad de aceptar mi injerencia en sus clases, y a Lluisa Jover, autora del soporte gráfico de uno de los cuestionarios.

También agradezco el apoyo, el estímulo y las facilidades que he recibido por parte de los compañeros del Departament de Didàctica de les Matemàtiques i les Ciències Experimentals de l'Escola de Mestres "Sant Cugat" de Bellaterra y de todos los que iniciamos la misma aventura en el Chelsea College de Londres.

Asimismo agradezco la ayuda económica que me otorgó la Direcció General d'Universitat de la Generalitat de Catalunya .

La comprensión, el aliento y la paciencia de amigos y familiares me han permitido superar los momentos difíciles de la realización de la tesis.

Finalmente me congratulo de haber podido contar con la ayuda, nada desdeñable, de mi hija Victoria a la hora de mecanografiar textos .

A todos ellos debo el hecho que esta investigación haya podido llegar a término.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	1
Capítulo 1	5
ACERCA DE LAS DEFINICIONES DE ENERGIA Y DE CONCEPTOS	
AFINES	5
1.1 El lenguaje de la Física.....	5
1.2.El concepto de energía.....	7
1.3.Definición de energía	8
1.3.1.Definiciones contradictorias con algunos principios.....	11
1.4.Consecuencias de la definición de energía	15
1.4.1.Como medir las diferencias de energía?.....	17
1.4.2.Energía de una partícula.....	17
1.4.3.Energía de un sistema.....	19
1.5.Precisiones entorno a la 1ª Ley de la Termodinámica.....	22
1.6.Trabajo.....	23
1.7.Trabajo y energía.....	26
1.7.1.Relación entre ambos conceptos	26
1.7.2.Otras precisiones entorno al trabajo y la energía	28
1.8.Calor.....	29
1.9.Trabajo y calor- Coherencia e incoherencia	31
1.9.1.De calor a trabajo	32
1.9.2.De trabajo a calor	33
1.9.3.Usos del nuevo significado de"calor".....	33
1.10.¿Trabajo o calor?	35
1.11.¿Energía como un fluido?	37
1.12. Transferencias de energía.....	41
1.13.¿Formas de energía?	43
1.14.Transformación de la energía	46
1.15.Conclusiones.....	48
Capítulo 2	49
ESTUDIOS RELATIVOS A LA COMPRESION DE CONCEPTOS	
IMPLICITOS EN LA 1ª Y LA 2ª LEYES DE LA TERMODINAMICA	49
2.1.Acerca de la enseñanza de la Energía	49

2.2. Interés por el aprendizaje.....	49
2.3. Investigaciones con respecto a las asociaciones con el concepto de energía	51
2.4. Otros estudios relativos a la conceptualización de la energía y a la introducción de la Termodinámica.....	55
Capítulo 3.....	59
DISEÑO DE LA INVESTIGACION.....	59
3.1 Plan de la investigación.....	60
3.2 Hipótesis	61
3.2.1. Hipótesis relativas a la educación científica en general:	61
3.2.2 Hipótesis sobre conceptos científicos específicos.:.....	62
3.3 Las hipótesis planteadas y la metodología a seguir.....	64
3.4 Descripción de los cuestionarios	67
3.4.1 Tipos de cuestionarios	67
3.5. Cuestionario Q-1.....	67
3.6. Cuestionarios Q-2.....	68
3.6.1 Cuestionario Q-2 Tipo I.....	68
3.6.2 Cuestionario Q-2 Tipo II.....	69
3.7. Cuestionarios Q-3.....	70
3.7.1 Cuestionario Q-3A.....	70
3.7.2 Cuestionario Q-3B.....	74
3.8. Identificación de la muestra.....	81
3.8.1 Alumnos de Escuela Primaria	81
3.8.2 Estudiantes de Universidad.....	81
3.9. Aplicación de los cuestionarios.....	83
3.10. El análisis de los datos.....	85
3.11. Interpretación y comparación de los resultados.....	86
Capítulo 4.....	87
EL CONCEPTO DE ENERGIA EN ALUMNOS DE PRIMARIA.....	87
4.1. Introducción.....	87
4.2. Cuestionario Q-1	87
4.3. Análisis de datos y Dominios elegidos	88
4.4. Concepciones sobre la naturaleza de la energía.....	88
4.4.1. Categorías establecidas.....	88
4.4.2. Descripción de los resultados	89

4.4.3 Conclusiones acerca de las Concepciones de la naturaleza de la energía.....	99
4.5.Concepciones sobre las funciones de la energía.....	100
4.5.1.Categorías establecidas.....	100
4.5.2.Descripción de los resultados	101
4.5.3. Conclusiones acerca de las Concepciones sobre la función de la energía	108
4.6.Concepciones sobre procedencia de la energía	109
4.6.1.Categorías establecidas.....	109
4.6.2. Descripción de los resultados.....	110
4.6.3. Conclusiones acerca de las Concepciones sobre el origen o la procedencia de la energía.....	113
4.7 Concepciones sobre "almacenamiento" de la energía	114
4.7.1.Categorías establecidas.....	114
4.7.2.Descripción de los resultados	114
4.8.Relación entre las concepciones detectadas en cada uno de los dominios.....	116
4.9.Conclusiones de las comparaciones entre los 4 dominios.....	120
4.10.Clasificación de las concepciones	120
4.11.Conclusiones finales a partir del cuestionario Q-1.....	127
4.12.El cuestionario Q-2 Tipo I.....	132
4.13.Descripción de los resultados a las cuestiones de Q-2 Tipo I	134
4.14.Síntesis de los resultados del cuestionario Q-2, Tipo I	140
4.15.Cuestionario Q-2, Tipo II	142
4.16.Descripción de los resultados a las cuestiones de Q-2, tipo II	144
4.17.Síntesis de los resultados del cuestionario Q-2. tipo II	153
4.18.Conclusiones a partir de los cuestionarios Q-2, Tipos I y II.....	155
Capítulo 5.....	157
DESCRIPCION Y ANALISIS DE LAS RESPUESTAS A LOS CUESTIONARIOS Q-3	157
5.1.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 1 (Q-3A).....	158
5.2.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 2 (Q-3A).....	161
5.3.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 3 (Q-3A).....	164
5.4.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 4a (Q-3A).....	168
5.5.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 4b (Q-3A).....	171
5.6.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 5a (Q-3A).....	175
5.7.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 5b (Q-3A).....	180
5.8.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 6 (Q-3A)	182

5.9.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 8 (Q-3A)	186
5.10.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 9 (Q-3A).....	191
5.11.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 10 (Q-3A)	196
5.12.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 11 (Q-3A)	200
5.13.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 1 (Q-3B).....	204
5.14.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 2 (Q-3B).....	210
5.15.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 3 (Q-3B).....	214
5.16.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 4 (Q-3B).....	218
5.17.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 5 (Q-3B).....	222
5.18.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 6 (Q-3B).....	225
5.19.Descripción y análisis de las respuestas al apartado a) de la cuestión 7 (Q-3B).....	228
5.20.Descripción y análisis de las respuestas al apartado b) de la cuestión 7 (Q-3B).....	232
5.21.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 8 (Q-3B).....	235
5.22.Descripción y análisis de las respuestas al apartado b) de la cuestión 8 (Q-3B).....	241
5.23.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 9 (Q-3B).....	247
5.24.Descripción y análisis de las respuestas al apartado b) de la cuestión 9 (Q-3B).....	250
5.25.Descripción y análisis de las respuestas al apartado c) de la cuestión 9 (Q-3B).....	253
5.26.Descripción y análisis de las respuestas al apartado d) de la cuestión 9 (Q-3B).....	257
5.27.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 10 (Q-3B)	258
5.28.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 11 (Q-3B)	264
5.29.Descripción y análisis de las respuestas a la cuestión 12 (Q-3B)	267
Capítulo 6	273
CONCEPCIONES DE LOS ESTUDIANTES	273
6.1.Concepciones entorno a la energía y otros conceptos implícitos en la 1ª Ley de la Termodinámica.....	273
6.1.1.Acerca del concepto de Trabajo	273
6.1.2.Acerca del concepto de calor	277
6.1.3.Energía interna y calor	279
6.1.4.Dificultades entorno al concepto de energía	280
6.1.5.Ideas sobre la conservación de la energía.....	283
6.1.6.El aprendizaje de los anteriores conceptos.....	285

6.2. Concepciones globales entorno la 2ª. ley	287
6.2.1. Valoración de los conocimientos de la 2ª Ley por parte de los estudiantes de la muestra	287
6.2.2. Valoración de las respuestas a las diversas cuestiones por parte de los estudiantes de 3º de Físicas.....	290
6.2.3. Índice de discriminación de las cuestiones.....	291
6.2.4. Análisis cualitativo de las concepciones entorno a la 2ª Ley	293
6.2.5. Las interconexiones entre las diferentes formulaciones de la 2ª Ley. en los estudiantes de 3º de Físicas	302
 Capítulo 7:	309
ACERCA DE LA CONSISTENCIA DE LAS CONCEPCIONES	309
7.1 ¿Consistencia o inconsistencia?	309
7.2 Inconsistencia a partir del conjunto de respuestas dadas por cada individuo acerca del concepto de trabajo.	312
7.3. Inconsistencia a partir del conjunto de respuestas dadas por cada individuo acerca del concepto de calor.	314
7.4. Inconsistencia a partir del conjunto de respuestas dadas por cada individuo acerca del concepto de energía.....	316
7.5. Conclusiones a partir de las inconsistencias encontradas respecto los conceptos de trabajo, calor y energía	320
7.6. Inconsistencias en las cuestiones sobre degradación de energía.....	321
7.7. Consecuencias de las anteriores inconsistencias en vistas a una correcta conceptualización de la 2ª Ley de la Termodinámica.....	325
7.8. Inconsistencias en las cuestiones acerca de la 2ª Ley de la Termodinámica	327
7.8.1. La complejidad de los niveles de razonamiento	327
7.8.2. Niveles de conocimiento y niveles de razonamiento.....	331
 CONCLUSIONES	335
1. ACERCA DE LA METODOLOGIA EMPLEADA.	335
2. ACERCA DE LA CONCEPTUALIZACIÓN DE LA ENERGIA	336
2.1. La definición de energía de los alumnos de la muestra.....	337
2.2. Las concepciones de la energía para los alumnos sin formación previa sobre el tema.....	337
2.2.1. Las asociaciones con el termino energía	337
2.2.2. Las concepciones físicas subyacentes a las asociaciones.	339

2.2.3. Acerca del aprendizaje del concepto de energía	341
2.3. El concepto de energía en alumnos con formación teórica.	342
2.4. Ideas de los estudiantes con formación teórica acerca de conceptos relacionados con el de energía.....	344
3. CONCEPCIONES ENTORNO DE LA 2ª LEY DE LA TERMODINAMICA DE ESTUDIANTES DE 1º DE UNIVERSIDAD Y DE 3º DE FISICAS.....	347
4. ACERCA DE LA SOLIDEZ DE LOS RAZONAMIENTOS.....	349
A N E X O S	355
BIBLIOGRAFIA	413

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

En la práctica de mi profesión como profesora de Física, he sentido la necesidad de cambiar la imagen que tenían los alumnos respecto de mi disciplina. Con frecuencia, la Física es percibida como una temática alejada de la vida cotidiana, cuando no en flagrante contradicción con ella. Durante mis cursos como formadora de maestros, he podido comprobar como los "buenos alumnos", en cursos inferiores, no eran capaces de aplicar sus conocimientos supuestamente aprendidos a la vida cotidiana. Como persona interesada en la alfabetización científica de nuestra sociedad, pensaba que los esfuerzos de muchos profesores de Física quedaban malogrados, ya que no se había conseguido que los estudiantes comprendieran mejor el mundo que nos rodea.

En sentido inverso, estaba sorprendida por comprobar, y a la vez interesada en conocer mejor, como la sociedad (ambiente social, medios de comunicación etc) contribuye al conocimiento científico de muchos ciudadanos. Resulta sorprendente, en efecto, hasta qué grado los alumnos tienen ideas acerca de muchos conceptos científicos que proceden de su inserción en un medio ambiente, previas a toda enseñanza de la Física.

Una de las temáticas que aparece con frecuencia en nuestro entorno es la de la energía. Todo el mundo ha oído hablar de ésta, ya que la problemática de los recursos energéticos aflora con frecuencia, ya sea en las páginas de política, de economía, de deportes, de divulgación o incluso en diversos anuncios publicitarios. Una asimilación completa del concepto de energía requiere comprender tanto su conservación como su degradación, conceptos que, en apariencia, pueden resultar antitéticos en una primera lectura. En definitiva, exige un buen conocimiento de la 1ª y 2ª Leyes de la Termodinámica. Su aplicabilidad a un sinnúmero de situaciones cotidianas es posible si el aprendizaje en las aulas es significativo.

Dadas las anteriores premisas y la necesidad de acotar la investigación, el tema elegido versa sobre la conceptualización que realizan los estudiantes acerca del concepto de energía, la segunda ley de la Termodinámica y algunos conceptos con ellos relacionados (entropía, conservación y degradación de la energía, trabajo, calor, energía interna).

Dada la confusión que respecto a tales conceptos muestran muchos alumnos y como se trata de conocimientos básicos para comprender diversos conceptos físicos, resulta interesante conocer cuales son las dificultades con que se encuentran los alumnos para un buen aprendizaje. El objetivo no es hacer un listado de errores conceptuales sino de comprender los obstáculos que tienen que superar para que su aprendizaje sea significativo. El propósito de este estudio no es tampoco, hacer prescripciones de como abordar la enseñanza de esta temática en las aulas, sino que creo que previamente hay que profundizar acerca de las formas de razonamiento y de explorar todo tipo de problemas que impiden su completa comprensión.

El presente trabajo es un estudio empírico en que los datos provienen de las respuestas de los alumnos de diversos niveles educativos a amplios cuestionarios. Tales respuestas se analizan cualitativamente con el fin de poder sacar a la luz toda la información que contengan, al margen de su idoneidad o corrección desde un punto de vista científico. Ello permite una detallada descripción de las ideas que se han formado los alumnos acerca de los diversos conceptos físicos considerados. El énfasis en la necesidad de un análisis cualitativo y no cuantitativo está argumentado en el capítulo 3. De la minuciosidad con que pueden describirse las ideas de los estudiantes dan buena cuenta los capítulos 4 y 5. A partir de este detallista análisis pueden elaborarse síntesis como las del capítulo 6 y también formular nuevas hipótesis como las expuestas en el capítulo 7.

He podido comprobar como en diversos libros de texto el enfoque que desde la Termodinámica se da a tales conceptos no es el mismo, ni tampoco consecuente o relacionado con su enfoque desde la Mecánica. Cierta ambigüedad en el uso de los términos es también frecuente y he considerado necesario puntualizarlos a fin de poder comprender mejor los problemas de aprendizaje que puedan derivarse. Este es el objetivo del capítulo 1 donde se define y precisa los conceptos relacionados con la temática a abordar. Ello nos permitirá constatar cuan cerca o lejos están los estudiantes de una acepción científica de los mismos. Precisamente una de las aportaciones de este trabajo es el cotejar las ideas de los alumnos con las ideas científicas que con el mismo o distinto nombre están establecidas. Diversos han sido los estudios que se limitan a evidenciar preconcepciones de los alumnos pero que no muestran cuál es el camino que falta recorrer o los cambios conceptuales que tienen que producirse hasta conseguir una buena comprensión de los diversos conceptos. Desde esta perspectiva, los hallazgos de tales estudios, a veces, no resultan más que datos anecdóticos sin punto de referencia en la meta a conseguir.

Son diversos los investigadores que encaminan sus esfuerzos a analizar las dificultades de los alumnos en la comprensión de los conceptos físicos. En las dos últimas décadas ha habido importantes aportaciones pero queda mucho por recorrer. En particular, las investigaciones realizadas hasta ahora sobre la conceptualización de la energía han solido centrarse en alguno de los niveles educativos, fundamentalmente Primaria y primeros niveles de Secundaria. Era pues necesario un estudio longitudinal que abarcara desde los cursos de Primaria hasta los de la Universidad. Conocer qué evoluciona y qué persiste a lo largo de la enseñanza es uno de los propósitos del presente estudio

He mencionado que uno de los objetivos de este trabajo consiste en dilucidar qué es lo que resulta para la vida cotidiana de los conocimientos recibidos en los cursos de Física, sobre una temática particular. Por ello, la orientación de la investigación será contrastar como utilizan algunos conceptos desde dos ámbitos: el familiar y el académico. Las hipótesis generales, planteadas en el capítulo 3 y que han condicionado la elaboración de los instrumentos de investigación, están fuertemente basadas en esta problemática.

El capítulo 2 va destinado a plasmar las más interesantes investigaciones didácticas en relación con el concepto de energía y con otros aspectos de la Termodinámica. Con ello se puede contrastar las aportaciones más originales de este trabajo. Los puntos de mira desde los que se aborda cada una de las investigaciones son diversos y por lo tanto también sus resultados.

Muchos de estos estudios, así como el presente, pretenden aportar datos para comprender como se aprende, como se construye el conocimiento. En particular, con el presente trabajo, quisiéramos contribuir al esclarecimiento de algunas cuestiones no resueltas. Por ejemplo: ¿Cuándo podemos asegurar que un alumno conoce cierto concepto? ¿Una respuesta sobre tal concepto evidencia la conceptualización que de él se ha formado? ¿Sus afirmaciones suelen ser firmes en unos alumnos y erróneas en otros, o bien hay cierta inconsistencia en todos ellos? ¿Obtendremos el mismo nivel de razonamiento en cada alumno cuando se le pregunte por la aplicación de un concepto a diversas situaciones? Si la mente humana sigue modelos claros de comportamiento, será fácil una clasificación de los individuos. Si no es así, sólo podremos clasificar tipos de razonamiento que podrá utilizar un individuo u otro indistintamente. Diversas hipótesis al respecto se han realizado en los estudios educativos a lo largo de la última década. No todas son coincidentes y este trabajo permite aportar datos para tal debate y, en definitiva, para un mejor conocimiento sobre las circunstancias que permiten o condicionan el aprendizaje.

Capítulo 1

ACERCA DE LAS DEFINICIONES DE ENERGIA Y DE CONCEPTOS AFINES

En este capítulo se pretende hacer ciertas puntualizaciones acerca de conceptos físicos que por su "elementalidad" se dan por conocidos por quienes han superado los primeros niveles de formación en Física pero que, en realidad, se trata con cierta superficialidad o ambigüedad en bastantes ocasiones.

1.1 El lenguaje de la Física

Una de las características de la Ciencia ha sido su intención de precisar los conceptos y de utilizar un lenguaje propio y inequívoco con el fin de evitar posibles confusiones y ambigüedades conceptuales. La necesidad de utilizar un lenguaje preciso es, si cabe, aún más evidente en el caso de la Física, ya que algunos de sus términos forman también parte del lenguaje cotidiano aunque tengan allí un significado más restringido.

Por otro lado, conviene hacer precisiones acerca del papel de las Matemáticas en el lenguaje físico. La Física precisa de las Matemáticas para operar, para establecer relaciones cuantitativas entre las magnitudes, pero no podemos decir que un concepto esté definido por el hecho de darle una formulación matemática. Es la Física la que da sentido o significado conceptual a los términos utilizados.

Cada propiedad, cada función, cada potencial tienen una definición formal en términos matemáticos, pero, a la vez y esencialmente tienen un significado físico sobre el papel que desempeñan en un fenómeno, proceso, etc. Por lo tanto, no podemos considerar que nuestros estudiantes, por el sólo hecho de ser capaces de establecer matemáticamente una magnitud, están formulando una definición de ella ni que conocen sus implicaciones. La precisión con que se usa el lenguaje matemático no siempre va acompañado de igual rigor en el lenguaje verbal con que nos referimos a unos mismos conceptos.

En páginas posteriores, podremos constatar como estudiantes y libros de texto utilizan de forma un tanto burda el lenguaje verbal acerca de distintos conceptos físicos y en cambio no aceptarían tal nivel de imprecisión en su lenguaje matemático.

Esta atención al lenguaje verbal es especialmente importante en la enseñanza de la Física a niveles elementales, dado que los formalismos matemáticos no son aún posibles y por otro lado, no puede demorarse la enseñanza de algunos conceptos que corresponden al vocabulario científico básico. Teniendo en cuenta lo anterior, intentaremos hacer algunas consideraciones sobre como se usa el lenguaje de ciertos conceptos básicos y como debería utilizarse. En este sentido, las deficiencias en el manejo del lenguaje, lejos de afectar tan sólo las asignaturas de las llamadas humanidades, también alcanzan de lleno las materias estrictamente científicas, en un grado que pocos parecen tomar debidamente en consideración.

1.2.El concepto de energía

Como Lindsay (1975) dice *"la Ciencia opera con ideas, llamadas conceptos, que tienen cierto misterioso poder de hacer concordar grandes cúmulos de experiencia de modo que no haya que inventar nuevas palabras para describir cada una de las experiencias individuales con que nos encontramos en nuestra vida"*. Esta es precisamente la situación que se da en el concepto de energía.

Los conceptos físicos evolucionan con el tiempo y éste es también el caso del concepto de energía, que ha experimentado diversas precisiones a lo largo de los siglos y los años. Pero de todos modos, la idea clave de energía como cierta *"constancia en medio del cambio"* se ha sentido como una necesidad desde la Antigüedad.

Los primeros vestigios corresponden a dos filósofos presocráticos. Heráclito de Efeso (siglo VI a.C.) sostenía que " a pesar de que todo es cambio, hay algo invariante en el Universo como un todo...Hay alguna esencia etérea que puede ser transformada entre los objetos de nuestra experiencia sin que se produzca una pérdida neta" (Lindsay 1975)

Parménides de Elea, impresionado por la serie aparentemente caótica de sucesos que acontecen a nuestro alrededor, decidió tratar el cambio como una mera ilusión. La noción de invariancia en medio del cambio ha estado pues, presente en el panorama intelectual de la humanidad. La pugna entre cambio y permanencia, entre ser y devenir, tiene una larga tradición en la historia. No vamos a adentrarnos en ello, pues no es éste el lugar para referir la interesante evolución del concepto de energía. Una excelente recopilación se encuentra en los escritos históricos de J. Lindsay

Sólo quisieramos añadir que la palabra $\epsilon\nu\rho\gamma\epsilon\iota\alpha$ (energía en latín) aparece por primera vez en los escritos de Aristóteles, y tiene el significado de un *"estado de potencialidades"*, guardando cierta relación con una posibilidad para llevar algo a término. Por esta razón los científicos de los siglos XVIII y XIX escogieron el nombre de energía para expresar el concepto que actualmente designamos con este nombre.

1.3. Definición de energía

"Los científicos hacen observaciones directas de fenómenos aislados y comparando muchas observaciones constatan unas regularidades. Estas regularidades se explican mediante leyes" (Carnap 1966). Para explicar estas regularidades-leyes, el científico precisa inventar y definir nuevos conceptos. Así ocurre con el concepto de energía.

