

LA ELECTRICIDAD, ¿UNA ENERGÍA LIMPIA? CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS Y TERMOQUÍMICOS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN DE LA FACTURA DE LA LUZ

ALACID CÁRCELES, Mercedes; CASTELLAR RODRIGUEZ, M^a Rosario;
OBÓN DE CASTRO, José María. Universidad de Politécnica de Cartagena,
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

RESUMEN

El empleo de metodologías activas [1,2] nos lleva a la búsqueda de aplicaciones prácticas en el desarrollo de las materias, en las que, además de encontrar una relación con la vida cotidiana, el alumno tenga que resolver pequeños problemas que le ayuden en la comprensión de los ejemplos planteados.

Hemos aplicado esta metodología en la asignatura de Fundamentos Químicos de la Ingeniería, del Primer Curso de Ingeniería Industrial, en la Universidad Politécnica de Cartagena. En esta comunicación presentamos un ejemplo práctico aplicado a los temas de Estequiometría y de Termoquímica: la información de la factura de la electricidad.

En la factura de la luz aparece detallado el porcentaje de las fuentes de energía que participan en la producción de la electricidad. Además, se indica el volumen de CO₂ liberado por kWh. Los alumnos tendrán que relacionar ambos datos, para lo cual identificarán las fuentes de energía que son combustibles, identificarán las reacciones y calores de combustión y buscarán el rendimiento promedio en la producción de electricidad.

Se ha observado una mayor implicación de los alumnos en la resolución de este tipo de problemas prácticos, por lo que nos proponemos extender esta metodología en la medida de lo posible a otros temas y asignaturas.

1. INTRODUCCIÓN

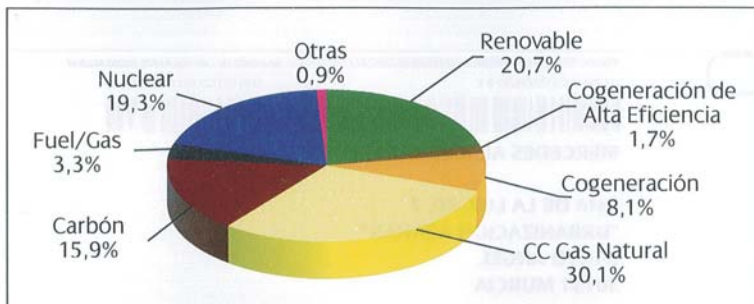
Estamos acostumbrados a aplicar el calificativo de “limpio” al referirnos a coches, u otros aparatos, que se mueven gracias a la energía eléctrica. En realidad, el calificativo no es del todo incorrecto, ya que los coches eléctricos no expulsan gases mientras están en marcha, gracias a lo cual no deterioran la calidad del aire del entorno en el que se mueven. Sin embargo, para hacer un balance global de la contaminación provocada por el funcionamiento de un coche eléctrico habrá que retrotraerse al proceso de generación de la energía eléctrica que lo impulsa.

En este sentido, la electricidad no se puede considerar como una fuente de energía, sino como un vector energético. Un vector energético es una forma de energía que se ha generado a partir de otra primaria (como puede ser la energía química de los combustibles, o la energía potencial de un salto de agua, o la eólica...) y que se utiliza para transportarla desde el punto de producción hasta el punto de consumo.

La información sobre el origen de la electricidad se puede encontrar en la factura de la luz que nos llega a casa todos los meses (Figura 1). En ella aparece el siguiente gráfico, en el que se observa que aproximadamente un 50% de la electricidad que consumimos se genera a partir de combustibles fósiles, como carbón, gas natural y otros derivados del petróleo.

ORIGEN DE LA ELECTRICIDAD

Mezcla de Producción en el Sistema Eléctrico Español 2008



El Sistema Eléctrico Nacional ha exportado un 3,8% de producción neta total nacional.

Origen	Mezcla de Producción en el Sistema Eléctrico Español
Renovable	20,7%
Cogeneración de Alta Eficiencia	1,7%
Cogeneración	8,1%
CC Gas Natural	30,1%
Carbón	15,9%
Fuel/Gas	3,3%
Nuclear	19,3%
Otras	0,9%

IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El impacto ambiental de su electricidad depende de las fuentes energéticas utilizadas para su generación.