¿Cómo definir energía?

Dice Margeneau (1970): *"No puede existir ciencia exacta alguna bajo la rígida regla de la unicidad de la definición. La concepción que asocia a cada magnitud física una definición única, o por lo menos, una única definición primaria, representa predominantemente una actitud simplista de escolar por parte de los científicos, y rara vez la sostienen los filósofos"*

El prestigioso físico holandés H.A. Kramers decía: *"Mi idea predilecta es que en el mundo del pensamiento humano en general, y en el de la Física en particular, los conceptos más importantes y fructíferos son aquellos de los que es imposible dar un significado bien definido"*. Precisamente aplica esta consideración al concepto de energía. Por otro lado, al igual que todos los conceptos van refinándose a partir de nuevas aportaciones científicas, también las definiciones van modificándose o adaptándose. Desde un enfoque termodinámico, la definición de energía no es la misma que desde la Mecánica, e incluso desde la Mecánica la definición de energía depende del nivel de generalización elegido. Para algunos, la definición de energía viene dada por la función de Hamilton-Jacobi, para otros, a niveles elementales, la energía se suele definir mediante el trabajo.

Desde la Termodinámica, el punto de vista es diferente. No es necesario postular la existencia de partículas y lo que realmente interesa es la energía interna de un sistema y más en concreto sus variaciones. Pero, en todos los casos, es posible empezar con una definición elemental de energía y, poco a poco, generalizarla a todos los campos físicos.

Si bien no es posible dar una definición única de energía, sino sólo aproximaciones y formulaciones según la perspectiva desde la que se trabaja, una definición no debería comportar concepciones erróneas o contradictorias con otros enunciados físicos.

La definición que adoptaremos en lo que resta es la siguiente:

La energía es una propiedad que asociamos al estado de un sistema (o de una partícula), que nos resulta adecuada para analizar los cambios a los que pueda estar sometido y que

tiene la peculiaridad de que el valor numérico que podemos atribuirle a un sistema aislado (o a una partícula) no se modifica a pesar de los múltiples cambios que experimente.

J.C.Maxwell (1877) decía: *"Podemos considerar la energía de un sistema material como una cantidad cuyos aumentos y disminuciones podemos determinar cuando el sistema pasa de una condición a otra. El valor absoluto de la energía en un estado estandar nos es desconocido y no tendría ninguna utilidad conocerlo ya que todos los fenómenos dependen de las variaciones de la energía y no de su valor absoluto"*.

Actualmente sabemos como definir la energía de un objeto de masa m ($E = mc^2$) por el simple hecho de existir, pero es cierto que en el análisis de los procesos a gran escala esta definición nos resulta, en general, poco interesante. De la definición de Maxwell lo que podemos resaltar es su visión de la energía como una cantidad abstracta que asociamos a cada sistema y de la que nos interesan sus variaciones.

R. Feynmann (1971) también da una definición de energía en términos abstractos y sólo en relación con su conservación: *"es abstracta, puramente matemática, hay un número que por todos los medios que lo calculemos, no cambia"* Dice también: *" Es importante darse cuenta que en la Física actual no sabemos lo que es la energía. No tenemos un modelo de energía formada por pequeñas gotas de un tamaño definido. No es así. Sin embargo, hay fórmulas para calcular cierta cantidad numérica y cuando las sumamos todas siempre encontramos el mismo número"* La energía es presentada por Feynmann en términos abstractos pero no la refiere a una propiedad, y además extensiva, de un sistema como aquí hemos considerado que conviene.

Quizás precisamente por esta ambigüedad en la definición, algunas de sus posteriores referencias corren el riesgo de poderse tildar de "lenguaje del calórico" y de mostrar cierta confusión entre energía interna y calor. Por ejemplo: *"Supongamos el caso del flujo de calor, por ejemplo, en un metal. Supongamos una situación simple en que todo el calor se ha puesto previamente dentro y el cuerpo ahora se está enfriando.No hay fuentes de calor, de manera que el calor se conserva. ¿Cuánto calor hay dentro del volumen en un instante cualquiera? Ha de estar disminuyendo tanto como fluye fuera de la superficie del volumen..."* (3-4, Feynmann 1972) o en otro párrafo dice: *"Consideremos una situación en que el calor se conserva. Por ejemplo, imaginemos un material en que despues de calentarse inicialmente, no se genera ni se absorbe más energía calórica. Entonces, si existe un flujo de calor hacia el exterior de la superficie cerrada, el contenido de calor dentro del volumen ha de disminuir. Así en circunstancias en que el calor se ha de conservar..."* (3-2 Feynmann 1972)

Una definición similar a las precedentes la da A. Arons (1965): *"La energía no es una sustancia, un fluido, una pintura o un combustible con la que están tiznados los cuerpos y que se saca frotando uno sobre otro. Utilizamos tal término para designar un constructo-números calculados de cierta manera que teórica y experimentalmente se ha encontrado que mantienen una relación extraordinariamente simple, en muy diversos fenómenos físicos"*. Por tanto, Arons formula una definición de energía en términos abstractos aunque no explicita su conservación, como hacía Feynmann. Quizás es esta exclusiva referencia a la energía como un número la que le permite escribir frases como: "El trabajo es una forma de energía" o bien "...el trabajo realizado por una fuerza F se convierte en energía cinética..."

J. Kestin (1978) define la energía como una propiedad de un sistema y analiza, desde un punto de vista matemático, si es mejor considerarla como una propiedad o como un potencial. En nuestra definición la palabra propiedad se utiliza en un doble sentido: desde el punto de vista matemático (que condiciones ha de tener una magnitud para ser considerada un potencial) y una perspectiva más general (quizás podríamos llamarla filosófica): propiedad como un atributo o cualidad no identificable como simplemente esencial ni como simplemente accidental.

Muchos autores evitan dar una definición de energía, algunos explicitando su dificultad y otros buscando soluciones de compromiso. Por ejemplo, J.B. Marion (1982) empieza el tema con la definición de trabajo realizado por una fuerza F para llegar a definir energía cinética como la magnitud que aparece en el denominado teorema del trabajo-energía. Pero inmediatamente puntualiza: *"La energía cinética adquirida por una partícula deriva en última instancia de la energía que poseían los agentes responsables de la fuerza F . El trabajo es una transitoria forma de energía; el trabajo no se conserva. Sin embargo, la energía cinética de una partícula se mantiene en tanto en cuanto no actúen fuerzas sobre la partícula que le hagan modificar su velocidad"*. Posteriormente, Marion generaliza el concepto de energía y su conservación desde el caso de fuerzas conservativas al de fuerzas no conservativas, desde el movimiento lineal al movimiento en tres dimensiones, desde una partícula a un cuerpo sólido rígido y a sistemas de incontable número de partículas. Por lo tanto, el enfoque de Marion no es el de dar una definición general de energía sino el de hacer sucesivas aproximaciones. Este modo de proceder es bastante usual en muchos libros de texto.

1.3.1. Definiciones contradictorias con algunos principios

Existe una larga tradición de definir la energía como la *capacidad para realizar trabajo*. Desde la última década, se han publicado diversos artículos (Lehram, Hicks, Duit) para rechazar tal definición, pero sigue arraigada en la tradición. Al analizar tal definición se encuentran serias dificultades, que enumeramos a continuación:

1) Si la energía es la capacidad de hacer trabajo, ¿qué queda una vez el trabajo se ha realizado? Este planteamiento, tomado al pie de la letra entraría en contradicción con la idea de conservación.

Cuando un objeto cae desde cierta altura, la energía inicial cuando ha llegado al suelo se conserva pero la capacidad de hacer trabajo, evidentemente no.

2) Sabemos que en los casos de fricción se libera energía mediante calor, y por la 2ª ley de la Termodinámica, también sabemos que esta energía liberada no es tan grande como la capacidad del sistema para hacer trabajo. (Esta objeción es negada por Warren (1982)). Cuando un objeto en movimiento se para, su energía cinética inicial puede medirse calculando el trabajo realizado por las fuerzas de fricción pero esta energía no tiene la capacidad de realizar trabajo que anteriormente tenía.

3) La capacidad para realizar trabajo no depende sólo de la energía asociada, sino de su distribución. Por ejemplo, si la energía se encuentra distribuida entre los objetos de tal manera que éstos tengan temperaturas diferentes, puede realizarse un trabajo, pero es imposible obtener trabajo a partir de una distribución de energía interna con temperaturas uniformes.

4) No se puede asociar la energía sólo al trabajo. Para calentar necesitamos energía. Así pues, la energía está también relacionada con el concepto de calor. Dar una definición de energía basada únicamente en la idea de trabajo es poco preciso en relación con el primer principio, que admite como formas de intercambio de energía tanto el calor como el trabajo.

Esta definición insatisfactoria, que debería abandonarse, también se encuentra arraigada en el uso de los científicos. Varias pueden ser las razones:

a) una ausencia de reflexión sobre la definición de energía

b) una opinión de que una definición rigurosa de energía sería desproporcionadamente compleja en relación con las ventajas que podrían derivarse para la docencia. Veremos después las posibles consecuencias de tal opinión

c) la convicción de que no es necesaria una definición rigurosa para trabajar en Física ya que la energía se presenta con significados suficientemente distintos incluso en diversas ramas de la Física.

Pero, si hablamos de capacidad para realizar trabajo, propiamente nos estamos refiriendo a la energía disponible del sistema. Sabemos, en efecto, que sólo una parte de la energía del sistema puede ser capaz de realizar trabajo. Esta parte suele denominarse energía disponible del sistema. En cualquier proceso real, aunque la energía se conserva, la cantidad de energía disponible disminuye a razón de lo que determina la irreversibilidad. La 2ª Ley de la Termodinámica puede contemplarse como la constatación del hecho inevitable de la degradación de la energía en cualquier proceso real.

En efecto, la degradación de la energía puede seguirse sistemáticamente introduciendo "funciones de disponibilidad" adecuadas y relacionando éstas con el trabajo máximo que puede realizar el sistema en una transición dada. La pérdida de energía disponible es proporcional al aumento de entropía debido al comportamiento irreversible. Por tanto, el concepto de energía disponible proporciona al estudiante otra idea del significado de la entropía de un sistema (Woollett 1978).

La American Physical Society ha puesto énfasis en la utilidad práctica del concepto de energía disponible. Woollett demuestra, a partir de definir una función disponibilidad A , que es posible decir:

"El límite superior del trabajo útil que un sistema K , en contacto térmico con la atmósfera, puede realizar en la transición entre los estados de equilibrio 1 y 2 es igual a la disminución de la función de energía disponible A para una transición reversible entre estos estados.

$$W_{\text{ut } 1-2}^{\text{max}} = A_1 - A_2 = \Delta A$$

La disponibilidad A disminuye en cualquier trabajo útil que produce un proceso ($W_{\text{ut}} > 0$)

La energía disponible E^a de un sistema K cuando está en el estado 1 se define como el máximo trabajo útil que K puede realizar bajo condiciones ideales en contacto con la atmósfera y con un depósito de trabajo. Es decir, la energía disponible de un sistema K en el estado 1 es:

$$E_1 = A_1 - A_0 \quad , \quad (A_0 \text{ es el valor de } A \text{ cuando } K \text{ está en el estado muerto})$$

Por lo tanto, en la transición desde el estado 1 al estado 2, el cambio de energía disponible es igual a la disminución de la función de disponibilidad:

$$\Delta E = \Delta A$$

Hay situaciones en que el cambio en la función de disponibilidad A es igual al cambio en la energía libre de Helmholtz o la energía libre de Gibbs:

Para una transición entre los estados de equilibrio 1 y 2 en la que se mantiene constante el volumen y la temperatura:

$$\Delta A = \Delta F \text{ donde la energía libre de Helmholtz } F = U - TS$$

Para una transición entre los estados de equilibrio 1 y 2 en la que se mantiene constante la presión y la temperatura:

$$\Delta A = \Delta G \text{ donde la energía libre de Gibbs } G = H - TS$$

Por tanto, la definición de energía como la capacidad para efectuar trabajo entra en contradicción con los conceptos de energía disponible y de energía libre.

Otras definiciones que tratan de ser más intuitivas no son más afortunadas. Cuando James Clerk Maxwell utilizaba en alguno de sus escritos la expresión gráfica "*energy- the go of the things*" o cuando A.P. French decía: "*energy is what we pay for in order to get things done*" están dando la idea de que la energía es la impulsora de los procesos.

Como Jon Ogborn (1985, 1990) precisó bien, la causa de los cambios, lo que hace que un fenómeno tenga lugar, no podemos atribuirlo a la energía sino a la entropía. La línea de argumentación de Ogborn sobre el porqué la energía no es lo que provoca los cambios, el porqué no podemos considerarla "the go of the things", es muy larga. Veamos algunos ejemplos. Dice textualmente:

"No es cierto que una vela ilumine la habitación porque la llama tiene energía, o que una estufa eléctrica caliente la habitación porque la electricidad le proporcione energía, o que la gasolina haga funcionar un coche porque la gasolina tiene energía o que un muelle enroscado rápidamente se desenrosca porque tiene energía almacenada...Estas frases son falsas debido al término "porque" que cada una incluye. Los cambios en la energía no son

la razón por la que se produce un proceso y no otro. Son los cambios de energía a formas inferiores lo que provoca un cambio....hablar de "formas degradadas de energía" no es más que una forma abreviada de decir que la entropía total ha aumentado"...

"Consideremos el movimiento de una pelota lanzada al aire teniendo en cuenta la resistencia del aire o choques inelásticos, la dirección de los procesos ha de entenderse como el que aumenta el número de ordenamientos internos del sistema, es decir, el que aumenta la entropía. Por tanto, la pelota cae desde cierta altura y acaba en reposo en el suelo no porque esto reduzca la energía potencial al mínimo sino porque aumenta al máximo la manera de distribuirse la energía entre las moléculas de la pelota y el suelo"

Definiciones de energía como las mencionadas son por tanto contradictorias con otros principios de la Física. Es pues necesario evitarlas.

1.4. Consecuencias de la definición de energía

Después de fijar una definición de energía, podemos examinar cuales son sus consecuencias y las deducciones que podemos realizar a partir de ella.

A) Decir que una magnitud es una propiedad equivale a decir que podemos expresarla como una función de las variables independientes del sistema (esto no ocurre con el trabajo y con el calor ya que no son propiedades). Es decir, después de fijar el estado de un sistema el valor de la magnitud queda fijado.

(Un cuerpo cuyas propiedades tienen valores específicos se dice que está en un estado y las variables independientes elegidas para determinar las propiedades se denominan parámetros de estado. La noción de estado es previa a las leyes de la Termodinámica. Las relaciones funcionales entre los parámetros de estado y las otras variables dependientes son las ecuaciones de estado.

Entendemos por sistema una cantidad definida de materia limitada por alguna superficie real o imaginaria.

Buchdal (1975) como otros autores distingue entre sistemas termodinámicos y sistemas mecánicos. Considera que un sistema termodinámico es un sistema cuyo equilibrio y cuya configuración están especificados mediante el valor de un número definido de parámetros al menos uno de los cuales no es una variable que dé cuenta del desplazamiento de una parte con respecto a otra. En cambio, para definir la configuración de un sistema mecánico es suficiente conocer sólo este tipo de parámetros. Un sistema termodinámico no puede contener sustancias cuyas propiedades dependan de su historia previa.

Consideraremos que un sistema está en un estado X si las propiedades físicas medibles tienen valores fijos, es decir, si pueden ser expresados mediante un conjunto de números. Al analizar un proceso, el estado del sistema se describe generalmente sólo mediante las variables que cambian durante el proceso. Los parámetros que no experimentan cambios no suelen incluirse).

B) La energía de un sistema puede expresarse en función de las variables independientes en la forma de una ecuación de estado (la ecuación calórica de estado). Cada estado del sistema tiene asociada una energía. Podemos preguntarnos qué significa decir que un sistema (objeto, campo, región) tiene cierta energía E. Si la energía es una propiedad del sistema significará que podemos asociarle una función que depende de sus variables independientes. $E = E(X, Y, \dots)$.

De este modo, cuando se dice que un objeto en movimiento tiene energía denominada energía cinética significa que podemos asociarle una energía que depende de su masa y de su velocidad.

Cuando el objeto aumenta su velocidad, el valor de la energía cambia. Decimos que el objeto ha cambiado su energía o que la energía del objeto ha cambiado o que se le ha transferido cierta energía.

De la misma manera, decir que una carga eléctrica tiene una energía potencial eléctrica significa que podemos asociarle una energía debido a su posición en un campo eléctrico.

Asociar energía a una partícula o a un sistema nos permite discutir e interpretar sus variaciones, debido especialmente a que hemos construido este concepto de energía de modo que se conserve. Es decir, el número asignado a un sistema aislado en cierto estado no cambia ni incluso cuando el sistema cambia.

C) Para ser más precisos, desde un punto de vista matemático, la energía es un potencial, una pseudopropiedad, no una propiedad. La energía es una propiedad porque dado un sistema la energía viene fijada excepto en una constante arbitraria. Pero, un potencial pasa a ser una propiedad por el hecho de asignar un valor convencional a la constante arbitraria.

Esto suele realizarse cuando hacemos un tratamiento matemático de la energía. Se escoge un estado arbitrario del sistema y se asigna un valor absoluto arbitrario E_0 al sistema en tal estado. Esto tiene la ventaja que la energía tiene las características matemáticas de una propiedad. El valor E_0 se elige según las conveniencias del problema. Desde un punto de vista físico, la diferenciación entre una propiedad y un potencial no es esencial porque lo que realmente interesan son los cambios de energía desde un estado a otro del sistema. Una de las características de potenciales y propiedades es que su diferencia entre dos estados del sistema es independiente del proceso por el que se pasa de uno al otro.

Además, la energía es una propiedad extensiva. Es decir, el valor de la energía del sistema se obtiene sumando los valores de cada parte del sistema. (Las propiedades intensivas son aquellas que tienen el mismo valor en todas las regiones del sistema en equilibrio. De Heer (1986) argumenta que estas definiciones son más apropiadas que las referentes a la proporcionalidad de la masa de sustancia involucrada).

Considerar la energía como una propiedad en lugar de un potencial tiene significado físico ya que sólo somos capaces de medir las diferencias de energía entre dos posiciones de una partícula o dos estados de un sistema constituido por una, algunas o innumerables partículas.

1.4.1. Como medir las diferencias de energía?

Si decimos que sólo podemos asignar un único valor numérico a la diferencia $E_2 - E_1$ entre las energías de los dos estados, ¿cómo medir estas diferencias?. Para poder responder a tal cuestión empezaremos desde un punto de vista mecánico a analizar lo que significa energía de una partícula y energía de un sistema. Después de definir energía interna de un sistema desde tal punto de vista, consideraremos los cambios de energía interna desde un punto de vista termodinámico.

1.4.2. Energía de una partícula

Partiremos de las leyes de Newton. Cuando una fuerza (o varias fuerzas de resultante no nula) se aplica a una partícula material, se provoca una aceleración de la partícula.

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$$

A pesar de que es difícil conocer como varía $\mathbf{F}(t)$, podemos saber como varía $\mathbf{F}(\mathbf{r})$. En un breve intervalo de tiempo dt el desplazamiento de la partícula es $d\mathbf{r}$. Al multiplicar por $d\mathbf{r}$ los miembros del enunciado de la segunda Ley de Newton:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = m \cdot \mathbf{a} \cdot d\mathbf{r}$$

Podemos integrar esta expresión a lo largo de una curva C que empieza en el punto 1 y finaliza en 2:

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 m \cdot \mathbf{a} \cdot d\mathbf{r}$$

o lo que es equivalente

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 m \frac{d\mathbf{y}}{dt} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 m \frac{d\mathbf{y}}{dt} \cdot \mathbf{v} \cdot dt$$

Esto conduce a:

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 d(1/2 \cdot mv^2)$$

El término de la izquierda recibe el nombre de trabajo W realizado por la fuerza F desde el punto 1 hasta el punto 2 y el término de la derecha es denominado cambio de la energía cinética de la partícula desde el estado 1 hasta el 2.

$$W_{1-2} = E_{k2} - E_{k1}$$

De esta manera, en una partícula en que el estado está determinado por dos parámetros, posición y velocidad, la diferencia de energía entre el estado 1 y el estado 2 se medirá por el trabajo hecho sobre ella para moverla desde el punto 1 hasta el 2. Es decir, hemos definido una función que asigna un valor a cada velocidad de la partícula de tal manera que la diferencia entre los valores correspondientes sea el trabajo hecho durante el desplazamiento. Esta función se denomina energía de movimiento o energía cinética: E_k

Cuando el trabajo sobre la partícula lo realiza una fuerza conservativa, (es decir, aquella cuyo trabajo entre dos puntos no depende del camino seguido sino tan sólo de sus puntos inicial y final, como la gravitacional, electrostática, elástica) es también posible definir otra función que depende de la posición de la partícula en relación a otras partículas del campo; una función tal que la disminución de sus valores entre la primera y la segunda posición sea el trabajo realizado por la fuerza. Esta función se denomina energía potencial o energía de campo o energía de configuración.

$$E_{p1} - E_{p2} = W_{1-2}$$

En realidad no se trata de una energía de la partícula, se considera que está almacenada en el espacio con una densidad de energía definida. Es una energía del campo en que está situada la partícula; la interacción con las otras partículas del campo es la responsable de la fuerza.

Después de establecer las dos funciones, energía cinética y energía potencial, podemos definir la energía total de una partícula como la suma de ambas funciones:

$$E = E_k + E_p$$

Este valor es constante si la partícula se mueve por la acción de fuerzas conservativas.

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

Si la partícula se desplaza por la acción de fuerzas conservativas y de fuerzas no conservativas, la suma $E_k + E_p$ no es constante sino que disminuye tanto como sea el valor del trabajo realizado por las fuerzas no conservativas a lo largo del desplazamiento. En este caso, la conservación de la energía puede expresarse mediante:

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2} + \int_1^2 f \cdot dr$$

siendo f la fuerza disipativa

1.4.3. Energía de un sistema

En las siguientes páginas adoptaremos el criterio (aunque no sería imprescindible ya que la Termodinámica, por ejemplo, no tiene en cuenta cuál sea la naturaleza microscópica concreta de los sistemas) de que todos los sistemas están constituidos por partículas para pasar a definir su energía. De este modo, la energía de un sistema será la suma de las energías de todas sus partículas, ya que la energía es una propiedad extensiva. Naturalmente, incluimos aquí la energía potencial de las interacciones entre las partículas. Observemos, de hecho que la extensividad de la energía interna en termodinámica tiene lugar por despreciar la energía de interacción entre los sistemas macroscópicos que se van yuxtaponiendo. Ello es razonable, ya que para volúmenes grandes el cociente área/volumen es despreciable.

Sabemos ya que la energía de una partícula sólo puede ser cinética o potencial.

Puede demostrarse que la energía cinética de un sistema de N partículas es la suma de sus energías cinéticas respecto al centro de masas $E_{k \text{ int}}$ y la energía cinética de traslación del sistema $1/2 Mv_{CM}^2$ (M masa total, v_{CM} velocidad del centro de masa con respecto a un sistema externo de coordenadas)

$$E_k = \sum_{\substack{\text{todas las} \\ N \text{ partículas}}} E_{ki} = E_{k \text{ int}} + 1/2 Mv_{CM}^2$$

La energía potencial del sistema puede expresarse mediante la suma de las energías potenciales de las i partículas en la posición r_i . Parte de esta energía es debida a las fuerzas internas que las otras j partículas ejercen sobre la partícula i . Sea $f(r_i, r_j)$ la contribución de las partículas j colocadas en la posición r_j . Otra energía potencial

corresponde a las fuerzas del campo externo al sistema. Sea $f(r_i, r_k)$ la contribución de la partícula k , en la posición r_k externa al sistema, a la energía potencial de la partícula i .

La energía potencial total del sistema será:

$$E_p = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N f(r_i, r_k) + 1/2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(r_i, r_j)$$

El primer término de esta suma corresponde a la energía potencial del campo gravitatorio ($E_{pG \text{ ext}}$), electrostático ($E_{pE \text{ ext}}$) o elástico ($E_{pM \text{ ext}}$) en que esté situado el sistema ya que significan la contribución desde el exterior del sistema. Esta es la parte mensurable. El otro término de la suma es la porción de energía potencial no mensurable. (Recordemos que la energía potencial es siempre una cantidad arbitraria, que sólo las diferencias de energía potencial tienen significado físico ya que siempre es posible definir, de nuevo, el estado de energía potencial cero)

La energía total de un sistema será la resultante de la suma de todas las energías cinéticas y potenciales :

$$E = E_k + E_p = E_{k \text{ int}} + 1/2 M v_{CM}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N f(r_i, r_k) + 1/2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(r_i, r_j)$$

o bien:

$$E = E_k + E_p = E_{k \text{ int}} + 1/2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(r_i, r_j) + 1/2 M v_{CM}^2 + E_{pG \text{ ext}} + E_{pE \text{ ext}} + E_{pM \text{ ext}}$$

Si llamamos energía potencial interna o intrínseca a:

$$E_{p \text{ int}} = 1/2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(r_i, r_j)$$

y denominamos energía externa o extrínseca a: $E_{k \text{ ext}} = 1/2 M v_{CM}^2$, tendremos

$$E = E_k + E_p = E_{k \text{ int}} + E_{p \text{ int}} + E_{k \text{ ext}} + E_{pG \text{ ext}} + E_{pE \text{ ext}} + E_{pM \text{ ext}}$$

La adición de energías cinéticas y potenciales internas o intrínsecas se denomina energía interna del sistema:

$$U = E_{k \text{ int}} + 1/2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(r_i, r_j)$$

$$U = E_{k \text{ int}} + E_{p \text{ int}}$$

Así, la energía total de un sistema es:

$$E = U + E_{k \text{ ext}} + E_{p \text{ ext}}$$

Un cambio infinitesimal de la energía del sistema vendrá dado por::

$$dE = dU + dE_{k \text{ ext}} + dE_{p \text{ ext}}$$

1.5. Precisiones entorno a la 1ª Ley de la Termodinámica

Como es bien sabido, la 1ª Ley establece que:

Cambiar la energía de un sistema sólo puede realizarse mediante dos procedimientos que tienen lugar a través de los límites del sistema: realizando un trabajo o proporcionando calor. Después de transferir energía a un sistema mediante trabajo o calor, no puede distinguirse el procedimiento que ha cambiado la energía del sistema:

$$dE = \delta W + \delta Q$$

Utilizaremos la notación dE (como Callen (1960), Irey et al. (1981) y otros autores) para indicar que la energía es una propiedad, es una diferencial exacta o perfecta. En cambio, utilizaremos δW y δQ para indicar que son diferenciales imperfectas. Esto permite evitar la confusión de considerar que la energía de un sistema es la suma de "trabajo" y "calor". Es decir, aunque se han sumado δW y δQ para tener dE , la energía de un sistema no es el resultado de sumar trabajo y calor. Las integrales de δW y δQ , en un cierto proceso, son el flujo de trabajo y de calor del proceso. La suma dE es el cambio de energía del sistema que es independiente del proceso.

Como P.W. Bridgman (1941) especifica, cuando establecemos la ley no es necesario referirla a un "cuerpo". Podemos referirla a una región ocupada por materia o no, por un campo electromagnético o por una sustancia material continuamente en cambio (hidrodinámica). La región se define sólo por una superficie que la separa de su entorno y que incluso puede sufrir un proceso de distorsión. Bridgman dice: *"en cada situación física es posible localizar una energía interior a cada superficie -no importa como ésta se diseñe- y además dar a dE , δW y δQ , asociados con tal superficie arbitraria, un completo significado instrumental"*.

Como trabajo y energía permiten transferir energía a un sistema, se miden con las mismas unidades que la energía.

Pasaremos ahora a hacer algunas precisiones entorno los conceptos de trabajo y energía, especialmente en relación a la energía.



1.6. Trabajo

Desde un enfoque mecánico, la definición de trabajo realizado por una fuerza $F(\mathbf{r})$ sobre una partícula que se mueve a lo largo de una curva C , desde un punto inicial 1 a un punto final 2, está dado, como hemos visto, por la integral de línea:

$$W = \int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

a lo largo de C

Esta definición se aplica adecuadamente a otros campos del conocimiento como la Termodinámica y el Electromagnetismo.

Las generalizaciones del concepto de trabajo son posibles porque el trabajo no está asociado a la posición de la masa o a su configuración en un campo de fuerzas. El trabajo es simplemente un número que nos da cuenta de cuanta energía se ha transferido a través de los límites del sistema. Por esta razón es frecuente leer:

Trabajo es la medida de la transferencia de energía, a través del contorno del sistema, resultante de la acción de una fuerza que produce un desplazamiento.

Cuando diversas fuerzas actúan simultáneamente sobre el sistema, la determinación del trabajo neto implica conocer como varía cada una de las fuerzas a lo largo del desplazamiento. Es por esta razón que algunos autores consideran útil separar el trabajo en componentes: componentes internos o intrínsecos y componentes externos o extrínsecos:

$$\delta W = \delta W_{\text{ext}} + \delta W_{\text{int}}$$
$$W = W_{\text{ext}} + W_{\text{int}}$$

Cada una de las fuerzas externas que actúan a lo largo de un desplazamiento externo realiza un trabajo que es independiente de la materia que compone el sistema. Así podemos hablar de:

-Trabajo de aceleración lineal. Cuando una fuerza (o varias de resultante no nula) se aplica a un sistema (a su centro de masa para ser más precisos) provoca un cambio en la velocidad del sistema, una aceleración como establece la 2ª ley de Newton. Hemos visto como es posible pasar de:

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$$

a:

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 d(1/2 \cdot mv^2)$$

Es decir, el trabajo hecho por la fuerza \mathbf{F} desde 1 hasta 2 es el cambio de energía cinética:

$$W_{1-2} = W = E_{k2} - E_{k1}$$

El trabajo de aceleración lineal es el cambio de energía cinética lineal.

-Trabajo de aceleración angular cuando un momento externo provoca una aceleración angular. Puede demostrarse fácilmente que:

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 d(1/2 \cdot I \omega^2)$$

El trabajo de aceleración angular es igual al cambio de energía cinética de rotación.

-Trabajo gravitacional cuando el sistema se mueve, en relación a un marco de referencia fijo a la superficie terrestre, por la acción del campo gravitatorio.

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 mg(z) dz = \int_1^2 dE_{pG \text{ ext}}$$

El trabajo gravitacional es igual al cambio de energía potencial gravitatoria.

-Trabajo electrostático cuando un campo electrostático \mathbf{E} provoca un desplazamiento $V\epsilon_0 d\mathbf{E}$:

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 V\epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{E} = \int_1^2 dE_{pE \text{ ext}}$$

ϵ_0 - permitividad eléctrica

V- volumen del sistema

El trabajo electrostático es igual al cambio de energía potencial eléctrica.

-Trabajo magnetostático cuando un campo magnetostático \mathbf{H} , donde está situado el sistema, provoca un desplazamiento externo $V\mu_0 d\mathbf{H}$:

$$\int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_1^2 V\mu_0 \mathbf{H} : d\mathbf{H} = \int_1^2 dE_{pM \text{ ext}}$$

μ_0 - susceptibilidad magnética

V - volumen del sistema

El trabajo magnetostático es igual al cambio de energía potencial magnetostática.

1.7. Trabajo y energía

1.7.1. Relación entre ambos conceptos

Cada una de estos cinco posibles tipos de trabajo externo o extrínseco corresponden al cambio de energía extrínseca o externa. En consecuencia, los procesos que tienen lugar mediante trabajos externos o extrínsecos son independientes de la trayectoria. Sólo dependen de los estados inicial y final del sistema. Es decir, podemos expresar el trabajo externo o extrínseco mediante una diferencial exacta: dW_{ext} , en lugar de δW_{ext} como habíamos escrito para el caso general.

Una manera de expresar la conservación de la energía externa o extrínseca es sumando todos los trabajos externos:

$$dW_{ext} = dE_{kext} + dE_{pext}$$

Si, como hemos visto, la energía total de un sistema puede escribirse como:

$$dE = dU + dE_{kext} + dE_{pext}$$

y si de acuerdo con la 1ª Ley de la Termodinámica, todos los cambios de energía provienen de las transferencias mediante trabajo o mediante calor:

$$dE = \delta W + \delta Q$$

podemos escribir:

$$dU + dE_{kext} + dE_{pext} = \delta W + \delta Q = dW_{ext} + \delta W_{int} + \delta Q$$

De este modo, la primera ley puede expresarse en función de la energía interna o intrínseca como:

$$\boxed{dU = \delta W_{int} + \delta Q}$$

Cabe destacar que esta expresión no indica que otros cambios de energía, cinética o potencial, no tengan lugar o que no se tengan en cuenta. Significa que sólo el trabajo intrínseco que se realiza sobre el sistema interviene en los cambios de su energía interna. Irey et al. (1981) muestran como es posible calcular el trabajo intrínseco en diversas situaciones:

-Consideremos que un sistema, que consiste en una sustancia simple, un gas, un líquido o ambos, está confinado en un cilindro cerrado por un pistón y que realiza un proceso por el que aumenta o disminuye su volumen. Podemos calcular el trabajo realizado para que el sistema pase del estado 1 (p_1, V_1, T_1) al estado 2 (p_2, V_2, T_2) mediante la integral de línea:

$$W_{\text{int}} = - \int_{V_1}^{V_2} p(V, T) dV$$

$p(V, T)$ presión sobre el sistema

dV - Variación del volumen del sistema

-El trabajo realizado sobre un muelle cuando se comprime o se extiende es:

$$W_{\text{int}} = 1/2 k [(X_{s2} - X_{s0})^2 - (X_{s1} - X_{s0})^2]$$

X_{s0} = longitud inicial del muelle

-El trabajo necesario para aumentar la superficie en un dA cuando existe una tensión superficial σ_s viene dado por:

$$W_{\text{int}} = \int_1^2 \sigma_s(A) dA$$

-El trabajo eléctrico para mover una carga eléctrica q en una región con un potencial eléctrico $V(q)$ es:

$$W_{\text{int}} = \int_{Q1}^{Q2} V(q) dq$$

Podríamos añadir otras formas de trabajo intrínseco pero no es necesario. Sólo pretendíamos mostrar que hay diferentes modos de calcular el trabajo intrínseco, el trabajo realizado deformando los contornos del sistema, es decir, el trabajo que puede modificar la energía interna del sistema.

1.7.2. Otras precisiones entorno al trabajo y la energía

1. A pesar de que algunos autores, como Irey et al, distinguen entre trabajo intrínseco y extrínseco o externo, otros autores no hacen tales distinciones. Con mayor frecuencia, los termodinámicos se refieren a la energía de un sistema sólo teniendo en cuenta su energía interna y tratan el concepto de trabajo como el trabajo realizado sobre los contornos del mismo. Mediante este punto de vista $dU = \delta W + \delta Q$ (en lugar de $dE = \delta W + \delta Q$) sin más precisiones. Pensar en los cambios de energía de un sistema termodinámico es pensar en los cambios de su energía interna.

2. Frecuentemente, la primera ley de la Termodinámica se establece a partir del concepto de trabajo adiabático.

En un proceso adiabático, el aumento de energía interna es tanto mayor cuanto lo es el trabajo adiabático δW_{adiab} hecho sobre el sistema. En términos cuantitativos: $dU = \delta W_{\text{adiab}}$ (signo positivo de acuerdo con las actuales normas de la I.U.P.A.C.). Esta expresión no indica que el trabajo adiabático sea la energía interna sino que expresa que la energía interna ha cambiado en un valor que es tan grande como lo es el trabajo adiabático realizado sobre el sistema.

3. Podemos expresar lo anterior de otro modo: trabajo no es energía, no es una forma de energía. Realizar un trabajo es una forma, manera o modo de transferir energía. (Aquí entendemos por transferencia de energía una manera de transmitir energía de un sistema a otro que aumenta la energía interna del receptor y disminuye la de la fuente de energía). Por tanto, el trabajo tampoco es una forma de energía. Inversamente, la energía que, según Warren (1982) es "*una medida cuantitativa de la condición de un sistema*", puede transformarse, transmitirse o ambos mediante el trabajo, lo que no significa que la energía pueda transformarse en trabajo.

Este matiz se expresa en algunos libros diciendo "el trabajo es una energía en tránsito" lo que nos parece una expresión desafortunada ya que puede dar a entender que el trabajo es una energía de algún tipo especial. El trabajo no es una propiedad de un sistema termodinámico como lo es la energía, la realización de trabajo ("working") tampoco. Realizar un trabajo es una manera de transferirla. Además la expresión "energía en tránsito" puede reflejar la idea de que la energía fluye. La concepción "energía como un fluido" será posteriormente examinada.

1.8. Calor

A nivel macroscópico, suele definirse la transferencia de energía que llamamos calor del siguiente modo:

Si tenemos un cuerpo a cierta temperatura y lo ponemos en contacto con otro a temperatura inferior, observaremos las temperaturas se igualan. Decimos que una transferencia de energía desde el cuerpo más caliente al más frío ha tenido lugar. Esta forma de transferencia de energía la denominamos: proporcionar calor (heating).

Suele decirse que un sistema proporciona calor a otro si le transfiere energía como consecuencia de una diferencia de temperaturas entre ellos.

Proporcionar calor, al igual que realizar trabajo, constituye un modo de cambiar la energía interna de un sistema. Es el procedimiento que en inglés se denomina "heating"

También suele decirse que el cambio de energía interna que no corresponde a haber realizado un trabajo adiabático sobre el sistema es debido a haberle proporcionado calor.

$$\delta Q = dU - \delta W_{\text{adiab}}$$

Según Kestin, la cantidad de calor intercambiado (transferido o transmitido) se asocia a procesos entre dos estados de equilibrio pero es independiente de los detalles del proceso. Proporcionar calor puede hacerse mediante tres procedimientos: por conducción a través de un medio material en el que existe un gradiente de temperatura, por convección a través de un fluido con movimiento interno donde existe un gradiente de temperatura y; por radiación entre dos sistemas a diferente temperatura, que consiste en un intercambio de radiación electromagnética sin la intervención de cuerpo material alguno.

A nivel microscópico:

Consideremos un sistema con una energía U_1 en cierto momento. Sus energías cinética y potencial internas tienen cierto valor fijo dependiendo de sus velocidades moleculares y de las interacciones entre sus partículas. Si después de cierto tiempo, en que no se ha realizado trabajo sobre el sistema, el sistema tiene una energía $U_2 > U_1$, podemos decir que ha tenido lugar una transferencia de calor al sistema. Ello implicará un cambio de la energía cinética molecular media y/o de las interacciones moleculares, debido a una nueva distribución. Si tiene lugar un cambio de energía cinética molecular media observaremos un cambio de temperatura. Si ocurre un cambio en las energías potenciales, es decir, en la configuración interna del sistema, puede tener lugar un cambio de estado.

En un proceso de proporcionar calor (o "heating"), la energía del sistema que lo ha proporcionado se distribuye entre todas las partículas del sistema receptor. Por esta razón, es frecuente decir que se ha producido una transferencia desordenada, al contrario de la transferencia de energía mediante trabajo que es una forma ordenada de transferirse la energía. Insistiremos en este punto más adelante.

Al igual que el trabajo, calor no es energía, ni tampoco una forma de energía. Como Atkins (1984) dice: "Es importante darse cuenta que el calor no es una forma de energía: es el nombre de un método de transferir energía".

El calor no es una característica de un estado de un sistema, no es una propiedad. Las transferencias de energía por calor no pueden ser manejadas como una diferencial exacta, es por lo que escribimos δQ .

1.9. Trabajo y calor- Coherencia e incoherencia

Como hemos visto, un sistema termodinámico tiene asociada una energía interna que es la suma de las energías de todas las partículas y las energías de campo consideradas como parte del sistema. Pero, dado que un sistema termodinámico está constituido por un gran número de partículas, es importante analizar distintos aspectos de su movimiento.

Consideremos la energía cinética de un sistema. Si todas las partículas se están moviendo con la misma rapidez y dirección, entonces el sistema se mueve como un todo; se comporta como una partícula y podemos aplicarle las leyes de la dinámica. Pero podemos pensar en lo que ocurre cuando no todas las partículas se están moviendo con el mismo movimiento; el movimiento es caótico. La energía del sistema puede ser la misma que en el caso anterior pero, desde un marco de referencia exterior, no observaremos ningún movimiento ya que las direcciones de movimiento de las partículas son diferentes. Este movimiento incoherente, caótico y al azar se denomina *movimiento térmico*.

Como Atkins (1984) dice: *"Obviamente, ya que no tiene sentido hablar de la incoherencia del movimiento de una sola partícula, el concepto de movimiento térmico no puede aplicarse a partículas individuales. En otras palabras, cuando pasamos de considerar una sola partícula a considerar sistemas de muchas partículas, cuando la cuestión de coherencia pasa a ser relevante, estamos pasando de la Dinámica simple a un nuevo mundo de la Física. Este es el mundo de la Termodinámica"*

Por tanto existen dos tipos de movimiento de las partículas de un sistema compuesto: el movimiento coherente en que todas las partículas van al unísono o el movimiento incoherente en que las partículas se mueven caóticamente.

La idea de coherencia-incoherencia, de orden desorden es muy fructífera a la hora de analizar los procesos. Algunas transferencias de energía, que como hemos visto pueden producirse mediante δW o δQ , pueden explicarse mejor mediante la idea de orden-desorden. Además esta idea permite poner las bases para introducir el concepto de entropía.

A) Cuando se realiza un trabajo reversible sobre un sistema estamos estimulando un movimiento coherente en él. Si un cuerpo se levanta hasta cierta altura o bien se desplaza una cierta distancia horizontal, se están moviendo todas sus partículas con un movimiento coherente. La energía proporcionada queda "almacenada" en la energía potencial gravitatoria o en la energía cinética de todas las partículas, respectivamente. La energía se ha transferido realizando un trabajo.

B) En los sistemas reales, hay siempre fricción y parte del trabajo realizado sobre el sistema se transfiere desorganizando el movimiento a pequeña escala de sus partículas. Esta energía transferida no es "recuperable", es decir, no es capaz de realizar trabajo de nuevo. Se dice que la energía se ha disipado aleatoriamente y esta parte de trabajo no aprovechable se denomina trabajo disipativo. La incoherencia se ha estimulado y así la energía interna ha aumentado.

C) Con mucha frecuencia, cuando proporcionamos calor a un sistema estamos provocando un movimiento incoherente a sus partículas. También cuando un sistema proporciona calor a su entorno está promoviendo un movimiento incoherente en él.

Si un cuerpo se expone a una llama y le transferimos la misma cantidad de energía que en los casos anteriores, su temperatura aumentará pero probablemente el cuerpo no se desplazará. La energía ahora transferida también es "almacenada" como energía cinética y potencial pero las posiciones y movimientos de las partículas son incoherentes. Por esto, generalmente, no hay desplazamiento o movimiento del cuerpo como un todo. La energía se distribuye cambiando el movimiento térmico de las partículas.

Esto es lo que suele ocurrir cuando se transfiere energía proporcionando calor. Pero, en otra ocasiones (ej, máquinas térmicas) también es posible obtener un movimiento coherente a partir de un movimiento incoherente. Es decir, también es posible que un sistema receptor realice trabajo a partir de una fuente de calor.

Es precisamente la 2ª Ley de la Termodinámica la que explicita que sólo parcialmente el movimiento coherente puede transferirse como trabajo. Es decir, hay una gran improbabilidad que todos los movimientos aleatorios de las partículas se transfieran como un movimiento ordenado.

1.9.1. De calor a trabajo

Los últimos anteriores párrafos nos llevan a analizar algunas expresiones usuales: "El calor se ha convertido parcialmente en trabajo". Hablando con precisión debería decirse: Se ha transferido energía proporcionando calor desde una fuente de calor y después, parte de ella se ha transferido realizando trabajo. Por ejemplo, desde el horno de una máquina térmica se transfiere energía por medio de calor (resultante de la combustión) a la caldera. Después, parte de esta energía se transfiere desde del vapor hacia algunos mecanismos realizando trabajo. Al final, los mecanismos de la máquina térmica realizan trabajo sobre sistema externos.

A pesar de que la expresión "el calor se convierte en trabajo" no tiene propiamente sentido, se utiliza con frecuencia y es necesario saber y "traducir" lo que se pretende

decir. Las mismas precisiones son válidas para la expresión "el calor no puede convertirse íntegramente en trabajo". En cualquier caso quisiera resaltar que la palabra "calor" se utiliza aquí para expresar la transferencia de energía desde un cuerpo caliente a otro más frío.

1.9.2. De trabajo a calor

De modo similar la expresión "el trabajo se ha convertido en calor" no tiene propiamente sentido, una manera de transferirse energía no puede convertirse en otra manera. Pero, lo más interesante a resaltar es que en este caso la palabra calor no tiene el mismo significado que en los párrafos anteriores.

Lo que diversos autores tratan de explicar con tal expresión es la situación real en que se realiza un trabajo sobre un sistema y hay un trabajo disipativo. Al realizar un trabajo sobre un cuerpo se induce un desplazamiento, a lo largo del movimiento las fuerzas de fricción con el aire y el suelo, por ejemplo, han dispersado la energía entre las moléculas del aire y del suelo. Mediante la dispersión de la energía, la energía interna del aire, el suelo, la superficie friccionada etc. ha aumentado. Las fuerzas de fricción han producido un aumento del movimiento incoherente o térmico. De este modo, su temperatura ha aumentado y se dice que el "trabajo se ha convertido en calor".