La media del sistema eléctrico español corresponde los siguientes valores:

Emisiones de dióxido de carbono Media Nacional	
Contenido de carbono Kg de dióxido de carbono por kWh	0,39

Residuos radioactivos Alta Actividad Media Nacional	
Residuos Radioactivos Miligramos por kWh	0,42

Figura 1: Información sobre el origen de la electricidad que aparece en la factura de la luz

En esta comunicación se plantea la realización de una actividad-seminario con varios objetivos:

1. Describir las formas de producción de energía eléctrica.
2. Describir los tipos de combustibles fósiles y su formulación promedio.
3. Escribir las reacciones de combustión de los diferentes combustibles
4. Calcular el calor desprendido en estas combustiones, y los gramos de CO₂ por kJ desprendido para cada tipo de combustible.
5. Utilizando valores de rendimientos netos en la producción de electricidad para los distintos tipos de centrales (aportados por el profesor), los alumnos tratarán de reproducir el dato de emisiones de CO₂ que aparece en la factura.
6. A partir del consumo anual de electricidad en España, se calcularán los kg de CO₂ desprendidos y de residuos radiactivos.

Esta actividad se plantea para alumnos de bachillerato, pudiendo llevarse a cabo de forma coordinada entre las asignaturas de Tecnología y Química, así como para grupos de Química General en la Universidad, especialmente en estudios de Ingeniería.

2. OBTENCIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE COMBUSTIBLES FÓSILES

En España, como puede observarse, aproximadamente el 50% de la electricidad se genera a

partir de combustibles fósiles, en centrales termoeléctricas. Una central termoeléctrica es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de calor. Este calor puede obtenerse tanto de la combustión combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón) como de la fisión nuclear del uranio u otro combustible nuclear.

En su forma más clásica, las centrales termoeléctricas consisten en una caldera en la que se quema el combustible para generar calor que se transfiere a unos tubos por donde circula agua, la cual se evapora. El vapor obtenido, a alta presión y temperatura, se expande a continuación en una turbina de vapor, cuyo movimiento impulsa un alternador que genera la electricidad. Luego, el vapor es enfriado en un condensador donde circula por tubos agua fría de un caudal abierto de un río o por torre de refrigeración (Figura 2). La eficiencia de estas centrales difícilmente alcanza un 30% [3].