Como hemos dicho, en estos casos la palabra calor tiene otro significado, no indica una manera de transferirse energía, significa un aumento de energía interna. Decir que "el trabajo se ha convertido en calor" hace confundir los conceptos de calor y energía interna. En realidad, sólo al final del proceso el suelo y la superficie friccionada del cuerpo transfieren energía al ambiente por medio de calor, a fin de igualarse las temperaturas.

1.9.3. Usos del nuevo significado de "calor"

A pesar de los equívocos que provoca, este nuevo significado del término calor se utiliza en bastantes ocasiones. Por ejemplo, al referirse a la energía cinética y potencial de una pelota que cae. Después de algunos rebotes, se dice que su energía inicial se disipa o convierte en calor.

Desde un punto de vista microscópico, una pelota cayendo equivale a un conjunto de átomos moviéndose coherentemente. (Además, los átomos poseen cierta energía en virtud de su movimiento térmico, la pelota está a cierta temperatura)

Cuando la pelota llega y golpea al suelo, se transfiere energía entre las partículas de la pelota y las del suelo (y entre los átomos de cada uno). Como resultado, las partículas

cambian su dirección y la pelota vuelve a subir. Su energía cinética se convierte en energía potencial. Pero, en un choque inelástico no toda la energía cinética que tenía inicialmente la pelota, se mantiene dando lugar a un movimiento coherente. Durante la colisión, muchas partículas se acercan las unas a las otras en direcciones que forman ángulos bien diferentes, así el movimiento se modifica en direcciones aleatorias.

Después de cada rebote de la pelota, el movimiento coherente de sus partículas se ha degradado más en movimiento térmico de sus partículas y de las partículas de su entorno. Después de cada rebote, la pelota y el suelo tienen una temperatura mayor ya que la colisión ha aumentado el movimiento térmico a expensas del movimiento coherente. Al final, todo el movimiento coherente inicial se ha degradado en movimiento incoherente distribuyéndose uniformemente en el resto del universo. Dado que la pelota, el suelo y el aire están más calientes suele decirse que la energía cinética o la energía potencial gravitatoria inicial se han convertido en calor. Es necesario puntualizar que en este caso, el calor no se ha proporcionado como en el primer caso: contacto con un cuerpo a diferente temperatura. La palabra calor se utiliza como sinónimo de energía interna, del mismo modo que cuando se dice que el trabajo se ha convertido en calor.

En realidad, si bien la energía interna de la pelota, el suelo y el aire han aumentado ya que el movimiento incoherente ha aumentado, no se ha proporcionado calor como en el primer caso, aunque a nivel microscópico el resultado sea el mismo. En este caso, al final del proceso, cuando la pelota ya está en reposo en el suelo, la pelota y el suelo proporcionan calor al entorno a fin de igualarse las temperaturas.

(En el suelo: debido a la colisión se transmite una onda de compresión a través de las partículas del suelo. Esto provoca la colisión entre unas partículas y las otras y su movimiento se transmite en direcciones al azar. Esta es la razón por la que su movimiento no es más que movimiento térmico.

En el aire: similar suerte corre la onda de compresión a través del aire del entorno).

1.10. ¿Trabajo o calor?

El uso de la palabra calor como energía interna debería ser rechazado. Tendría que hablarse de la energía interna del sistema y no puede decirse el calor de un sistema.

Como hemos dicho repetidamente, hay que distinguir entre energía interna y los dos modos de aumentarla o disminuirla. Pero la distinción entre trabajo y calor no es siempre clara. Kestin (1979) dice: *"Es cierto que en muchos casos la distinción entre calor y trabajo puede establecerse sin ambigüedad, pero es posible indicar fenómenos en que esto no sea cierto...Dado que el límite del sistema se traza arbitrariamente para cada proceso, ha de esperarse que un cambio en el límite, incluso si es esencial desde el punto de vista de la descripción, pueda provocar cambios en la naturaleza de la interacción a través de él. Lo que aparece como trabajo con respecto a un límite con frecuencia puede pasar a ser una transferencia por calor con respecto a otro."*

Podemos mostrar dos ejemplos de esta ambigüedad:

- Una pieza de metal que se calienta golpeándola
- El café en un termo que se calienta agitándolo.

A) Cuando un martillo golpea una pieza de metal, la primera transferencia de energía puede describirse como una transferencia de trabajo ya que la energía se transfiere desde un sistema ordenado. El impacto comprime y distorsiona el metal. El orden en el cuerpo exterior se transforma, justamente en orden interno, como energías cinéticas y potenciales de las partículas de la región impactada. Después de la distorsión, el metal envía ondas elásticas, vibraciones de los átomos, etc.... Mediante estos movimientos internos muy complicados, se estimula el desorden y la incoherencia y, la energía pasa a ser disipada aleatoriamente. Desde un punto de vista macroscópico, el aumento del movimiento incoherente y caótico se constata por un aumento de temperatura. Es por ello, que algunos explican este cambio como una transferencia de calor. Pero llamar a esta última transferencia como transferencia por calor y ya no transferencia por trabajo es arbitrario. Las simples categorías como transferencia de trabajo y transferencia por calor realmente no se acoplan a todas las situaciones.

B) Podemos comprobarlo en el caso de un termo con café. Sabemos que agitándolo podemos aumentar su temperatura. El movimiento ordenado de las partículas del líquido se va poco a poco difundiendo, disipando en un movimiento desordenado. Se ha hecho un trabajo al agitar y, no hay una transferencia de calor en el sentido de una interacción térmica con una fuente más caliente. Pero si en el caso anterior, puesto que hay un

cambio de coherencia a incoherencia, se denominaba transferencia de calor, es contradictorio no utilizar las mismas palabras en el presente caso.

Por lo tanto hemos de ser muy cuidadosos al utilizar las palabras calor o trabajo en lugar de energía interna aunque, no podamos ser siempre precisos al utilizar calor en lugar de trabajo o viceversa. Es mejor utilizar la idea de coherencia-orden o incoherencia-desorden para explicar los procesos.

1.11. ¿Energía como un fluido?

La dificultad de conceptualizar la energía reside en el hecho que la energía no es tangible ni material; tiene una entidad abstracta a pesar de que a menudo parece conferírsele una existencia concreta.

A lo largo de la historia se ha planteado en muchas ocasiones una sutil cuestión: ¿puede la energía ser tratada como un fluido?

La idea del calórico fue útil durante la evolución de la calorimetría. Pero tuvo que rechazarse porque tal "fluido" no tenía peso, era imposible fijar una determinada cantidad a cada cuerpo y era posible producirlo en cantidades tan grandes como se quisiera. Pero el rechazo del fluido calórico no fue acompañado de un rechazo general a considerar la energía como una "cosa".

J.Kestin (1979) demuestra que al ser la energía un potencial no puede considerársele como un fluido sin peso como frecuentemente se hace. Dice: *"Al pensar en la energía estamos instintivamente inclinados a considerarla como una clase de fluido sin peso que se conserva en su totalidad cuando diferentes sistemas interaccionan entre sí o realizan un trabajo uno sobre el otro. En realidad, una gran parte de la imagen de nuestra imaginación es falsa y, al ser contradictoria sobre el conocimiento sobre la energía puede confundirnos"*.

Pero esta concepción está profundamente arraigada y la encontramos en múltiples textos. Podemos ver un ejemplo de un libro de texto a nivel no elemental: *"...la energía fluye espontáneamente desde un sistema a otro... este movimiento espontáneo se llama un flujo de calor. La palabra calor es simplemente un nombre dado a la energía interna cuando consideramos la energía como desordenada y libre para moverse de una parte a otra del sistema..."* (Waldram 1985).

Para decidir si la energía puede considerarse como un fluido hemos de saber si es posible definir su velocidad y su densidad. Densidad de energía es una manera de dar nombre a la energía asociada con cada unidad de volumen de un cuerpo, campo o región ya que la energía es una propiedad extensiva. Decimos que la energía está localizada cuando la energía asociada a un sistema se transfiere a un sistema B se suele hablar del flujo de energía desde A a B. De la misma manera cuando la energía asociada a A cambia porque se ha transferido energía a él, se suele decir que ha habido un flujo de energía a A. Es por esto que la rapidez de cambio de la energía de un sistema, es decir, la rapidez con que la energía asociada a A se transfiere a un sistema B se denomina a veces el flujo de energía desde A a B.

Desde el electromagnetismo, se define densidad de energía y velocidad del flujo de energía electromagnética. Pueden consultarse definiciones precisas a partir de Feynmann (1972).

En realidad, disponemos de instrumentos para medir la energía que se localiza en un punto del campo. Hay instrumentos para medir \mathbf{E} y \mathbf{B} . El flujo de energía viene dado por el vector de Poynting: $\mathbf{S} = \epsilon_0 c^2 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$, la densidad de energía se calcula mediante $\epsilon_0 (\mathbf{E}^2 + c^2 \mathbf{B}^2)$ y la velocidad del flujo por:
$$\frac{2c^2 \mathbf{E} \times \mathbf{B}}{\mathbf{E}^2 + c^2 \mathbf{B}^2}$$

La densidad de energía no cambia cuando cambiamos el marco de referencia y es posible fijar un cero absoluto para la energía electromagnética. Así, desde el electromagnetismo, es posible hablar de la energía absoluta de la misma manera que podemos hablar de la masa absoluta. El flujo de energía electromagnética posee realidad física en el sentido de que es mensurable.

Feynmann incluye la energía de los campos para generalizar la conservación. Dice: *"Está claro que la energía de la materia no se conserva...La teoría de la conservación de la energía es incompleta si no consideramos la energía asociada al campo electromagnético"*.

Si la energía asociada al campo electromagnético puede tratarse como un fluido, ¿podemos hacer lo mismo para la energía asociada con la materia?

¿Podríamos hablar de la energía que fluye hacia un sistema, del flujo de energía, cuando hablamos de la realización de trabajo o de proporcionar calor- las dos maneras de transferirse energía?

La primera ley habla de la energía que entrando o saliendo del sistema aumenta o disminuye su energía interna. Esta es la razón por la que Bridgman (1941) considera que, para un región de tamaño unidad y para un intervalo de tiempo unidad, dQ puede escribirse como un vector flujo: $dQ = - \text{Div } \mathbf{q}$, donde \mathbf{q} es el vector flujo de calor. Para calcular \mathbf{q} *"es necesario determinar el gradiente de temperatura en cualquier punto de un lugar a otro de la superficie de contorno y después calcular el flujo de calor combinando el gradiente con la conductividad térmica del material, que habremos determinado mediante algunos experimentos preliminares independientes y adecuados"*.

Después de varias disquisiciones, Bridgman considera que tiene sentido físico escribir la primera ley en términos del vector flujo de calor.

Quizá algo similar podría escribirse al considerar la energía que entra al sistema mediante trabajo: "el dW de nuestra formulación de nuestra ley es el flujo neto hacia la región de "energía mecánica", o, si escribimos la primera ley para una región de tamaño unidad y para un intervalo de tiempo unidad, dW pasa a ser $\text{Div } \mathbf{w}$ donde \mathbf{w} es el vector flujo de

energía mecánica, o el vector de Poynting generalizado". (Bridgman explica que su empleo de la palabra "mecánico" simplemente significa no térmico, puede incluir parámetros eléctricos, magnéticos y otros. También se disculpa del anacronismo de la nomenclatura "energía mecánica"). Intentando ir más allá, Bridgman busca cual podría ser la densidad de energía y la velocidad del flujo cuando la energía se transfiere realizando trabajo. Aparecen muchos problemas. La velocidad del flujo resultante depende algunas veces del marco de referencia. Además, la densidad de energía resultante es negativa. En definitiva, acaba diciendo: *"El flujo de energía mecánica no puede ser completamente paralelo al flujo de materia, porque es imposible analizar en general el flujo de energía en dos factores, uno de los cuales tenga todas las propiedades de una velocidad. Nuestra necesidad de tratar la energía mecánica como una cosa es una necesidad verbal, de valor dentro de ciertos límites, pero capaz de confundir e incluso llevar a falsas conclusiones más allá de estos límites"*.

Cuando tratamos de hablar de un flujo de energía generalizada ($dE = \delta W + \delta Q$) hay también algunos problemas. Así pues, Bridgman afirma que: *"No es posible en general analizar un flujo de energía en dos factores, uno de los cuales tenga todas las propiedades de la densidad de una cosa material y otro que tenga todas las propiedades de la velocidad de la velocidad de una cosa material"*.

Quizás la teoría de la relatividad nos podría llevar a asimilar el flujo de masa al flujo de energía, es decir, postular la equivalencia masa-energía. La interconvertibilidad de masa y energía ha permitido tener un valor único para la energía de un sistema en cualquier marco de referencia. La energía total de un sistema es simplemente proporcional a su masa total ($E=mc^2$). Las variaciones de energía, que son el tema de la termodinámica, quedan reflejados en cambios de la masa y pueden ser determinados experimentalmente ($\Delta m = \Delta E / c^2$).

Pero el concepto de energía tiene su sentido sólo en los procesos, cuando estamos interesados en hacer una transición desde una configuración a otra. Bridgman puntualiza *"Es cierto que, los aspectos del proceso de transición que nos interesa pueden estar sólo conectados con mediciones hechas únicamente en las configuraciones inicial y final, y podemos, si así lo deseamos, decir de forma abreviada que estas mediciones inicial y final son medidas de la energía. Pero no debemos olvidar que es solo una forma abreviada, y que, a diferencia de la masa, ninguna medición única de la energía tiene sentido por sí misma, sino que adquiere sentido solamente cuando se combina con una segunda medición similar"*.

Bridgman concluye: *"Cuando consideramos la imagen completa de la energía es bastante híbrida e indefinida querer establecer un paralelismo con cosas materiales ordinarias. Por tanto no deberíamos intentar hacerlo. Pero pienso que muchos físicos sienten la innegable tentación de establecer este paralelismo. La tentación pienso que es en origen solamente verbal. Sugeriría que la tentación fuese completamente evitada mediante otro artilugio verbal. Si en lugar de hablar de "energía" uno siempre dijera "función de energía", pienso que muchas implicaciones del punto de vista convencional se evitarían".*

1.12. Transferencias de energía.

Una de las expresiones acerca de la energía más usuales en los libros de texto es transferencia de energía.

Transferencia de energía es el paso de energía desde un sistema A a un sistema B. Es decir, la energía asociada a un sistema A o a una configuración del sistema A, pasa a ser energía de un sistema B u otra configuración del sistema A.

Con esta idea general es posible referirse a dos conceptos distintos:

a) Transferencia de energía es todo tipo de intercambio de energía entre dos sistemas. Podríamos decir que una transferencia de energía se considera como un desplazamiento o transmisión o movimiento de energía desde un sistema a otro.

Este es el sentido que se da a transferencia de energía, cuando se dice:

Por medio de ondas la energía del sol se transfiere a las plantas o, cuando se dice: la energía de un ciclista pedaleando se transfiere a la lámpara de la bicicleta.

b) Otra manera de entender transferencia de energía:

Transferir energía a una partícula significa cambiar su energía cinética o potencial o ambas. Sólo puede conseguirse realizando un trabajo sobre ella. Como hemos visto en una partícula $dE = dE_k + dE_p$.

Transferir energía a un sistema significa cambiar su energía realizando un trabajo sobre él o proporcionándole calor. Como hemos visto $dE = \delta W + \delta Q$. (Sabemos también que $dE = dU + dE_{k\ ext} + dE_{p\ ext}$). La energía asociada al sistema que la transfiere puede después asociarse al sistema receptor.

Si la transferencia tiene lugar por medio de un trabajo externo y no hay disipación, el sistema se comporta como un todo en movimiento (desplazamiento o rotación etc...). Es decir su energía cinética o potencial (gravitatoria, electrostática, etc...) cambiará.

Si la transferencia tiene lugar proporcionando calor, la energía se distribuye entre todas las partículas y no observaremos más cambios externos que los que resulten de un aumento de energía interna, excepto en los casos en que parte del movimiento incoherente se transforma en movimiento coherente (caso de máquinas térmicas).

Varios ejemplos pueden ilustrar el uso de "transferencia de energía" en este sentido:

La energía de la pila se ha transferido al motor que ahora gira.

La energía del motor se ha transferido a algún aparato y ahora funciona.

La energía de las olas del mar se ha transferido a la costa y la ha erosionado.

La energía del sol se ha transferido a un fotómetro y permite indicar la intensidad de la luz en una habitación.

La energía del agua procedente de una bolsa de agua caliente se ha transferido a las sábanas.

Un objeto a cierta altura, un objeto en movimiento, un objeto suspendido de un muelle, un reactivo capaz de llevar a término una reacción útil (como en una pila), un objeto más caliente que los de su entorno, etc... son objetos capaces de transferir energía en el sentido dado ahora a estas palabras. Es decir, pueden realizar trabajo o proporcionar calor. Muchos otros sistemas pueden transferir energía como una máquina de vapor, un motor eléctrico, el cuerpo de un animal, etc... A este tipo de sistemas algunos autores les denominan fuentes de energía.

Las dos anteriores concepciones de "transferencia de energía" no son equivalentes. La primera (a) no tiene en cuenta como la energía puede ir o moverse desde un sistema a otro. En esta concepción, a menudo la energía se contempla como un fluido que va de un lugar a otro sin saberse como. Lo único que interesa es que un sistema ha aumentado su energía mientras otro la ha disminuido: sólo las manifestaciones de la energía se tienen en cuenta. Sólo podemos aceptar tal uso de "transferencia de energía" para estudiantes a niveles iniciales como una forma abreviada de referirse a la cadena de transferencia de energía en un proceso. Pero debemos ser muy cautos, insistimos, porque en esta versión la energía puede concebirse como un fluido que va de un lugar a otro como el agua en una tubería, en lugar de una propiedad de cada estado de un sistema.

La segunda concepción (b) considera que la energía puede transferirse según dice la primera ley mediante δW o δQ .

Sólo hay dos maneras de transferir energía pero hay diversos procedimientos para conseguirlo. Corriente eléctrica, mecanismos de transmisión de movimientos, combustión, radiación, cambios químicos, etc... son modos de obtener estos δW or δQ .

Podemos ver en el Anexo a capítulo 1, algún ejemplo que evidencia esta segunda concepción.

1.13. ¿Formas de energía?

La expresión "forma de energía" es bastante usual y debemos preguntarnos qué significa exactamente y cómo se usa.

Si hablamos de formas de algo estamos implícitamente diciendo que algo de alguna manera existe y puede tener distintas formas. Así, si escribimos o hablamos acerca de formas de trozos de madera o trozos de plástico o de algo, estamos suponiendo que algunos objetos materiales pueden cambiar de forma o de tamaño. Por tanto la expresión forma de energía puede concebirse como una cualidad del fluido denominado energía ya que si tenemos una "idea calórica" hablaremos de formas o de flujo o etc....

Puede argumentarse que cuando se dice forma de energía, la energía no se concibe como una sustancia sino como una propiedad. A pesar de ello, debemos darnos cuenta que la expresión formas de energía es consistente con el modelo de energía como un fluido, con la idea calórica.

Podemos preguntarnos por qué se encuentra tal expresión si la idea calórica no se acepta. Cuando se observan manifestaciones de la energía asociadas a procesos eléctricos, químicos, elásticos (una lámpara ilumina, un cambio químico desprende gases, etc...) se suelen designar diferentes calificativos a la energía: energía eléctrica, energía química, etc.... También, cuando analizamos procesos en un sistema debido a interacciones eléctricas, químicas, elásticas, etc... y tenemos que escribir algunas ecuaciones o realizar algunos, cálculos solemos separar los términos de la energía correspondientes a las diferentes partes; así por ejemplo tendremos un término procedente de la contribución eléctrica, un término de la parte química, etc.... Es decir, los diferentes nombres dados a la energía no son más que una forma abreviada para describir los términos utilizados en las ecuaciones. ¿Cómo podríamos llamarles? Si los designamos como componentes de la energía es equívoco, si los denominamos formas de energía parece indicar que la energía es un fluido que existe y puede cambiar su forma o tamaño. Este es el problema y por tanto debemos ser muy cuidadosos utilizando tal expresión.

Vista, cuán equívoca es la expresión "formas de energía" y teniendo en cuenta que es sólo una forma abreviada de hablar de sus manifestaciones o de sus cálculos, podemos analizar el significado de diversos nombres que se dan a la energía.

Para una partícula

Hemos visto que sólo podemos asignar dos formas de energía a una partícula: una debida a su velocidad y otra debida a su posición con respecto a ciertas referencias del campo conservativo en que está inmersa. Es decir, dos parámetros que determinan el estado de una partícula son los que determinan las dos formas de energía: cinética y potenciales. Aunque existe un solo tipo de energía cinética, existen diversos tipos de energía potencial: energía potencial gravitacional, energía potencial electrostática (con frecuencia llamada energía eléctrica, un nombre impreciso que se confunde con energía electromagnética cuando hay movimiento de cargas) etc

Para un sistema

De nuevo nos situamos en el punto de vista de que todo sistema está constituido por partículas. Así, existen sólo dos formas de energía: cinética y potencial.

Cuando analizamos sistemas con gran número de partículas (átomos, moléculas, etc) y consideramos procesos a nivel macroscópico, es frecuente utilizar diferentes nombres a pesar de que que ésto no suponga que exista alguna interacción o campo en especial.

De esta manera, por ejemplo, el nombre de *energía química* indica los intercambios entre energía cinética y energía potencial electrostática de las partículas reaccionantes. Es pues un nombre para designar los cambios de energía interna del reactivo.

De forma similar, se creó el nombre de *energía elástica*. Como Alonso et al.(1979) explican, cuando un objeto, colgado del extremo de un muelle, oscila podemos observar cambios de energía cinética. Interpretamos los cambios de energía cinética del objeto como intercambios de energía con el muelle. Estos provienen del trabajo de las fuerzas intermoleculares que inducen un desplazamiento, respecto sus posiciones relativas, en las moléculas del metal del muelle cuando se estira o se comprime. (Las fuerzas intermoleculares tienen esencialmente un origen eléctrico, de manera que es posible hablar de la energía potencial electrostática). En un sentido macroscópico y para simplificar el lenguaje se dice que hay un continuo intercambio entre la energía cinética del objeto y la *energía elástica* del muelle.

En otras ocasiones, los calificativos que recibe la energía tienen un significado ambiguo o un significado que personas diferentes entienden de forma distinta. Podemos así citar los nombres de energía mecánica, energía calorífica o energía térmica. Algunos confunden energía mecánica con trabajo o con energía cinética. Otros consideran que la energía

mecánica es el resultado de sumar las energías cinética y potencial. Otros se refieren a la energía mecánica cuando expresan los intercambios de energía entre mecanismos, máquinas o, en general, objetos en movimiento.

Algo similar ocurre con la expresión energía calorífica o térmica. Para algunas significa energía interna. Otros utilizan estos términos cuando se refieren al proceso de transferencia de energía de proporcionar calor. Otros consideran que energía térmica o calorífica es lo mismo que calor. Otros dan este nombre a la energía cinético-molecular media, etc.

¿Qué significa energía luminosa? ¿Se trata de energía electromagnética ya que las ondas de la luz corresponden a campos eléctricos y magnéticos desplazándose? ¿Se trata de una señal visible de un objeto incandescente? ¿Cuáles son las diferencias con los términos energía radiante o energía calorífica, por ejemplo, en una lámpara?

Los calificativos que recibe el término energía son diversos y las maneras de clasificar la energía corresponden a distintos criterios. Podemos preguntarnos por el sentido de utilizar en una misma frase nombres procedentes de diversos criterios de clasificación.

1.14. Transformación de la energía

Es frecuente leer u oír: la energía se ha transformado. Es frecuente porque se considera que hablar de transformación de la energía ayuda a asimilar la idea de conservación.

Como la raíz del nombre indica, una transformación indica un cambio de forma. Así propiamente, transformación de la energía significa que la energía pasa de una forma a otra. ¿Se asume que la energía tiene diferentes formas?

Algunos autores sólo aceptan dos formas de energía (E_k , E_p) o, si se prefiere, tres, incluyendo la energía interna. En esta perspectiva la expresión "transformación de la energía se usa raras veces (sólo en el caso de una partícula que se mueve en un campo conservativo). En cambio se suele hablar repetidamente de las transferencias de energía.

Otros autores consideran que los efectos de las transferencias de energía son tan distintos que es útil dar un nombre a cada uno de ellos. De este modo, aparecen incontables nombres para designar la energía. Se asocia un nombre a cada sistema que transfiere energía y otro, a cada sistema receptor. Con frecuencia el procedimiento o proceso a través del que la energía se transfiere recibe también otro nombre. El uso de un nombre concreto u otro depende del contexto.

Así por ejemplo, en el caso de una pila conectada mediante un cable eléctrico a una bombilla se suele decir: "La energía química de la pila se ha transformado en energía eléctrica y ésta en energía luminosa o calorífica en la bombilla" o también, insistiendo en lo equívoco de los nombres: "La energía eléctrica de la pila se ha transformado en energía luminosa o calorífica en la bombilla"

En cambio, en el primer enfoque se diría: "La energía de la pila se ha transferido a la lámpara mediante una corriente eléctrica". Es una frase más clara porque entendemos sin ambigüedades el significado de cada uno de los términos. La energía asociada a la pila podrá asociarse a la bombilla después de la conexión. En este enfoque suele hacerse referencia a las cadenas energéticas.

No podemos olvidar que la expresión transformación de la energía es muy frecuente y la persistencia del lenguaje es muy fuerte. Por tanto, debemos definir el sentido que deseamos que los alumnos den a estos términos. Adoptaremos la siguiente idea: Transformación de la energía significa el cambio de energía de un sistema desde un estado 1 a un estado 2 que lleva consigo un cambio de energía en sí mismo u en otro sistema.

Por ejemplo, cuando se dice que la energía potencial de una piedra se ha transformado en energía cinética, significará que la piedra tenía una energía asociada en virtud de su posición en el campo gravitatorio y que después le asociamos una energía debido a su velocidad.

En el caso de la pila, antes citado, cuando se dice que "la energía de la pila se ha transformado en energía calorífica en la bombilla y en el aire que la rodea", significará que la energía asociada a la pila en virtud de la interacción de las partículas de sus componentes puede, después, asociarse a la bombilla y a su entorno, debido a que la bombilla alumbra y el aire que la rodea ha aumentado su temperatura. Podemos observar cambios en la bombilla y en el aire que la rodea que permiten asociarles un mayor valor de su energía. Se dice que la energía ha cambiado. Por tanto, nuevas manifestaciones de la energía nos permiten asociar energía a nuevos sistemas. Este sería el significado de transformación de la energía.

(Una mención especial requeriría la expresión "la energía mecánica se ha convertido en calor" pero ya ha sido analizada anteriormente).

1.15. Conclusiones

Las anteriores páginas nos hacen ver que el concepto de energía es complejo de comprender y de enseñar

La energía es un concepto único, no es comparable a nada. Pero, para referirnos a la energía hemos de utilizar nuestro lenguaje, para hacerla comprensible necesitamos hablar de alguna manera. Por ello utilizamos metáforas o analogías y es extremadamente difícil encontrar analogías que sean adecuadas, todas son imperfectas. No tenemos ningún concepto cotidiano o técnico que tenga todas las propiedades de la energía. Todo tipo de lenguaje cotidiano provoca equívocos.

Una de las analogías es la de referirse a "fluido de energía". Es comprensible y muchos autores, al igual que Feynmann, utilizan el término flujo de energía y en el seno de algunas frases es correcto pero hay otras implicaciones de la palabra flujo que no son aplicables a la energía. Es pues, extremadamente difícil ser consistente y preciso en todo momento. Si, como hemos analizado, Feynmann, Wadhram y otros autores muestran inconsistencias, no es de sorprender que nuestros estudiantes sean también inconsistentes.

Las puntualizaciones, hechas en párrafos anteriores, acerca de transferencias, transformaciones y formas de energía pueden tener poco interés para la enseñanza de la Física a niveles superiores pero es importante llenar de significado las palabras y los ejemplos que suelen utilizarse para la enseñanza de la Física a los principiantes. En definitiva, será la formación que se les ha dado en los primeros niveles, la que les servirá de base para acceder a niveles superiores.

Como profesores nos corresponde ser muy cautos en el momento de seleccionar las palabras y las frases. De otro modo, nuestros estudiantes reflejarán la dificultad de la temática unida a la imprecisión del lenguaje.

Capítulo 2

ESTUDIOS RELATIVOS A LA COMPRESION DE CONCEPTOS IMPLICITOS EN LA 1ª Y LA 2ª LEYES DE LA TERMODINAMICA

2.1. Acerca de la enseñanza de la Energía

La Ciencia ha encontrado en las invariancias un pilar fundamental sobre el que asentar muchos otros conocimientos. Como es de todos sabido, una de las invariancias es la energía. La conservación de la energía constituye un eje central en la estructuración teórica de la Física. Su comprensión y asimilación son imprescindibles para edificar buena parte del cuerpo de conocimientos científicos.

Desde otra perspectiva, la necesidad de concienciación de la población sobre la limitación de recursos energéticos fósiles ha sido una preocupación sentida desde sectores muy diversos.

Ambos aspectos han confluído en la necesidad de profundizar acerca de la enseñanza del concepto de energía desde los primeros niveles de instrucción. Así, por un lado tenemos desde la Física apreciaciones como la de Sexl: (1981): *"Es la constancia de la energía total a lo largo de un proceso complejo lo que motiva la introducción de este concepto físico (energía) y no una conexión más o menos directa con la experiencia"*.

Mientras desde otros sectores se recurre a la idea de la necesidad del concepto de energía para la formación de todo ciudadano: *"Quizás uno de entre 100 se graduará en Física pero todos pagarán facturas de combustibles y vivirán en un mundo ensombrecido por constantes problemas energéticos"* (Richmond 1982). Algunas investigaciones y propuestas didácticas se han realizado en esta línea (Boyes, 1990).

2.2. Interés por el aprendizaje

Desde distintos campos (Psicología, Pedagogía, Biología. Inteligencia artificial etc) se está buscando respuesta a los diversos interrogantes que el aprendizaje plantea: cómo se

produce el aprendizaje, cómo se obtiene y procesa la información concebida, qué circunstancias individuales, escolares y sociales favorecen el aprendizaje, cómo se producen diversas formas de razonamiento, etc....

Diversas son las soluciones que se apuntan e intensos los debates para encontrar teorías coherentes. No es éste el lugar para profundizar en ello pero cabe señalar que este trabajo de investigación parte de una visión constructivista del aprendizaje.

Desde la última década es comunmente aceptado que los niños, tienen ideas sobre diversos temas de Ciencias desde temprana edad y antes de cualquier aprendizaje formal sobre ellos. Estas ideas, a menudo diferentes de las sostenidas por la comunidad científica, pueden permanecer inalterables y no sentirse influidas por los cursos de enseñanza (Osborne, Wittrock 1985).

Claxton (1984) a partir de la "Teoría del constructo personal" de Kelly (1955), propone que las acciones e intuiciones de cada individuo provocan sus explicaciones y descripciones acerca del mundo. Así, considera que las ideas de los niños forman un conjunto de "miniteorías" que suponen sus intentos de dar sentido a cada una de sus experiencias particulares. Cada miniteoría sería apta para explicar algún suceso, proceso o fenómeno pero no habría interconexión entre distintas miniteorías.

Para que se produzca un aprendizaje es necesario que las ideas previas se modifiquen y reorganicen a fin de que construyan un nuevo significado de lo que se lee, se escucha o se ve. Para ello tienen que generarse unas relaciones entre los conocimientos previos y los estímulos que se reciben. (Osborne 1963, Wittrock 1985). Como decía Kelly (1963), *"el desarrollo conceptual puede contemplarse como un proceso creativo continuo de diferenciación e integración de dominios conceptuales locales"*.

Si un concepto puede concebirse como una generalización de un gran número de diversos enunciados singulares, habrá que considerar cómo es posible este proceso. Para Black y Harlen (1991), el aprendizaje de un concepto requiere fundamentalmente dos tareas: categorización y transformación. *"Cuando intentamos comprender fenómenos o resolver problemas necesitamos relacionar la nueva información, sobre los fenómenos o problemas, con los conceptos existentes"*. Mediante el término categorización Black y Harlen entienden *"el modo mediante el que un objeto particular o un problema se considera un caso particular de cierto concepto específico"*. Cada nueva información necesita incluirse en una categoría ya existente en nuestra mente.

Con el término transformación indican cómo hay que manejar tal concepto para hacer predicciones, decidir cómo tratar el objeto o fenómeno o buscar procedimientos para resolver el problema.

2.3. Investigaciones con respecto a las asociaciones con el concepto de energía

Si por un lado los científicos están interesados en macroteorías que permitan explicar una amplia variedad de fenómenos y, por otro, lado los alumnos llegan a las aulas con diferentes miniteorías acerca de fenómenos relacionables, habrá que buscar cómo se opera este cambio. Para poder ayudar a relacionar ideas inconexas, es decir, para favorecer a la categorización, es necesario previamente conocer cuales son tales ideas.

A este propósito han dedicado su esfuerzo diversos investigadores. Duit (1981) en Alemania, administró a 84 alumnos entre 12 y 13 años un cuestionario sobre trabajo, energía, potencia y fuerza. Una parte del cuestionario consistía en escribir palabras asociadas con energía. Un 20% de los alumnos incluía la palabra fuerza entre sus respuestas, un 10% mencionaba la "crisis energética", una tercera parte las centrales eléctricas y la palabra más frecuentemente asociada a energía era "corriente".

Pero para conocer con qué conceptos se asocia el término energía no siempre resulta adecuado preguntar por palabras asociadas a energía. La elección de unas u otras palabras está muy influida por la lengua y el significado que se les da no tiene connotaciones idénticas en lenguas distintas, como el propio Duit reconoció y comprobó. Después de diversos estudios posteriores, Duit (1983) llegó a la conclusión que para los alumnos sin formación previa que usan el alemán como lengua cotidiana, energía significa un tipo general de combustible usado principalmente para aplicaciones técnicas. Energía y corriente eléctrica se conciben como íntimamente relacionados. Sin embargo, la asociación energía y fuerza es menos frecuente de lo que otros estudios revelan y aún es menor la asociación entre energía y alimentos o los seres vivos en general. ¿El papel del lenguaje cotidiano influye poderosamente en las concepciones de los alumnos sin formación teórica?

Solomon (1983) diseñó un cuestionario escrito para conocer cuales eran las ideas previas con las que los niños británicos empezarán su aprendizaje sobre la energía. Su cuestionario fue administrado a 459 niños británicos de 11, 12 y 13 años. Se les preguntaba por el "significado de energía" y se les instaba a que escribieran 4 frases que incluyeran el término energía. Las respuestas de los niños fueron clasificadas de acuerdo con la asociación que realizaban con el término energía.

1ª Asociación de energía con los seres vivos, especialmente seres humanos. Concepción vitalista.

2º Asociaciones con sistemas no vivos: electricidad, combustibles, máquinas, aplicaciones domésticas, recursos energéticos. Concepción tecnicista.

3º Grupo que incluía enunciados universales acerca de energía (entendiendo por tales los que se referían a "todo", "todas las cosas", etc...). Concepción universalista.

Una de las preocupaciones de Solomon era constatar si había una evolución con la edad y con el sexo desde las concepciones vitalistas hasta los más generales o universales.

El mismo modelo de cuestionario se ha utilizado para una parte de la presente investigación pues era interesante constatar las diferencias y similitudes entre las respuestas de grupos de niños británicos y de niños en Cataluña. ¿Lenguas o culturas distintas condicionan los resultados? Por otro lado no era la preocupación de Solomon y en cambio sí lo era de la autora el conocer si las ideas previas nos permitían una clasificación de los alumnos y si esta clasificación se mantenía después de la instrucción.

También Watts en 1983 realizó un estudio sobre las preconcepciones de los niños previos a toda enseñanza sobre energía. Su trabajo consistió en 40 entrevistas a alumnos de Londres con edades entre 14 y 18 años. Se les preguntaba las razones por las que había o no energía en una serie de situaciones que ciertos dibujos presentados mostraban. Watts etiquetó las concepciones de los alumnos según el modelo de energía que, a su parecer, utilizaban. Su clasificación ha sido utilizada posteriormente por distintos investigadores (Ault, Trumper, ...) aunque algunas veces recibiendo fuertes críticas (Bliss 1985).

Watts consideraba que *"las ideas y significados que los niños dan a ciertas palabras no son simplemente errores conceptuales aislados sino que forman parte de un complejo entramado que les permite una explicación coherente del mundo"*. A estas concepciones estructuradas las llamó "alternative frameworks". Watts clasifica en 7 *"alternative frameworks"* las respuestas de los niños:

1. Modelo antropocéntrico: la energía se asocia a los seres humanos. Modelo en que se trata a los objetos como si tuvieran cualidades humanas.
2. Modelo de depósito: la energía está almacenada en el interior de los objetos y es su fuente de actividad. Los alumnos consideran que los objetos tienen energía o la necesitan para su actividad. Es la causa de que ocurran las cosas.
3. Energía como ingrediente del interior de los objetos o de las situaciones que necesita de una situación concreta para que se libere.
4. Energía como una actividad, por ejemplo, el movimiento.
5. Energía como un producto resultante de una situación de un proceso.
6. Energía como funcional, es decir, como una especie de combustible muy general útil para las aplicaciones técnicas y solo necesaria para hacer la vida más confortable.
7. Modelo de transferencia-flujo de energía. La energía es un fluido que se puede transportar, conducir, etc....

Los tipos de concepciones que propone no forman, a mi parecer, verdaderas categorías. Ciertas frases de sus alumnos pueden catalogarse mediante diferentes modelos de los que el mismo Watts propone. Sabemos la dificultad de interpretar las entrevistas y se nota en sobremanera en este investigador. Con el presente trabajo me propongo afinar más estas interpretaciones a partir de un método de recogida de datos y, especialmente, de un análisis más rigurosos.

Trumper en 1990 intentó comprobar cuales de los "alternative frameworks", propuestos por Watts eran los que se mantenían en los alumnos de Israel. Para ello entrevistó a 35 alumnos de 9º a 11º grado, por grupos de 4 a 6 alumnos. Se les hacía responder "Hay alguna energía aquí?" ante 20 dibujos en que se mostraba una situación o un objeto. Los dibujos tenían como indicación: por ejemplo "un trozo de hielo fundiéndose", "un hombre comiendo", "un hombre de nieve", etc... Mediante la discusión entre los alumnos del grupo, Trumper pretendía obtener la información sobre los "alternative frameworks" que los alumnos sostenían. Señala algunas coincidencias con el estudio de Watts pero algunos de los frameworks de éste no aparecen.

Serían de interés más relevante los estudios que conllevaran un cotejar las ideas previas de los alumnos con los conceptos científicos actuales o los que históricamente han existido. Así, por ejemplo, ¿el "modelo de depósito" de Watts puede indicar que los alumnos sin formación previa tienen una idea cualitativa de energía libre? ¿Asocian energía a un objeto por su composición? ¿por su posición?

Sin esta referencia a los conceptos físicos actuales o históricos que subyacen en las asociaciones de los alumnos es difícil valorar el alcance de sus hallazgos. Los trabajos de exploración no pueden tener cortapisas que limiten el campo visual pero a la vez han de ir orientados en alguna dirección. Es esta la intención del presente trabajo. De otro modo, las conclusiones de los estudios podrían llegar a ser "curiosidades" de difícil aplicación en la innovación de la enseñanza.

También Bliss y otros (1985) se propusieron analizar una idea que parecían tener la mayoría de los niños: "la energía es necesaria o utilizada en algunas situaciones". Parece que su propósito era también constatar la poca validez de las clasificaciones de Watts con sus "frameworks" y lo consiguió a pesar de la metodología escogida. Su estudio consistía en un cuestionario escrito que constaba de 10 dibujos sobre otras tantas situaciones u objetos. Se pedía que eligieran 3 imágenes en las que consideraban que era necesaria o se utilizaba energía para lo que sucedía y explicaran sus razones. La muestra consistía en 17 chicas de 13 años. Como era de esperar, las alumnas elegían preferentemente las imágenes en que se veía alguna acción mientras que las correspondientes a objetos estáticos tenían poca o nula aceptación. Los resultados eran más que previsibles dado que

la pregunta "¿se requiere energía para..." sugiere ya que algún proceso, cambio o suceso tiene lugar.

En el presente estudio se ha preguntado también si los alumnos consideraban que era necesaria energía para cierto proceso, pero se eligieron siempre pares de imágenes en los que se notaba un cambio, una acción entre una y otra. Era necesario comprobar empíricamente si los alumnos tenían la idea que se divulga en los maass-media y en los libros infantiles: la de que la energía es la causa de los distintos procesos.

2.4. Otros estudios relativos a la conceptualización de la energía y a la introducción de la Termodinámica

Como dicen Black y Harlen *"un concepto no puede estar ligado a una sola palabra. Es necesario establecer lazos de unión entre diversos aspectos de un concepto y mediante el denominado proceso de categorización para llegar finalmente a una jerarquización y ramificación de los distintos conceptos"*.

Por ello la conceptualización de la energía requiere conocer varios aspectos esenciales que conforman el concepto de energía en su totalidad.

Duit (1985) los caracteriza en cinco:

Conceptualización de la energía

1. Definición de la energía
2. Transferencia de la energía
3. Transformación de la energía
4. Conservación de la energía
5. Disipación de la energía

Estos distintos aspectos han sido ya tratados, desde el punto de vista teórico, en el capítulo anterior y son la base del presente estudio empírico. Quisiéramos señalar aquí otros estudios de diversos investigadores en el campo de la enseñanza de la Física que tratan específicamente de alguno de los anteriores 5 aspectos.

En los últimos 15 años se han realizado numerosas y muy diversas propuestas (ver bibliografía) para llevar a cabo una enseñanza más eficaz del concepto de energía. Con mucha menor frecuencia se han realizado estudios empíricos al respecto especialmente en lo que concierne a la conservación y a la degradación de la energía.

En 1981, Duit realizó un estudio con 84 estudiantes de Alemania entre 12 y 14 años acerca de la transferencia y conservación de la energía. Sobre un rail sin fricción en forma de U (que después se modificaba en alguna zona), se les requería que hicieran predicciones sobre qué altura alcanzaría una bola dejada caer desde uno de sus brazos. El estudio se hacía antes y después de que se enseñara a los alumnos el principio de conservación.

Antes de toda instrucción, un 43% de los alumnos hacía predicciones correctas, solo un 2% empleaba ideas referentes a la conservación de la energía. Después de recibir sus clases de Física, un 63% daba una respuesta correcta, con un 17% que incluía energía en sus explicaciones y un 10% que se explicaba en términos de conservación de la energía.

Resultados similares encontraron Brook y Driver en 1984 mediante un cuestionario escrito contestado por niños británicos de 14-15 años de edad. También Driver (1985) realizó entrevistas individuales con 28 chicos de edades comprendidas entre 13 y 18 años y que habían seguido sus cursos de Física sobre energía. Driver se lamenta de la poca frecuencia con que los alumnos utilizan la conservación de la energía para resolver las cuestiones planteadas.

El estudio de Trumper (1990) con 35 chicos israelíes y con cursos de Física al respecto, también llega a esta aseveración. El principio de conservación es poco empleado para analizar y predecir situaciones o procesos.

El escaso uso del principio de conservación indica que su enseñanza ha tenido poca significación para los estudiantes. Ello no indica que lo utilicen incorrectamente o que su experiencia vital, más ligada a la degradación de la energía, interfiera o no con su aprendizaje significativo de este principio fundamental.

Black y Solomon (1983) intentaron desvelarlo a partir de las grabaciones a lo largo de debates en las clases de Solomon con alumnos de 14 años.

Constataron que el principio de conservación mediante el enunciado "La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma" tiene dificultades para los alumnos. Les resulta fácil aceptar el "no se crea" pero problemático el "no se destruye". Tienen dificultad en integrar la conservación de la energía con su experiencia diaria.

Constantes interferencias entre el mundo de la vida cotidiana (Life-world domain) y el mundo simbólico (Symbolic-world domain) de carácter abstracto utilizado en las clases dificultan a los alumnos el razonar y responder adecuadamente. Por ello, Black y Solomon sugieren la enseñanza de la idea de disipación de energía previa a la de conservación. Con ello, diversas pruebas mostraban una mejor adquisición de la conservación.

Viglietta (1990) junto con el IRRSAE del Piemonte (Italia) hicieron una propuesta para la enseñanza de la energía desde una perspectiva termodinámica.

Se incluía, para la escuela secundaria, nociones sobre disponibilidad de energía, energía libre, exergía, etc... además de los conceptos clásicos de trabajo, calor... Su enfoque pretendía -además de hacer comprender la conservación y disipación de la energía desde

un punto de vista físico- favorecer una aproximación al problema social de la crisis energética desde una base teórica.

Diversos han sido los debates sobre si la degradación de la energía debía enseñarse desde la Secundaria y si debía hacerse previa o posteriormente a la conservación de la energía. La necesidad de que la enseñanza de la energía vaya ligada a su disipación ha puesto sobre el tapete la idoneidad de investigar cuáles son las ideas de los estudiantes después de sus cursos de Termodinámica.

En 1983 se realizó un congreso internacional organizado en Budapest por la GIREP. Su título "Entropy in the School", ya sugiere la problemática fundamental que se quería abordar, a saber, cuán apropiado es incluir nociones de Termodinámica en el curriculum de Secundaria. Se constató que pocas investigaciones se habían realizado para conocer las dificultades de los estudiantes respecto la 2ª Ley de la Termodinámica. Justamente en esta dirección está el objeto del presente estudio.

Algunos interesantes trabajos se han efectuado en los últimos años tomando la Termodinámica como eje central.