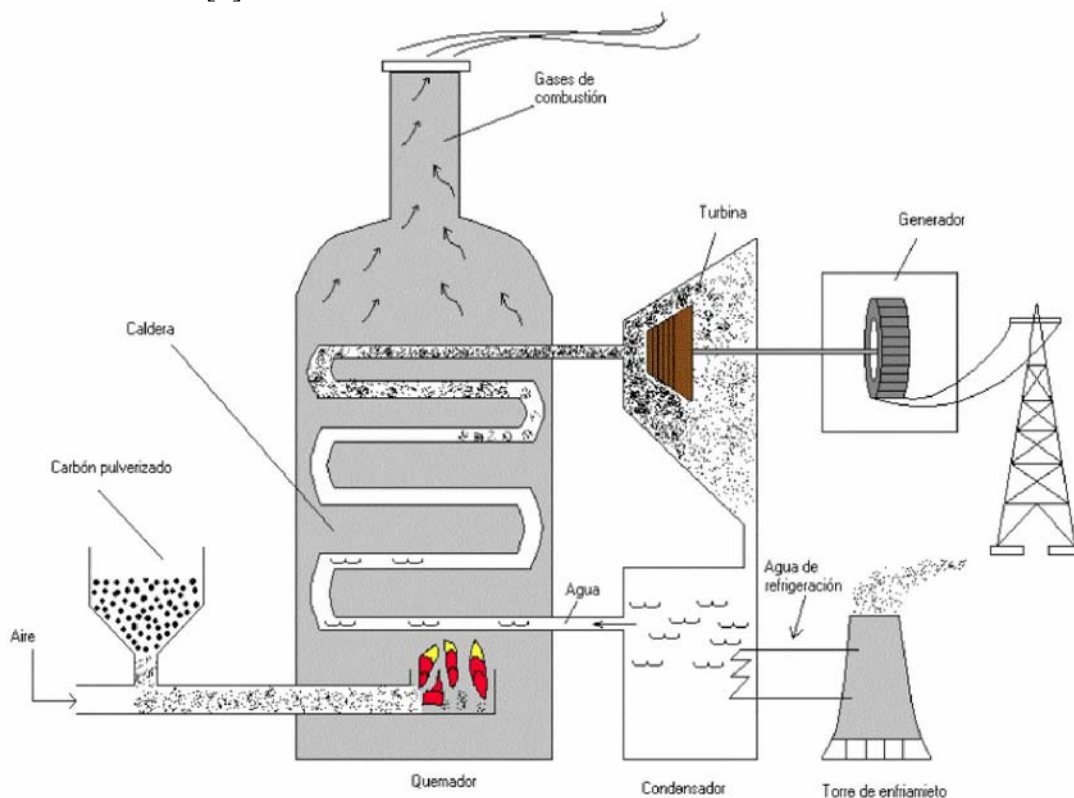


Figura 2: Esquema del funcionamiento de una central termoeléctrica clásica

Más eficientes que las centrales termoeléctricas clásicas son las centrales de ciclo combinado (Figura 3). En España, aproximadamente el 30% de la electricidad se genera en centrales de ciclo combinado de gas natural. Las centrales termoeléctricas de ciclo combinado utilizan los gases de la combustión del gas natural para mover una turbina de gas. En una cámara de combustión se quema el gas natural y se inyecta aire para acelerar la velocidad de los gases y mover la turbina de gas. Como, tras pasar por la turbina, esos gases todavía se encuentran a alta temperatura (500 °C), se reutilizan para generar vapor que mueve una turbina de vapor. Cada una de estas turbinas impulsa un alternador, como en una central termoeléctrica común. Gracias al ciclo combinado, los rendimientos en la producción de electricidad alcanzan hasta un 58%.

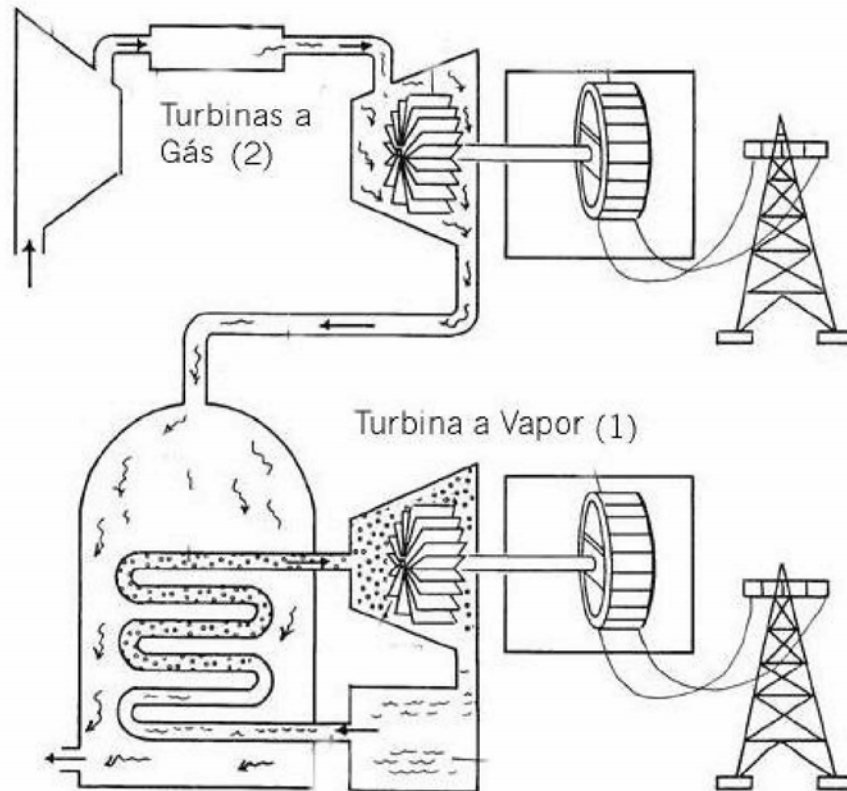


Figura 3. Esquema del funcionamiento de una central de ciclo combinado

Se muestra en el mapa (Figura 4) el emplazamiento de las centrales eléctricas en España [4]. Como puede observarse, en la zona norte se emplazan gran cantidad de centrales térmicas, en las proximidades de los yacimientos de carbón. En la región de Murcia cabe destacar la central de ciclo combinado del Valle de Escombreras, y algunas otras centrales mucho más pequeñas de energías renovables (hidráulica, eólica y solar).



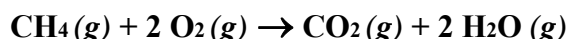
Figura 4: Emplazamiento de las centrales eléctricas en España

A continuación se describen los combustibles utilizados en las centrales, se calcula su poder calorífico y la relación entre el CO₂ desprendido y la electricidad producida.

2.1 Gas natural

El gas natural es un combustible que se compone mayoritariamente de gas metano (CH₄) en una proporción muy alta (90-97%), etano (2-8%), propano (0,2-2%), y puede contener cantidades mínimas de otros gases, como agua, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y helio.