Así Rozier (1988, 1991) centra su investigación en cuestiones acerca de problemas termodinámicos. Su propósito era analizar las formas de razonamiento de estudiantes y profesores universitarios. Remarca la tendencia general a razonar con una sola variable ante problemas termodinámicos en que diversas variables están en juego. El estudio de Rozier está enfocado sólo en el denominado contexto científico.

Después del trabajo de Song-Black sabemos que los alumnos responden utilizando diferente nivel de procesos cognitivos cuando el contexto en que se plantea una cuestión es científico o es cotidiano. Así, el presente trabajo plantea cuestiones termodinámicas para observar la posible divergencia que puede existir en las respuestas debido únicamente al cambio de contexto. Cómo afecta nuestra experiencia cotidiana a la comprensión de la 2ª Ley de la Termodinámica era una cuestión no resuelta.

Desde otra perspectiva se han realizado estudios sobre la enseñanza de la Termodinámica. Vicentini Missoni (1987) analizó los libros de texto universitarios editados en el último siglo para la enseñanza de la Termodinámica. Comprobó la inconsistencia de diferentes autores y aboga por una enseñanza en que tengan un papel más predominante las formulaciones de la segunda ley ligadas a la comprensión de como tienen lugar los procesos, como se consigue el equilibrio y la interconexión entre irreversibilidad y equilibrio.

El presente trabajo tiene como uno de sus objetivos conocer las concepciones de los estudiantes acerca de la irreversibilidad y de la tendencia de los procesos.

Muchos son los investigadores en el campo de la Didáctica de las Ciencias que han contribuido al esclarecimiento de diversas cuestiones sobre la enseñanza de los conceptos o que han planteado interrogantes aún sin respuesta. No hemos pretendido hacer un repaso de todos ellos sino sólo apuntar algunos estudios directamente relacionados con el presente trabajo y, a la vez, situar la perspectiva desde la cual se ha realizado.

Capítulo 3

DISEÑO DE LA INVESTIGACION

Esta investigación no pretende dar fórmulas para situarse en una clase y proponer una forma alternativa de enseñar tal o cual concepto. A mi parecer no estamos aún en condiciones para dar recetas de como llevar a término una enseñanza con totales garantías de eficacia. Muchas son las variables que intervienen en la función enseñanza - aprendizaje de las que se dispone de demasiados pocos resultados definitivos. ¿Cuáles son las mejores condiciones del alumno y del profesor, del método de presentación de los conceptos, de la dinámica de una clase etc que favorecen de forma clara un buen aprendizaje? ¿Cómo se estructuran los conceptos en la mente de los individuos? ¿Cómo se interpretan las informaciones o los mensajes recibidos? ¿Cómo se produce el razonamiento que denominamos sentido común? Disponemos sólo de algunas hipótesis de trabajo, en absoluto definitivas.

Se requieren aún múltiples estudios antes de llegar a conclusiones fundamentadas en sólidas teorías, que nos indiquen como intervenir en el aula.

En esta investigación sólo pretendemos aportar datos sobre un campo muy específico: como razonan los estudiantes de distintos niveles acerca de unos determinados conocimientos recibidos en las aulas o entresacados de la vida diaria. A partir de ello, y en la medida que sea posible, hacer generalizaciones sobre las formas de razonamiento. A la vez todas las conclusiones a las que se pueda llegar tendrán algunas limitaciones de base, al igual que toda investigación empírica, como son el peculiar contexto cultural, social, histórico etc en el que se realiza.

Para llevar a cabo una investigación es necesario previamente planificar las actividades a realizar teniendo en cuenta el tipo de trabajo elegido, el alcance que se le pretende o puede dar y las condiciones metodológicas adecuadas para que los resultados a obtener tengan ciertas garantías de fiabilidad.

3.1 Plan de la investigación

Las fases de la investigación han sido:

1. Estudio de investigaciones educativas, especialmente las realizadas sobre temas relacionados con el escogido, sobre metodología de estas investigaciones, análisis de datos etc. (De ello nos hemos ocupado brevemente en el anterior capítulo 2)
2. Formulación de algunas hipótesis a corroborar
3. Seleccionar los métodos de recogida de datos y los instrumentos a utilizar
 - Estudio de técnicas de diseño de cuestionarios
 - Elección del tipo de cuestionario más apropiado para esta investigación
 - Elaboración de los cuestionarios de acuerdo con las hipótesis
4. Identificación de la muestra
 - Estudio sobre muestreo
 - Elección de la muestra y la población para cada uno de los cuestionarios
 - Contacto con los profesores de Universidad y de las Escuelas
5. Aplicación de los cuestionarios
 - Aplicación de pruebas piloto
 - Recogida de datos a partir de Q-1/ Q-2 y Q-3A/Q-3B
 - Condiciones de aplicación de los cuestionarios
6. El análisis de datos.
7. Interpretación y comparación de los resultados

3. 2 Hipótesis

Si bien al elegir el tema de trabajo se tiene algunas difusas ideas acerca de lo que se pretende conocer, en el momento de pasar a diseñar los instrumentos de recogida de datos y a elegir la muestra es necesario formular las hipótesis concretas que se quiere corroborar. Estas, a la vez, han de ser suficientemente amplias para que nuevas hipótesis puedan emerger a medida que el análisis está en curso, dada la orientación exploratoria que se quiere dar al trabajo en general

He clasificado en dos grupos las hipótesis que pretendo corroborar: las que corresponden a la educación científica en general y las relativas a la comprensión de ciertos conceptos científicos específicos.

3.2.1. Hipótesis relativas a la educación científica en general:

1. Los alumnos de este país sin instrucción previa específica tienen algunas ideas sobre diversos conceptos científicos. En particular, tienen ideas sobre energía, transferencia de energía y degradación de la energía
2. Algunas de las concepciones de los alumnos de Primaria son alternativas al conocimiento científico y son resistentes al cambio que puede operarse mediante la enseñanza. Así pues, podremos encontrarlas en estudiantes de niveles elevados de enseñanza, en particular en estudiantes universitarios, independientemente de las instituciones en que hayan sido formados.
3. Para conseguir obtener todas las ideas de los alumnos, tenemos que formular preguntas abiertas de manera que no puedan influir en las posibles respuestas. Debemos ser muy cuidadosos de no sugerir o interferir en las respuestas, excepto en los casos en que se pretenda saber como la formulación de una cuestión las condiciona.
4. Algunos conceptos parecen muy bien conocidos al ser preguntados en un contexto científico, pero tal conocimiento no es significativo puesto que los estudiantes no pueden utilizar el mismo nivel de razonamiento científico cuando se les pregunta en un contexto cotidiano. Quizás los estudiantes utilizan diferentes niveles de razonamiento cuando se les

plantea de formas distintas un mismo problema. Esto implicaría poder clasificar los razonamientos o las concepciones pero difícilmente clasificara los estudiantes.

5. Algunas ideas de los estudiantes sobre el porqué ocurren los procesos derivan de su experiencia cotidiana e interfieren la aplicación de la 2ª Ley en contextos o situaciones concretas. (Por ejemplo, las ideas sobre equilibrio, orden, probabilidad etc). Por tanto existen conceptos más difíciles que otros de ser interrelacionados

3.2.2 Hipótesis sobre conceptos científicos específicos.:

Para alumnos sin instrucción previa.

6. Se asocia la energía con los seres vivos que pueden desplazarse por sí mismos y con todo tipo de objetos que se mueven o funcionan, pero no se asocia con los objetos en virtud de su posición, composición o estructura (excepto para los denominados recursos energéticos: sol, combustibles etc)

Para alumnos con cursos de Física.

7. La concepción de los estudiantes de la energía está más próxima al concepto científico de energía libre que del concepto científico de energía

8. La mayoría de estudiantes de todos los niveles definen la energía como "La capacidad de realizar trabajo", lo que de acuerdo con algunos evitaría una concepción materialista de la energía, y a pesar de ello, cuando se les formula preguntas en un contexto cotidiano, conciben la energía como una sustancia-fluido.

9. Para los estudiantes con diversos cursos de Física, el término calor es un concepto confuso que se utiliza con diferentes significados: como una manera de transferir energía, como energía interna y como energía dispersada. Se le da una significación más próxima al concepto de energía que la que se da al trabajo. No resultan términos paralelos en la formulación de la 1ª Ley de la Termodinámica

10. El principio de conservación de la energía se expresa mejor en términos abstractos que cuando ha de aplicarse a situaciones cotidianas. Lo mismo ocurre con la degradación de la energía.

11. La 2ª Ley de la Termodinámica es bien conocida en un contexto científico por los estudiantes de niveles superiores de enseñanza, pero es poco utilizada para explicar fenómenos cotidianos, excepto los fácilmente relacionables con máquinas térmicas.

12. El concepto de entropía es, para los estudiantes de todos los niveles, un concepto abstracto que sólo tiene significado en un contexto abstracto y que mayoritariamente se utiliza en un contexto cotidiano cuando puede relacionarse con la idea de desorden, entendida en términos coloquiales.

13. "Procesos", "tendencias" y "desorden" son, en la mente de los estudiantes, palabras asociadas con el concepto de entropía desde el primer momento que se les enseña la 2ª Ley. Así, una cuestión acerca de un hecho cotidiano, que contenga alguno de estos términos probablemente evocará el concepto de entropía.

14. La irreversibilidad de los procesos espontáneos, con frecuencia, no se explica utilizando alguna de las formulaciones de la 2ª Ley.

15. Los estudiantes no relacionan los diferentes enunciados de la 2ª Ley de la Termodinámica.

3.3 Las hipótesis planteadas y la metodología a seguir

Las hipótesis que he formulado han condicionado la metodología a seguir, el tipo de cuestiones, la elección de la muestra; en definitiva han configurado la forma de llevar a cabo el estudio.

3.3.1 Veamos como han influido las hipótesis sobre educación científica en el diseño de la investigación.

La Hipótesis nº 3 implica que habrá que elaborar un cuestionario con preguntas abiertas que permitan la máxima disparidad de respuestas y que condicionen mínimamente a los estudiantes.

A partir de la Hipótesis 13: Cuando se desee comprobar como influyen las palabras contenidas en la formulación de una pregunta convendrá plantear pares de cuestiones en que tales palabras estén incluidas o excluidas.

A partir de la Hipótesis 1: El cuestionario deberá administrarse a los alumnos que no hayan recibido enseñanza en sus clases de Física acerca de la energía. Las preguntas deberán permitir que los alumnos expresen sus ideas sobre energía, transferencia de energía y degradación de la energía.

A partir de la Hipótesis 2: Para poder comprobar la persistencia de algunas ideas alternativas, habrá que pasar el cuestionario a alumnos de niveles previos a toda enseñanza y a alumnos con diversos cursos de Física.

Segun la Hipótesis 4: Para comprobar esta hipótesis habrá que plantear cuestiones en contexto científico que tengan sus homólogos en contexto cotidiano. Esto solo podrá realizarse en alumnos con ciertos niveles de enseñanza para los que tengan sentido las preguntas en contexto científico.

Hipótesis 5: Las preguntas formuladas sobre como ocurren ciertos procesos cotidianos han de hacer posible que los alumnos expresen sus ideas sobre ciertas nociones que tienen un significado distinto en el plano científico que en el familiar (ej. orden, equilibrio, etc...).

3.3.2. Basándose en las hipótesis acerca de conceptos físicos específicos.

Según la hipótesis 6 deberán plantearse cuestiones en las que los alumnos sin formación previa puedan expresar libremente como relacionan la energía con otros conceptos o con qué objetos, materiales y procesos la asocian.

Alguna de las cuestiones deberá permitir conocer si estos alumnos asocian energía a un objeto o a un sistema en relación a su posición, estructura o composición.

Sólo para alumnos que han recibido enseñanza acerca de los conceptos involucrados:

Según la hipótesis 7, deberán existir cuestiones en las que los alumnos, con enseñanza acerca de la energía, puedan dar cuenta de las razones por las que asocian energía a diversos objetos y sistemas. En particular, habrá que analizar las explicaciones que dan para asociar energía a un objeto o un sistema en virtud de su posición, estructura y composición.

Según la hipótesis 8 habrá que plantear cuestiones en las que los alumnos tengan que:

- a) dar una definición de energía.
- b) discutir la materialización de la energía.
- c) hacer razonamientos sobre la energía asociada a objetos cotidianos.

Según la hipótesis 9, las cuestiones deberán plantear situaciones (funcionamiento de algún mecanismo, por ejemplo) en las que tenga lugar disipación de la energía. Podremos detectar como utilizan los términos: calor, trabajo y energía interna.

Hipótesis 10. Para comprobar la mayor precisión con que se expresan acerca de la conservación y la degradación de la energía al enunciarlas en abstracto que la que utilizan al aplicarlos a situaciones concretas, habrá que establecer pares de cuestiones en los dos contextos.

Hipótesis 11. Habrá que plantear diversas cuestiones para detectar la calidad de las explicaciones sobre situaciones cotidianas en que es aplicable la 2ª Ley y poder confrontarlas con la calidad de los enunciados de dicha Ley que cada alumno formula. Habrá que elegir ejemplos en que sea posible hacer el paralelismo entre la situación planteada y las máquinas térmicas.

Para corroborar la hipótesis 12, es necesario que los estudiantes puedan establecer asociaciones libres utilizando el término entropía y que puedan emplear el concepto de entropía en cuestiones próximas a temas tratados en cursos de Física y en otras más alejadas, aplicadas a situaciones cotidianas. Dentro de éstas, algunas en que la idea de orden/ desorden pueda estar presente y otras en que no sea así.

Hipótesis 14: Para poder analizar como interpretan la irreversibilidad de los procesos naturales convendrá plantear cuestiones que respondan a situaciones de este tipo.

Hipótesis 15. Después de formular preguntas acerca de la 2ª Ley (enunciándola o aplicándola a situaciones concretas y a otras abstractas) podremos contrastar como relacionan los diversos enunciados de dicha Ley.

3.4 Descripción de los cuestionarios

3.4.1 Tipos de cuestionarios

Para la recogida de datos de estudiantes de diferentes niveles, se ha elaborado unos cuestionarios escritos.

Todos los cuestionarios contienen sólo cuestiones abiertas para poder captar el máximo de matices en las respuestas de los estudiantes. Ello ha condicionado la metodología de análisis a seguir.

3.4.2 Descripción de los cuestionarios

Para los alumnos de Primaria sin instrucción previa se ha elaborado dos clases de cuestionarios: Q-1 y Q-2 (Tipo I y Tipo II)

Para los alumnos de niveles superiores que han recibido enseñanza acerca de la 1ª y 2ª Ley de la Termodinámica, los cuestionarios elaborados los hemos denominado Q-3. Son dos Q-3A y Q-3B.

Todos ellos están redactados en lengua catalana pues es la lengua vehicular para la mayoría de los alumnos de la muestra. (Ver Anexo al capítulo 3)

Pasamos a detallar sus características, traduciendo el redactado de las preguntas lo más literalmente posible.

3.5. Cuestionario Q-1

El cuestionario Q-1 contiene sólo dos cuestiones, planteadas en un contexto científico, sobre el concepto de energía.

Las cuestiones son:

Q-1-1: ¿Qué se entiende por energía?

y

Q-1-2: Escribe 3 o 4 frases que incluyan la palabra energía.

(Ver Anexo)

La primera de las cuestiones pretende conocer como los alumnos, sin formación previa, definen el concepto de energía o como describen su concepción acerca de la energía.

Mediante la segunda cuestión Q-1-2 se pretende analizar las asociaciones libres que los alumnos hacen, acerca del concepto de energía. Se parte de la idea que los alumnos pueden construir frases que a primera vista, podríamos pensar que están hechas al azar pero que en realidad, finalmente nos dan cuenta de su concepción real sobre energía.

Estas cuestiones han de permitir corroborar las hipótesis 1, 2 y 6, a la vez que, explorar al máximo la idea de energía de los alumnos de los niveles a quien se administra.

3.6. Cuestionarios Q-2

Puesto que el cuestionario Q-1 formula las preguntas de forma abstracta, quisiéramos obtener más información sobre las concepciones de los alumnos acerca de la energía cuando las preguntas son planteadas de forma concreta. Esta es la dirección de los cuestionarios Q-2. Dos son los tipos de cuestionarios Q-2. Se han designado como Tipo I y Tipo II.

Las hipótesis que se quiere corroborar son también las 1, 2 y especialmente la 6.

3.6.1 Cuestionario Q-2 Tipo I

Dos ideas parecen estar fuertemente arraigadas en el conocimiento obtenido de la vida diaria . Una de ellas es que la energía se transfiere en todos los procesos o cambios. La segunda, próxima a la anterior, es que la energía es la causa de que tengan lugar dichos procesos. Es decir, el concepto de energía está mezclado con el de energía libre.

Para conocer hasta que punto son ciertas las anteriores afirmaciones se ha elaborado el cuestionario Q-2, Tipo I. Contiene 9 cuestiones y en todas ellas se pregunta si la energía es necesaria para que tenga lugar cierto proceso.

Los procesos o cambios sobre los que se basa cada una de las 9 cuestiones se muestran gráficamente mediante pares de pequeños dibujos. Todas las cuestiones son planteadas en un contexto cotidiano. (Ver Anexo)

Las cuestiones son:

"¿Es necesario energía para...."

- 1-El crecimiento de una planta?
- 2-Encender una lámpara?
- 3-Subir un libro desde una mesa a un estante?
- 4-Chutar una pelota?
- 5-Sacar las arrugas de una camisa?
- 6-Acelerar un coche?
- 7-Freir un huevo?
- 8-El crecimiento de un niño?
- 9-Ordenar unos cazos de cocina ?

3.6.2 Cuestionario Q-2 Tipo II

La idea de que los alumnos sin formación previa asocian energía sólo a algún tipo de objetos o sistemas es la idea que tratamos de corroborar mediante este cuestionario Tipo II. Para ello elaboramos 6 cuestiones en que se pregunta si un cuerpo, objeto o sistema tienen energía debido a su posición, estructura o composición.

Las cuestiones son: (Ver Anexo):

¿Tiene energía.....?"

1. Un coche de juguete al que se da cuerda?
2. Una maceta con flores en un balcón?
3. La pólvora?
4. Una viga colgada de una grúa?
5. Una bala disparada por una pistola?
6. El butano?

3.7. Cuestionarios Q-3

Para los estudiantes que han recibido enseñanza sobre la 1ª y 2ª Leyes de la Termodinámica y los conceptos que implican, se elaboraron los cuestionarios Q-3. Como podremos mostrar, algunos de las cuestiones pertenecen también a los cuestionarios Q-1 y Q-2 puesto que se trataba de conocer cuales son los cambios desde la Escuela Primaria hasta la enseñanza superior.

Dos son los cuestionarios Q-3. Son Q-3A y Q-3B. (Ver Anexo)

Q-3A ha sido pensado como un cuestionario con preguntas planteadas en contexto científico. En cambio, el cuestionario Q-3B pretendía estar formado por preguntas paralelas a las del cuestionario Q-3A pero planteadas en un contexto cotidiano. En la práctica, fueron necesarios algunos cambios para que las respuestas a una pregunta del cuestionario Q-3A no estuvieran junto a otras preguntas del mismo cuestionario.

3.7.1 Cuestionario Q-3A

El cuestionario contiene 10 cuestiones. Pasemos a describirlas:

1: ¿Qué se entiende por energía?.

Esta cuestión también pertenece al cuestionario Q-1 elaborado para los alumnos de la Escuela Primaria; ya han sido pues explicados sus objetivos.

La formulación de la pregunta no especifica que se dé una definición de energía, a pesar de que así lo han entendido los alumnos.

La cuestión corresponde a las hipótesis 2 y 8.

Las respuestas han sido codificadas con las categorías A_i $i= 1, 2, 3...$

2: ¿Qué indica el principio de conservación de la energía?

En este caso, los estudiantes podían responder desde el principio de conservación de la energía en su forma más estereotipada hasta una explicación del significado de este principio. Como puede verse es una cuestión planteada en un contexto científico.

La cuestión va aparejada con las hipótesis 4 y 10.

La diversidad de respuestas han sido codificadas como B_i $i= 1, 2, 3...$

3: ¿Qué significa degradación de la energía?

Es una cuestión también planteada en un contexto científico que tiene su paralela en un contexto concreto en el cuestionario Q-3B (cuestión 6).

La cuestión se corresponde con las hipótesis 4 y 10.

Las respuestas han sido codificadas mediante las categorías C_i $i= 1, 2, 3...$

4. Esta cuestión tiene 2 partes:

4 a): Explica tan claramente como puedas lo que dice la 2ª Ley de la Termodinámica

Se pretendía saber cuales son los enunciados de la 2ª Ley que los estudiantes conocen y consideran más claros

La cuestión se empareja con las hipótesis 11 y 15.

A la diversidad de las respuestas se les ha asignado las categorías: D_i $i= 1, 2, 3...$

4 b) ¿Tiene alguna consecuencia en la vida cotidiana? Explícalo.

Se pregunta pues, por algunas situaciones cotidianas en que la 2ª Ley pueda explicar cierto fenómeno o proceso. Es decir, queríamos comprobar si los estudiantes pueden relacionar la 2ª Ley con fenómenos cotidianos. Después de las pruebas piloto, se pensó que a partir de la 1ª parte de la cuestión no podíamos tener referencias de hasta qué punto se es capaz de relacionar la 2ª ley a situaciones concretas. Esta cuestión podría pues estar en el cuestionario Q-3B pero está incluida en el Q-3A por considerar más fácil de relacionar con 4a.

La cuestión corresponde pues a las hipótesis 4 y 11.

A los diversos tipos de respuestas se les ha asignado las categorías E_i $i= 1, 2, 3...$

La calidad de la aplicación de la 2ª Ley se ha codificado mediante : E'_i $i= 1, 2, 3...$

5: Al igual que la cuestión anterior tiene dos partes

5a): Escribe dos frases que incluyan la palabra entropía

Mediante esta cuestión se pretende conocer cuales son las asociaciones libres que los estudiantes pueden hacer con el término entropía. Con ello se buscaba dilucidar hasta qué punto la palabra entropía les sugiere algo en relación con la vida diaria o, si por el contrario, les resulta sólo un término científico útil para cálculos, fórmulas y explicaciones teóricas.

La cuestión corresponde a las hipótesis 12 y 13.

Según el contexto en que han sido formuladas, las respuestas han sido codificadas mediante F_i $i= 1, 2, 3...$

El contenido de la cuestión ha sido codificado como: F'_i $i= 1, 2, 3...$

La segunda parte:

5b): Qué crees que debe ser mayor a temperatura ambiente: la entropía de un mol de hielo o la de un mol de agua? ¿Por qué?

La cuestión trata de conocer si los estudiantes son capaces de aplicar el concepto de entropía en un contexto científico, en este caso la idea de aumento o disminución de entropía en un cambio de estado. Otras cuestiones, como veremos, tratan de constatar la capacidad de aplicar el concepto de entropía en un contexto cotidiano.

La cuestión va aparejada a las hipótesis 12 y 13.

La diversidad de las respuestas ha sido categorizada como: G_i $i= 1, 2, 3...$

6. En cualquier cambio en un sistema aislado, ¿la entropía siempre aumenta? Explícalo.

Es una cuestión planteada en términos abstractos y en un contexto científico. Su finalidad es conocer si en ella los estudiantes pueden reconocer una formulación de la 2ª Ley y hacer algunas precisiones.

La cuestión corresponde a las hipótesis 11 y 15.

La diversidad de las respuestas tienen los códigos : H_i $i= 1, 2, 3...$

(La cuestión 7 que inicialmente contenía el cuestionario Q-3A no se ha analizado)

8: Planck decía que el principio de conservación de la energía era muy fácil de aceptar porque permitía considerar la energía como si fuese una

sustancia cuasi-material. (Por lo tanto sería fácil imaginar que siempre hay la misma cantidad de energía). Otros colegas decían que no podía hacerse este paralelismo porque vemos que los objetos se gastan, se rompen, envejecen etc y, según esta semejanza, algo similar le ocurriría a la energía. ¿Quién tenía razón? ¿Por qué?

A partir de esta cuestión intentábamos obtener información de hasta qué punto los estudiantes aceptan o rechazan una concepción de energía como si se tratara de una sustancia material. El contexto de la cuestión es científico a pesar de que no es un tema tratado en cursos de Física.

La cuestión corresponde a las hipótesis 8 y 10

A las diversas respuestas se les ha asignado los códigos : J_i $i= 1, 2, 3...$

9: Esta cuestión tiene dos partes:

9a): ¿Encuentras alguna razón por la que las cosas envejecan, se estropeen, se gasten etc.? Explícalo.

La primera parte pretende conocer como los estudiantes explican la irreversibilidad de los procesos de envejecimiento o deterioro. Para responder a la cuestión, los estudiantes han de aplicar la 2ª Ley a una situación concreta.

La cuestión corresponde a las hipótesis 8 y 4

El enfoque dado a las respuestas ha sido codificado en las categorías: K_i $i= 1, 2, 3...$

Precisamente la segunda parte de la cuestión es:

9b) ¿Hay alguna relación entre esto y la 2ª Ley de la Termodinámica? ¿Porqué?

La cuestión corresponde a las hipótesis 11, 14 y 15

La diversidad de las respuestas ha sido codificado como: K'_i $i= 1, 2, 3...$

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

Mediante esta cuestión se quería analizar como los estudiantes explican cierto proceso irreversible. ¿Consideran que es posible dar una explicación de cierto proceso irreversible

(como hace la 2ª Ley) o piensan que ciertos procesos son debidos al imperativo de la 2ª Ley?

A la diversidad de respuestas a la cuestión se les ha asignado las categorías: L_i $i= 1, 2, 3...$

Por otro lado, se intentaba ver si los estudiantes identificaban la cuestión con la 2ª Ley de la Termodinámica en su enunciado de Clausius. Estas respuestas llevan los códigos: L'_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 9, 11 y 14

Finalmente el cuestionario Q-3A contenía una undécima pregunta.

11: Recuerda que un par termoeléctrico consiste en dos metales unidos mediante dos soldaduras. Si se mantienen a temperaturas distintas se crea una f.e.m. termoeléctrica, se genera una corriente eléctrica. Mediante esta corriente eléctrica pueden realizarse diferentes trabajos.

Pasemos ahora a 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, el bloque de hielo no puede hacer trabajo en el polo norte. Si se dice que la energía es la capacidad de hacer trabajo ¿qué podemos afirmar: el bloque de hielo tiene energía o no? Explicalo.

En esta cuestión se trata de enfrentar los estudiantes con la contradicción de definir energía como "la capacidad de realizar trabajo". Puesto que se consideraba que esta definición es frecuente en nuestros estudiantes, se quería probar cuán resistentes eran a cambiarla y como podían aplicarla a una situación particular.

La cuestión corresponde a las hipótesis 7 y 8

La diversidad de respuestas llevan las categorías: M_i $i= 1, 2, 3...$

3.7.2 Cuestionario Q-3B

Este cuestionario Q-3B está formado de 12 cuestiones, 5 de las cuales pertenecientes también al cuestionario Q-1 y Q-2 para alumnos de Primaria (algunas veces con pequeños cambios). Las otras 7 cuestiones son sólo para alumnos de niveles superiores de enseñanza.

Pasemos a detallarlas y a explicar sus objetivos.

1: Escribe dos frases que incluyan la palabra energía.

Con esta cuestión, como antes hemos señalado, se quiere analizar qué tipo de asociaciones libres sobre energía hacen los estudiantes. Pertenece también al cuestionario Q-1 para alumnos de Primaria (aunque allí se pedía 3 o 4 frases).

Para poder comparar las respuestas dadas por los estudiantes de los diversos niveles, se ha codificado del mismo modo los diversos tipos de respuesta. Como veremos se les ha asignado las categorías que tienen las siglas: **Sci, Us, Oth**

La cuestión corresponde a las hipótesis 2 y 7

A continuación, incluimos 4 cuestiones para conocer cual es la conceptualización sobre la energía que muestran los estudiantes, en el momento que tienen que aplicar este concepto a situaciones concretas planteadas en un contexto cotidiano.

2.: ¿Podemos decir que los combustibles tienen energía?

La cuestión busca profundizar en el conocimiento de la conceptualización de energía, en particular en el concepto de energía interna. En este caso, también tenemos la hipótesis que los estudiantes confunden energía, energía libre y energía interna. La cuestión paralela para Primaria era: ¿El butano tiene energía?

La diversidad de respuestas han recibido las categorías: **P_i i= 1, 2, 3...**

Corresponde a las hipótesis 2, 7 y 8

3: ¿Una maceta con flores en un balcón tiene energía? ¿Y sin flores? ¿Por qué?

La primera de estas cuestiones fue también formulada para alumnos de Primaria en el cuestionario Q-2. Puesto que muchos de estos alumnos asociaban energía a la maceta debido a las flores, incluimos ahora en Q-3B, la segunda parte de la cuestión.

El concepto de energía potencial no ha sido enseñado a los alumnos de Primaria y conviene constatar como los estudiantes de niveles superiores utilizan este concepto en un contexto cotidiano.

Las diversas de las respuestas han sido codificadas con las categorías: Q_i $i= 1, 2, 3....$

La cuestión corresponde a las hipótesis 2 y 8

4: Para que un libro pase de estar sobre una mesa a lo alto de un estante, se requiere energía? ¿Porqué?

La cuestión, también planteada en el cuestionario para nivel de Primaria, pretende comprobar si los estudiantes de niveles superiores también asocian el aumento de energía con la existencia de un agente externo que introduce tal "sustancia-fluido" llamada energía en el libro. Es pues, también una cuestión sobre conceptualización de la energía en un contexto cotidiano.

Las respuestas han sido codificadas mediante las categorías: R_i $i= 1, 2, 3....$

Las hipótesis 2 y 7 van aparejadas a esta cuestión.

5: ¿Una bala que sale disparada de una pistola tiene energía? ¿Porqué?

De nuevo, una cuestión también incluida en el cuestionario Q-2. Se dice con frecuencia que los alumnos asocian energía con movimiento antes de conocer el concepto de energía cinética pero, es necesario corroborarlo en los casos en que se trata de un objeto que no es un ser vivo y en que el movimiento es menos visible.

Las respuestas llevan los códigos: S_i $i= 1, 2, 3....$

La cuestión corresponde a las hipótesis 2,7 y 8

Así como las 5 cuestiones anteriores de este cuestionario están relacionadas con el concepto de energía, las 6 siguientes pretenden conocer como los estudiantes aplican sus conocimientos entorno a la 2ª Ley de la Termodinámica y la degradación de la energía en situaciones planteadas en un contexto cotidiano.

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

Aquí, las ideas de degradación y disipación de la energía han de aplicarse a una situación concreta en un contexto cotidiano. Esta cuestión tiene su paralela en el cuestionario Q-3A

(cuestión nº 3), allí se preguntaba por el significado de degradación de energía en un contexto científico. Se podrá pues comparar los resultados.

A las respuestas dadas se les ha asignado las categorías: T_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 4 y 10.

7. La cuestión tiene 2 partes bien diferenciadas pero relacionadas.

7a) Decimos que al caer una piedra desde cierta altura, la energía potencial gravitatoria se va convirtiendo en energía cinética. Al llegar al suelo ¿la energía se conserva?

Encontramos, de nuevo, una cuestión que trata de delucidar si los estudiantes utilizan la idea de degradación o de disipación de la energía para aplicar el principio de conservación de la energía.

La diversidad de respuestas han sido codificadas por: U_i $i= 1, 2, 3...$

Corresponde a las hipótesis 4 y 10.

La segunda parte de la cuestión:

7b) Si así fuera, ¿porqué no podemos utilizar esta energía para vencer la gravedad y volver a subir por sí sola?

A partir de esta segunda pregunta, se pretendía saber como los estudiantes explican la irreversibilidad de algunos fenómenos cotidianos. ¿Utilizarán la 2ª Ley de la Termodinámica para situaciones que no suelen especificarse en los cursos de Termodinámica?

Las respuestas llevan los códigos: U'_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 4 y 14

8: Esta cuestión está compuesta de 3 partes, muy relacionadas las dos últimas.

8a) Cuando un coche llega al final de trayecto, nos preguntamos ¿qué ocurrió con la energía de la gasolina que se ha gastado?

Intentamos detectar como explican los estudiantes la degradación o la disipación de la energía, teniendo a la vez presente el principio de conservación. Es una cuestión próxima a la anterior pero la situación concreta ha variado a pesar estar ambas planteadas en un contexto cotidiano. Se pone énfasis en que "el coche llega" y en que "la gasolina ya se ha gastado".

A las respuestas se les ha asignado las categorías: V_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 4,9 y 10

8b) Si la técnica fuese mejor, ¿podríamos recuperar toda la energía? ¿Por qué?

Se trata de la aplicación de la 2ª Ley de la Termodinámica en un contexto cotidiano pero muy fácilmente relacionable con el tema, usualmente enseñado en los cursos de Termodinámica, de las máquinas térmicas.

La diversidad de respuestas tienen los códigos: V'_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 4, 9, 11, 12 y 14

8c) ¿Podríamos recuperarla en parte? ¿Por qué?

La prueba piloto había revelado que algunos estudiantes son especialmente parcos en sus respuestas a la anterior pregunta 8b), de modo que convenía tener mayor información sobre como aplican el enunciado de Kelvin-Planck de la 2ª Ley. Con esta finalidad se incluye la última pregunta de la cuestión 8.

Las respuestas han sido codificadas conjuntamente con las de la segunda parte: 8b).

9: Consta de 4 partes:

Imagina que das cuerda a un reloj.

9a) ¿Puedes decir que el reloj tiene energía? ¿Por qué?

La cuestión, en esta primera parte, pretende conocer cuales son las condiciones en que los estudiantes asocian energía a un cuerpo. Es pues, una pregunta similar a la de las cuestiones 2, 3 y 5 de este cuestionario Q-3B.

Las respuestas llevan los códigos: W_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 2 y 7

9b) Todo el mundo sabe que mientras la cuerda se desenrosca el reloj funciona. ¿Cómo es que exista esta tendencia a desenroscarse?

Se pretende analizar como los estudiantes describen la tendencia a que tenga lugar cierto proceso. En una situación concreta y en un contexto cotidiano, deben expresar la 2ª Ley o alguno de los conceptos implícitos como entropía, desorden, probabilidad etc

Las respuestas llevan los códigos: W''_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 4, 5, 12 y 13

9c) Cuando el muelle se ha desenroscado completamente, el reloj se para. ¿No podría por sí solo volver a recuperar la cuerda? ¿Cómo es?

Cuestión similar a la 7b en la que se espera que los estudiantes expliquen la irreversibilidad de un suceso cotidiano.

A la diversidad de respuestas se les ha asignado las categorías: W'_i $i= 1, 2, 3...$

Las hipótesis que se trata de corroborar son 4, 5, 12 y 14

9d) ¿Crees que esta cuestión tiene algo en común con alguna ley de la Termodinámica? Explícalo.

Esta parte de la cuestión se ha planteado ya que parecía que los estudiantes asocian sólo el análisis de un objeto como un reloj, a la Mecánica. Para responderla tienen que pasar a través de un conocimiento teórico a una aplicación cotidiana.

Las respuestas llevan los códigos: W''_i $i= 1, 2, 3...$

Las hipótesis que lleva aparejadas son 11 y 15

10: A continuación citamos dos procesos que, de forma natural, suceden entorno nuestro: el hierro al aire libre se oxida y el hielo se funde a temperatura ambiente. ¿Podrías explicar qué desencadena estos procesos?. Utiliza algun/os de estos conceptos: energía, entropía, energía libre.

Se trata de conocer como los estudiantes explican el sentido de los procesos espontáneos, es decir, se pretende analizar como aplican la 2ª Ley a situaciones de la vida diaria, en su formulación: "tendencia de los procesos a la máxima entropía o a la mínima energía libre"

Las respuestas a esta cuestión podrían ser las mismas que las de la cuestión 9b). Han sido codificadas como: X_i $i= 1,2,3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 4, 5, 12, 13 y 15

11: Si abrimos la puerta en una habitación con mucho humo, pronto se esparce por las habitaciones contiguas. Al final todo el humo queda distribuido por igual. ¿Qué impulsa este proceso? Si puedes, utiliza conceptos científicos para responder.

El lenguaje de la cuestión y su contexto son familiares para que los estudiantes utilicen "conceptos científicos" teniendo que pasar del mundo simbólico al mundo de la cotidianidad. La demanda cognitiva para responder a esta cuestión es la misma que para las cuestiones 9 y 10. Podemos pues esperar que los estudiantes las respondan en similares términos.

Las respuestas tienen asignadas las categorías: Y_i $i= 1, 2, 3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 4, 5, 12, 13 y 14

12: Unos dicen que la energía es la capacidad de hacer trabajo. De acuerdo con la 2ª Ley de la Termodinámica, en un sistema cerrado, la capacidad de hacer trabajo disminuye con el tiempo. Por lo tanto, según esto la 2ª Ley dice que la energía disminuye. Si la energía se conserva, ¿qué hay de contradictorio en esta cuestión?

Esta cuestión está incluida en este cuestionario Q-3B para no interferir a las respuestas a diversas preguntas del cuestionario Q-3A, pero su emplazamiento coherente sería Q-3A. Es una cuestión planteada en un contexto científico en que se enfrenta a los estudiantes con la disyuntiva de decidir entre una definición muy usual de energía o la aceptación de la 2ª Ley y el principio de conservación de la energía.

Las respuestas a esta cuestión podrían ser similares a las de la cuestión 11-Q-3A. Han sido codificadas como: Z_i $i= 1,2,3...$

La cuestión corresponde a las hipótesis 2, 7, 8, 10, 11.

3.8. Identificación de la muestra

3.8.1 Alumnos de Escuela Primaria

La muestra elegida para la administración de los cuestionarios Q-1 y Q-2 está formada por alumnos de Escuela Primaria, de edades comprendidas entre 11 y 13 años y sin instrucción previa acerca de los conceptos aquí considerados

El cuestionario Q-1 fué administrado a 100 alumnos pertenecientes a dos escuelas: 50 alumnos de la Escuela O y 50 de la Escuela C.

La Escuela C es una escuela pública en el centro de una gran ciudad industrial. Según las referencias dadas por los maestros, los padres de los alumnos pertenecen a una clase media y muchos de ellos están empleados en el sector industrial.

La Escuela O es privada y está situada en un barrio acomodado de Barcelona. Los padres de los alumnos de la Escuela O pertenecen a una clase media-alta, especialmente en los aspectos culturales.

De entre estos 100 alumnos, 60 pertenecen al nivel de 6º (11-12 años) y 40 al nivel de 7º (12-13 años).

Los cuestionarios Q-2 Tipo I y Tipo II han sido administrados a una parte de esta muestra de 100 alumnos entre 11 y 13 años. Según la cuestión la muestra era mayor o menor como queda detallado en el capítulo 4.

3.8.2 Estudiantes de Universidad

Para la administración de los cuestionarios Q-3 se tomó una muestra de:

A) 141 estudiantes en su primer curso de Universidad en la Facultad de Ciencias. Corresponden a los matriculados en 1er. curso de Biológicas. Pertenecen a dos grupos con distintos profesores de Física.

En el momento en que fueron administrados los cuestionarios Q-3 no se les había impartido los temas de Termodinámica, por tanto su información tenía que proceder del curso anterior denominado COU o de los cursos de Química.

B) En algunas de las cuestiones se ha analizado las respuestas de 100 alumnos también de 1er. curso de Universidad pero matriculados para la Licenciatura de Físicas.

C) 40 estudiantes de 3er. curso para la Licenciatura de Físicas. En el momento de aplicarse los cuestionarios, habían recibido su curso completo en Termodinámica.

Inicialmente los cuestionarios fueron administrados a 100 alumnos de COU, curso previo a la Universidad. Los alumnos tenían una edad mínima de 17 años y su opción era Ciencias puras. Después de analizar algunas respuestas se constató que su nivel de formación en los temas considerados era demasiado bajo y muchas de las cuestiones no tenían respuesta. Algunos no había oído, ni siquiera nombrar, la palabra entropía. Por lo tanto el cuestionario Q-3 era inadecuado en la mayor parte de sus preguntas. Se abandonaron pues los cuestionarios cumplimentados.

3.9. Aplicación de los cuestionarios

3.9.1. Pruebas piloto

Como es habitual, y necesario, hemos realizado algunas pruebas piloto antes de aplicar los cuestionarios a toda la muestra. Las pruebas piloto de los cuestionarios Q-1 y Q-2 se han administrado a 6 alumnos de 12-13 años. Para los cuestionarios Q-3A y Q-3B, las pruebas piloto se han administrado a 14 alumnos de 5º curso de Físicas y 5º curso de Químicas.

Ello ha comportado algunos cambios en las cuestiones para asegurar que su enunciado era claro, podían interpretar lo que se pretendía conocer y no eran posibles subterfugios respondiendo otros aspectos que no eran de interés.

3.9.2. Administración a toda la muestra de los cuestionarios Q-1 y Q-2

Los cuestionarios Q-1 y Q-2 se aplicaron a los alumnos de las escuelas mencionadas C y O, después de contactar con los maestros para:

- tener la seguridad que no habían recibido instrucción previa sobre el concepto de energía
- conocer cuales eran las características de los padres de los alumnos o de algún alumno en particular.
- familiarizarse con las escuelas.

La aplicación de los cuestionarios se realizó en varios grupos clase de cada escuela; niveles de 6º y de 7º de Primaria (11-12 y 12-13 años respectivamente). Durante la administración, los alumnos estaban en la clase en sus puestos habituales.

La duración fué de 1 hora aproximadamente.

Los días de aplicación entré en las clases, dije algunas palabras para conectar con los alumnos explicándoles las razones de una investigación educativa y dando las pautas para responder por escrito los cuestionarios. Se insistía también en el interés de que las respuestas fueran personales, acertadas o no, y en el poco valor de contrastar con los compañeros próximos las respuestas a dar.

3.9.3. Administración a toda la muestra de los cuestionarios Q-3

Los cuestionarios Q-3 para estudiantes universitarios se administraron en el momento en que su profesor de Física pudo tomar algún tiempo de sus clases.

Recordemos que son dos: Q-3A y Q-3B. Fueron administrados consecutivamente. Cuando un alumno había finalizado el cuestionario Q-3A, se le entregaba el cuestionario Q-3B.

Se explicó a los alumnos la finalidad de los cuestionarios antes de entregárselos

Se aplicaron en la misma aula habitual para su curso de Física y la administración duró aproximadamente 1 hora.

3.10.El análisis de los datos

Las respuestas obtenidas con los cuestionarios fueron analizadas. Para ello la metodología utilizada es diversa según el aspecto a considerar:

3.10.1.Análisis cualitativo.

Las respuestas de los alumnos fueron minuciosamente leídas para recoger la mayor cantidad posible de información acerca de sus conceptualizaciones entorno a los conceptos implícitos en la 1ª y 2ª Leyes de la Termodinámica.

A cada una de las ideas contenidas en la respuesta de un estudiante se le asignaba un código. Si el tipo de ideas que se encontraban hacían referencia a aspectos distintos, diferentes tipos de códigos se asignaban. De este modo se conseguía un conjunto de datos correspondientes a cada estudiante que respondían a categorías, no a cifras o puntuaciones.

Reuniendo los códigos correspondientes a las diferentes categorías podemos tener toda la información que ha proporcionado cada alumno. Con ellas se elaboraron las redes sistémicas.

De este modo, la descripción de las respuestas de los estudiantes puede llegar a ser muy fina y matizada, como podremos comprobar en los capítulos 4 y 5.

La descripción de la frecuencia de las categorías se puede mostrar en tablas y en diagramas de barra.

Este tipo de análisis cualitativo conlleva que el estudio estadístico a realizar no será el de una Estadística confirmatoria sino de Estadística cualitativa. como corresponde a unos datos categorizados

Así, no es prácticamente posible hacer cálculos cuyo significado concreto sea difícil de interpretar o que no tengan interés alguno.

3.10.2 Análisis cuantitativo

Para comparar los tipos de explicación dados por los estudiantes a las diferentes cuestiones, se ha realizado también un análisis cuantitativo a partir de los datos obtenidos cualitativamente. De este modo puede conseguirse información sobre la coherencia de sus respuestas, es decir, sobre la consistencia con que utilizan unos conocimientos o unos razonamientos. El tipo de análisis cuantitativo se ha limitado a tablas de contingencia útiles cuando interesa conocer si existe relación entre las variables en ordenadas y abscisa.. En alguna ocasión también se ha construido tablas de 3 variables. Con ello, se puede

obtener el valor de χ^2 e interpretarlo sin ambigüedad. Diversas muestras se encuentran en el capítulo 7 y en el capítulo 4.

3.11. Interpretación y comparación de los resultados

Los capítulos 4, 5, 6 y 7 están dedicados a la descripción, interpretación y comparación de los resultados.

Capítulo 4

EL CONCEPTO DE ENERGIA EN ALUMNOS DE PRIMARIA

4.1. Introducción

El objetivo en la primera parte de la investigación ha sido explorar con la máxima profundidad todas las ideas que los chicos de 11 a 13 años expresan acerca de la energía. A partir de hacer salir a la luz estas ideas podíamos:

- a) Constrarlas con las observadas en chicos de otros países.
- b) Comparar si hay diferencias significativas entra las ideas expresadas por chicos de diferentes escuelas y niveles.
- c) Las ideas se exploraban desde diferentes aspectos y cada idea expresada desde una vertiente podía (o no) estar conectada con otra idea expresada desde otra vertiente. Si pudiéramos establecer estas conexiones podríamos llegar a formular algunos conjuntos de ideas, y definir unas estructuras propias para cada chico.

Si alguna de las ideas obtenidas en alguno de estos aspectos va ligada a cierta concepción en alguno de los otros, podremos tener una visión de las redes teóricas que los chicos disponen. Si por el contrario, unas ideas en cierto aspecto no implican ciertas ideas en otros, o sea, si poseer ciertas ideas no condiciona tener otras, podremos hablar de miniteorías aisladas sin nexo de unión y sin formar unos "alternative frameworks".

Para llevarlo a cabo hemos administrado los cuestionarios Q-1 y Q-2 que se han descrito en el capítulo 3

4.2. Cuestionario Q-1

El cuestionario Q-1 se ha aplicado a 100 alumnos que no habían seguido ningún curso sobre energía. Los alumnos eran de dos escuelas y dos niveles diferentes. La muestra es de 50 alumnos de la escuela O y 50 de la escuela C. En total había 60 alumnos de 6º y 40 de 7º de E.G.B. En el capítulo 3 se dan más detalles de las características de los alumnos de cada Escuela y de las formas de aplicación del cuestionario

El cuestionario Q-1 está formado por dos preguntas abiertas:

Q-1-1. ¿Qué crees que significa la palabra energía?

Q-1-2. Escribe 3 o 4 frases que contengan la palabra energía

4.3. Análisis de datos y Dominios elegidos

Las respuestas suministradas por los alumnos fueron codificadas para poderlas analizar minuciosamente. La lectura de las respuestas mostró que resultaba adecuado analizarlas teniendo en cuenta cuatro aspectos:

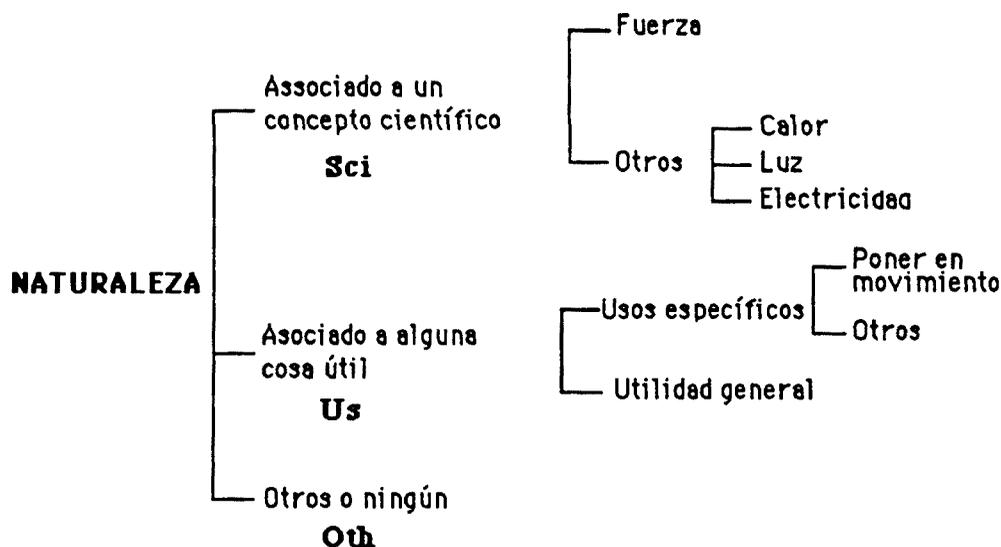
- A. Cuáles son las concepciones de los alumnos sobre la **Naturaleza** de la energía.
- B. Cuáles son las situaciones, acontecimientos u objetos que los alumnos piensan que necesitan energía: **Función** de la energía.
- C. De donde piensan los alumnos que procede la energía. Puntos de procedencia u **Origen** de la energía.
- D. Su idea de **almacenamiento** de la energía.

A cada uno de ellos le denominamos dimensión o dominio. Los detalles del análisis están en las siguientes páginas.

4.4. Concepciones sobre la naturaleza de la energía

4.4.1. Categorías establecidas

En el siguiente esquema quedan reflejadas las concepciones de los alumnos acerca de la energía, extraídas de las cuestiones 1 y 2 del cuestionario Q-1



4.4.2. Descripción de los resultados

Para la primera cuestión:

De la cuestión 1, cuestionario Q-1-1: El número de respuestas de cada categoría es:

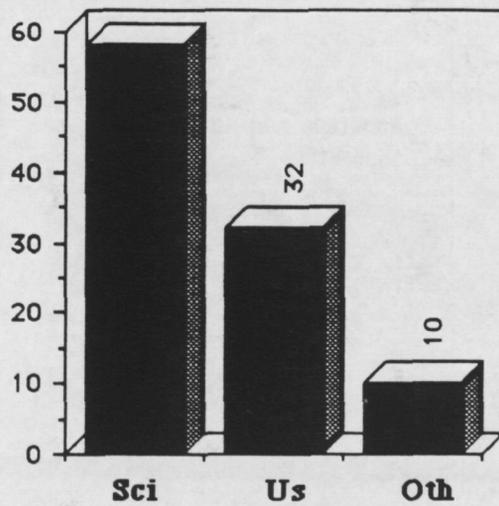
Sci.58
Us 32
Oth.	10
Total.....	100 respuestas

Esto indica que:

Cuando se pregunta a los alumnos "¿Qué entienden por energía?" (cuestión Q-1-1), la respuesta más frecuente es: "la energía es una fuerza..." 53%. Es frecuente asociar también la energía con otras palabras científicas como calor, luz o electricidad. En conjunto, estas asociaciones con términos científicos suponen un 58 casos (53+5).

En otros casos asocian energía con "algo útil con usos específicos" (poner en acción, mover, etc...): 20 casos de un total de 100. Entre los 100 alumnos 12 dieron respuestas más generales asociadas con la energía como "algo útil para uso general." Frases incluidas en esta categoría son por ejemplo "la energía es una cosa muy útil para muchas cosas", "la energía es una cosa que no podemos ver ni tocar y se utiliza para trabajar", "energía es una cosa que necesitamos para hacerlo todo, caminar, trabajar, etc... Puede usarse con personas o máquinas".:

En general, se constata que la energía asociada a sus "usos" se da en 32 de cada 100 alumnos



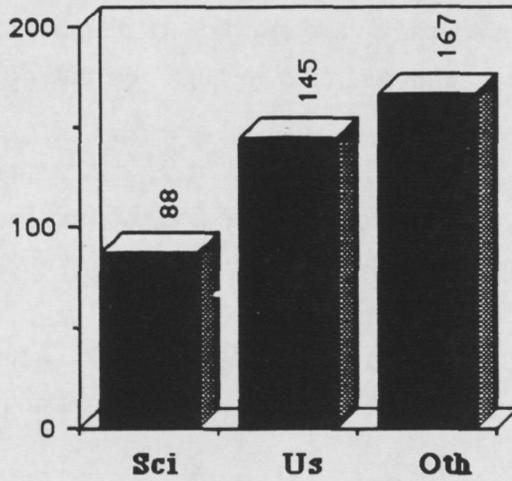
• **Naturaleza:** Diagrama de barras de frecuencias de Q-1-1

Descripción de los resultados para la segunda cuestión

La segunda cuestión Q-1-2 era: Escribe 4 frases en las que se incluya la palabra energía. De esta pregunta Q-1-2. el número de respuestas de cada categoría es:

Sci.	88
Us	145
Oth.	167
Total	400 respuestas

Cuando se pide a los alumnos que hagan asociaciones libres con la palabra energía ("escribe 4 frases que incluyan la palabra energía"), contestan explicando algunos usos de la energía en 145 frases de las 400, sólo 88 asocian energía con un concepto científico. Las más frecuentes, 167 frases, son aquellas que no dan información sobre la naturaleza de la energía: los chicos explican otros aspectos de la energía, a menudo relacionados con el origen o producción de energía, o simplemente no contestan.

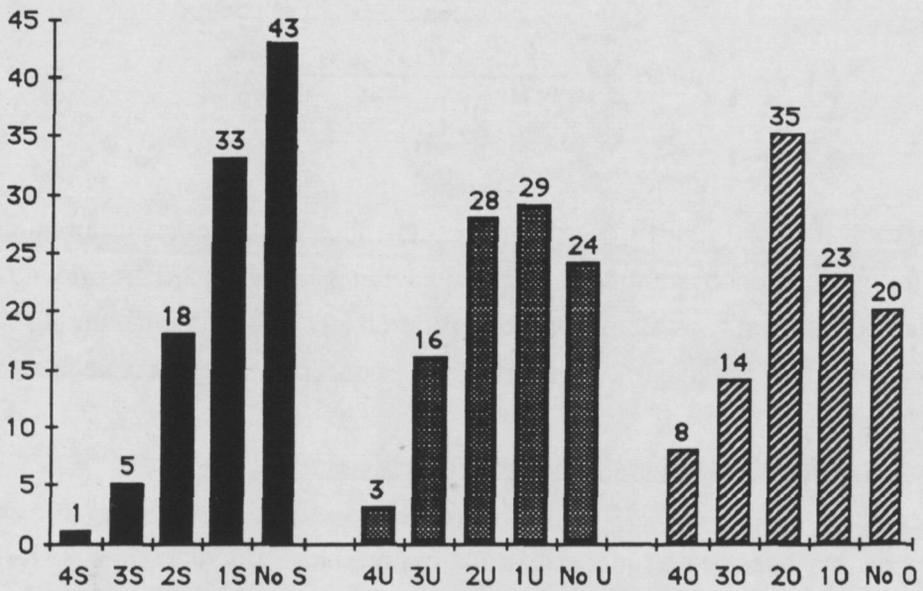


• **Naturaleza:** Histograma de frecuencias de Q-1-2

Al analizar el conjunto de 400 frases en Q-1-2. se obtiene el siguiente resultado:

De 100 alumnos 57 dan respuesta **Sci.** y 43 no.
 76 dan respuesta **Us** y 24 no.
 80 dan **Oth.** respuestas y 20 no.

Teniendo en cuenta el número de frases clasificadas en cada una de las 6 categorías, obtenemos el siguiente diagrama de barras:



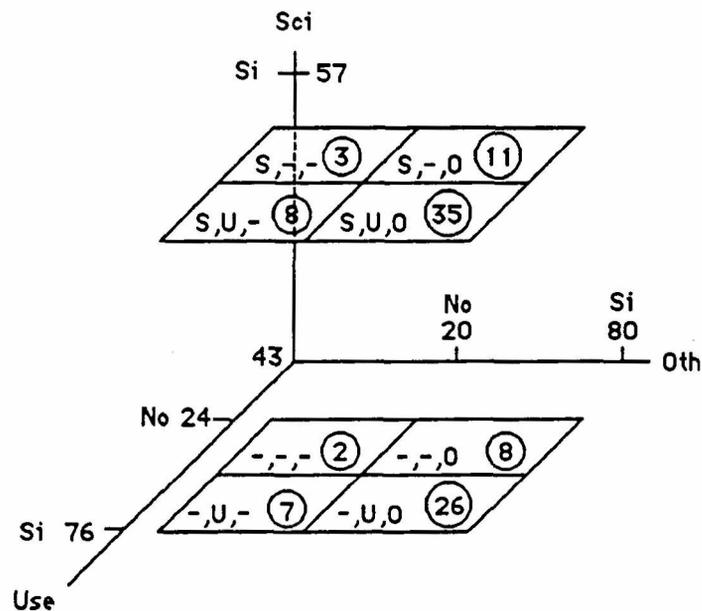
Número de frases de cada categoría

Observamos que aproximadamente la mitad de los alumnos (57%) dan respuestas de tipo Sci., pero es muy frecuente que sólo lo hagan en una de sus frases (33%) o en un máximo de dos (18%).

Poco más de tres cuartos de los alumnos (76%) dan respuestas Us, pero sólo en tres casos se responde con cuatro frases de este tipo. Lo más frecuente es que cada alumno haga una o dos frases (29% y 28% respectivamente) mostrando la concepción utilitaria de la energía.

Un gran porcentaje (80%) de los alumnos escribe frases que no se refieren a la naturaleza de la energía. Lo más usual (35%) es que 2 de las 4 frases no plasmen esta concepción.

Experimentalmente se encuentra la siguiente distribución que podemos expresar en tres dimensiones:



Podemos afirmar (a partir de cálculos estadísticos que se encuentran en el Anexo 1 al capítulo 4) que pocos alumnos hacen asociaciones libres (Q-1-2) refiriéndose sólo al uso de la energía (Us). Los alumnos que se refieren a la utilidad de la energía suelen hacerlo acompañándose de otras frases mostrando una concepción científica de la energía.

Comparación de las respuestas a las dos cuestiones.

Una de las cuestiones que este trabajo pretende dilucidar es si los alumnos son persistentes en sus concepciones y en sus razonamientos.

Para ello, trataremos ahora de averiguar si los alumnos responden de la misma manera la primera pregunta Q-1-1 que la segunda Q-1-2. En la segunda, los alumnos escribieron 4

frases, normalmente estas 4 frases no todas las cuales pertenecen a la misma categoría **Sci.**, **Us** o **Oth.**. Por esta razón es necesario asignar una única categoría a cada alumno. El criterio que para ello se adoptó fué agrupar los conjuntos de respuestas de los alumnos en tres grupos:

Conjunto de 4 frases con al menos 2 pertenecientes a la categoría **Us**.

Conjunto de 4 frases con al menos 2 de la categoría **Sci.** y menos de 2 de la categoría **Us**.

Conjunto de 4 frases con al menos 2 de la categoría **Oth.** y menos de 2 de "Sci" o 2 de **Us**.

De este modo se puede clasificar las 4 respuestas de cada uno de los alumnos. La distribución que se obtiene para los 100 alumnos es:

-Al menos 2 Sci. < 2 Us	19 alumnos
-Al menos 2 Us	47 "
-Al menos 2 Oth. <2 Sci. o <2 Us ...	34 "

Para poder decidir si esta nueva agrupación es representativa, se intenta comparar estos nuevos resultados con los que se consiguieron al estudiar las 400 frases por separado. Se procede a hacer una biyección con los resultados.

Sci - 88.....	Al menos 2 Sci y < 2 Us	- 19
Us - 145.....	Al menos 2 Us	- 47
Oth. - 167.....	Al menos 2 Oth. y < 2 Us o 2 Sci.	- 34
<hr/>		<hr/>
400		100

¿Estos nuevos conjuntos de resultados son también representativos de las respuestas a Q-1-2? Para determinar si los dos conjuntos de resultados son iguales o difieren significativamente podemos hacer la tabla de contingencia correspondiente y calcular el valor de chi-cuadrado.

Valores observados				Valores esperados		
88	145	167	400	88^0	151^{-6}	161^{+6}
19	47	34	100	22^{-3}	38^{+9}	40^{-6}
107	192	201	500			

$$\chi^2 = 3.9$$

Df = 2 No significativa

Los dos grupos de resultados no difieren significativamente. Entonces se puede considerar a los nuevos resultados como representativos de Q-1-2.

Podemos ya comprobar si las respuestas dadas en Q-1-1 correlacionan con las dadas en Q-1-2. Ello nos permitirá decir si los alumnos son consistentes en su concepción de la naturaleza de la energía

Para ello hacemos la tabla de contingencia entre los nuevos resultados de Q-1-2 y los obtenidos para Q-1-1

		Q.1.1			
		Sci	Us	Oth.	
Q.1.2	Al menos 2 Sci y ningún 2 Us	13^{+2}	5^{-1}	1^{-1}	19
	Al menos 2 Us	28^{+1}	15^0	4^{-1}	47
	Al menos 2 Oth y no 2 Sci o 2 Us.	17^{-3}	12^{+1}	5^{+2}	34
		58	32	10	100

$$\chi^2 = 3.1$$

$$df = 4$$

No hay correlación entre las respuestas de la primera y segunda pregunta. Los alumnos no son consistentes en sus respuestas en Q-1-1 y Q-1-2. Los resultados dados a estas dos preguntas son independientes.

¿Podemos reflejar o constatar esta inconsistencia de algún otro modo?

Para intentar conocer si el grupo de alumnos que dieron respuestas de concepción científica Sci en la primera pregunta hacen al menos 2 frases con esta concepción en la

segunda pregunta se agrupa categorías y se construye la tabla de contingencia correspondiente:

Q.1.1	↓	Q.1.2 →		
		Sci	No Sci	
Al menos 2Sci		18 ⁺⁴	6 ⁻⁴	24
< 2 Sci		40 ⁻⁴	36 ⁺⁴	76
		58	42	100

$\chi^2 = 4.2$
 $df = 1$

De nuevo constatamos que los alumnos no son persistentes en sus respuestas en relación a la concepción científica. Pueden haber expresado una concepción científica de la naturaleza de la energía en la primera de las cuestiones y no hacerlo en la segunda y viceversa.

Podemos imaginar que sólo son inconsistentes en relación a dar o no una concepción científica de la naturaleza de la energía.

¿Son consistentes en la categoría Us?

Q.1.1	↓	Q.1.2 →		
		Us	No Us	
≥ 2 Us		14 ⁻¹	33 ⁺¹	47
< 2 Us		18 ⁺¹	35 ⁻¹	53
		32	68	100

$\chi^2 = 0.16$

Los alumnos no son tampoco persistentes en sus respuestas relacionadas con una concepción utilitaria de la energía.

En síntesis, los 100 alumnos de la muestra no son consistentes en el tipo de respuestas que dan a las dos cuestiones planteadas en el aspecto de dar cierta concepción de la naturaleza de la energía. El tipo de pregunta condiciona el tipo de respuesta

Comparación de las respuestas de los alumnos por escuelas

Podemos explorar si los alumnos que pertenecen a diferentes escuelas o a distintos niveles responden de diferente manera. Podría suceder que mostraran distintas concepciones de la naturaleza de la energía los alumnos de diferentes escuelas o de cursos distintos.

Para la primera cuestión Q-1-1:

<u>Primera pregunta Q.1.1</u>					
	Sci	Us	Oth.		
Es O	24 ⁻⁵	21 ⁺⁵	5 ⁰	50	$\chi^2 = 4.72$ Significación <0.1 y >0.05
Es C	34 ⁺⁵	11 ⁻⁵	5 ⁰	50	
	58	32	10	100	

Observamos que, en la primera de las preguntas, más alumnos de la escuela C que de la escuela O asocian la energía con un concepto científico

Para la segunda cuestión Q-1-2

Con las 400 respuestas:

<u>Segunda pregunta Q.1.2</u>					
	Sci	Us	Oth.		
Es O	35 ⁻⁹	83 ^{+10.5}	82 ^{-1.5}	200	$\chi^2 = 6.76$ significación <0.1 y >0.05
Es C	88 ⁻⁹	62 ^{-10.5}	85 ^{+1.5}	200	
	88	145	167	400	

También en la segunda de las cuestiones, más alumnos de la Escuela C que de la Escuela O conciben la energía como un concepto científico.

Al comparar a los alumnos en vez de las frases según la clasificación hecha anteriormente, se llega a la misma conclusión:

Q.1.2

	Al menos 2S < 20	Al menos 20	Al menos 20 < 2S or 20	
Es D	6	29	15	50
Es C	13	18	19	50
	19	47	34	100

$\chi^2 = 5.6$
 $df = 2$
 significación < 0.1 y > 0.05

Comparación de los alumnos por niveles:

Podemos comparar también si se dan diferencias significativas entre las respuestas a las dos cuestiones en los dos niveles de Primaria: 6º y 7º de EGB.

Pregunta Q.1.1

	Sci	Uses	Oth	
6º	33 ⁻²	21 ⁺²	6 ⁰	60
7º	25 ⁺²	1 ⁻²	4 ⁰	40
	58	32	10	100

$\chi^2 = 0.79$
 $df = 2$
 Significación $0.5 > 0.3$

Pregunta Q.1.2

	Sci	Us	Oth	
6º	60 ⁺⁷	93 ⁺⁶	87 ⁻¹³	240
7º	28 ⁻⁷	52 ⁻⁶	80 ⁺¹³	160
	88	145	167	400

$\chi^2 = 7.56$
 $df = 2$
 Significación < 0.02 y > 0.05

Para la segunda cuestión podemos también buscar si existe correlación entre el tipo de respuestas y el nivel de EGB según los grupos clasificados agrupados (de este modo se pueden comparar alumnos en lugar de frases).

Q.1.2

	Al menos 2S < 20	Al menos 20	Al menos 20 < 2S or 20		
6°	15 ⁺⁴	31 ⁺³	14 ⁻⁷	60	$\chi^2 = 10.3$ $df = 2$ significance <0.05, >0.02
7°	4 ⁻⁴	16 ⁻³	20 ⁺⁷	40	
	19	47	34	100	

Más alumnos del nivel 6 que del nivel 7 en la segunda pregunta, y más del nivel 7 que del nivel 6 en la primera, asocian energía con el concepto científico. Pero estas diferencias no son suficientemente significativas.

4.4.3 Conclusiones acerca de las Concepciones de la naturaleza de la energía.

1. Cuando se pregunta a alumnos sin enseñanza previa "¿Qué significa energía?" (Q-1-1) responden que la energía es una fuerza en un 53% de los casos y en un 58% asocian la energía con conceptos científicos en general. Más de la mitad de los alumnos dan este tipo de respuestas. Pero si no se pide una definición de energía, sino frases libres sobre energía (Q-1-2), a menudo los alumnos dan ideas no conectadas con el concepto de la naturaleza de la energía (41.75%). En muchos casos tampoco asocian energía con un concepto científico (sólo un 22% lo hacen).ni suelen decir que la energía sea una fuerza cuando no se les pide una definición de energía.

2. Al preguntar a los alumnos "¿Qué significa energía?" (Q-1-1) también encontramos un 32% de alumnos-un grupo menor- definiendo la energía como una cosa útil para hacer muchas cosas, es decir, la definen por sus funciones. Descubrimos un porcentaje similar cuando los alumnos construyen frases libres sobre la energía (Q-1-2). En un 36.25% de las frases los alumnos explican algunos procesos útiles que se pueden llevar a cabo transfiriendo energía.

3. Cuando se compara los resultados de Q-1-2 y Q-1-1, se constata diferencias muy significativas. Los resultados de cada categoría dependen mucho de la pregunta (si es Q-1-1 o bien Q-1-2). Los alumnos contestan de diferentes maneras a las dos preguntas. No son consistentes en las respuestas, al menos de la manera que se han agrupado.

El tipo de pregunta causa o evoca un cierto tipo de respuesta. Parece que los alumnos razonan distinguiendo el tipo de pregunta que han recibido.

4. Al comparar los resultados por escuelas comprobamos que en ambas preguntas, los alumnos de la escuela C dan respuestas conectadas más a menudo con la concepción científica que no los de la escuela O.

5. Comparando los resultados por niveles, los resultados son menos claros, incluso contradictorios. En todo caso las diferencias observadas no son significativas a un nivel de confianza ≤ 0.2 con lo que consideramos en lo sucesivo que las respuestas a las preguntas Q-1-1 y Q-1-2 no dependen del curso o nivel del alumno. Si el tipo de respuesta es independiente del nivel, entonces se puede trabajar sin hacer distinción entre niveles. Se puede usar la muestra como un total.