Como su composición mayoritaria es de metano, podemos escribir su reacción de combustión como:



Se propone que el alumno, además de formular la reacción de combustión, investigue el calor que se desprende en ésta, para lo que se le suministra bibliografía con tablas de calores de formación de todos los compuestos que intervienen en las reacciones de combustión [5]. El calor de combustión del metano hasta CO₂ y agua vapor resulta ser:

$$\Delta H_c = -802 \text{ kJ/mol} \approx -50 \text{ kJ/g}$$

Es decir, al quemar un mol de metano se desprenden 802 kJ, o lo que es lo mismo, 50 kJ por gramo de gas natural quemado. Además, por cada mol de gas natural se desprende un mol de CO₂, es decir 44 g de CO₂.

Por tanto, podemos decir que los gramos de CO₂ desprendidos por kJ desprendido son:

$$\text{Gramos}(\text{CO}_2)/\text{kJ} = 44/802 = 0,055 \text{ g/kJ}$$

Si aplicamos el rendimiento que se obtiene en las centrales de ciclo combinado (~58%), la masa de CO₂ por kWh de electricidad producida será algo mayor:

$$\text{Gramos}(\text{CO}_2)/\text{electricidad producida} = 44/802/0,58 = 0,095 \text{ g/kJ} * 3,6 = 0,34 \text{ Kg/kWh}$$

2.2 Carbón

El carbón es un combustible sólido con una estructura química basada en el grafito, con defectos en su estructura. Está presente en la naturaleza en distintas formas según su grado de fosilización. La hulla y la antracita son los carbones más antiguos, presentando elevados poderes caloríficos. Los lignitos y las turbas tienen menor contenido energético y un contenido en materia volátil mucho mayor, por lo que resultan de menor interés comercial.

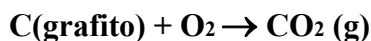
En la tabla 1 se muestran los poderes caloríficos de estos cuatro tipos de carbón, tanto inferior, PCI (combustión formando CO₂ y agua gaseosa) como superior, PCS (combustión formando CO₂ y agua líquida) [6,7]

Desde el punto de vista ambiental, la presencia de azufre, nitrógeno y metales pesados, y la inevitable formación de CO₂ en su combustión, tiene consecuencias importantes. El azufre está presente en una proporción que oscila entre un 0,2 a un 7%. Éste se puede eliminar parcialmente en la fase de extracción o bien se pueden retener sus gases de combustión una vez quemado. Si no es así, los óxidos de azufre pueden dar lugar a la conocida lluvia ácida, con graves consecuencias ambientales en el entorno de las centrales termoeléctricas basadas en el carbón.

Tabla 1. Poder calorífico de los diferentes tipos de carbón

Combustible	Densidad media kg/m ³	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Turba	360	9000	9600
Lignito	1050	16000	16600
Hulla	1350	26000	26700
Antracita	875	33400	34200

Para hacernos una idea de la reacción de combustión del carbón escribiremos la reacción más sencilla, la reacción de combustión del grafito,



El calor desprendido en esta reacción coincide con el calor de formación del CO₂,

$$\Delta H_c = \Delta H_f(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ kJ/mol} \approx -32,8 \text{ kJ/g}$$

Como vemos, es un valor muy parecido al poder calorífico inferior de la antracita. Al igual que hemos hecho para el gas natural, hemos de calcular los gramos de CO₂ desprendidos por kJ producido:

$$\text{Gramos}(\text{CO}_2)/\text{kJ} = 44/393,5 = 0,11 \text{ g/kJ}$$

Si aplicamos el dato de la eficiencia de estas centrales termoeléctricas, que difícilmente alcanza el 30% (vamos a tomar un valor de 28%)[3], la cantidad de CO₂ por kWh de electricidad producido se hace más alta:

$$\text{Gramos}(\text{CO}_2)/\text{electricidad producida} = 44/393,5/0,28 = 0,39 \text{ g/kJ} * 3,6 = 1,42 \text{ Kg/kWh}$$

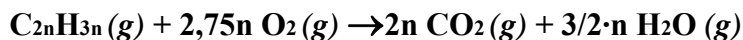
Resultado que cuadruplica al CO₂ desprendido en las centrales de gas natural con ciclo combinado.

2.3 Petróleo

El petróleo es un combustible fósil en estado líquido formado por una mezcla de multitud de tipos de hidrocarburos (lineales, ramificados, aromáticos, saturados e insaturados...) Para su utilización como combustible hay que hacer un tratamiento previo, el refino, que consiste en separar estos componentes en grupos en función de su diferencia de volatilidad. Los más volátiles son las fracciones ligeras, entre los que se encuentran los gases, la gasolina y la nafta. En las fracciones medias tendríamos el gasóleo, y en las pesadas se encuentran los fuelóleos y los asfaltos, entre otros.

El 3,3% de la producción nacional de electricidad se producen centrales termoeléctricas que utilizan fuel o gas natural como combustible. La composición del fuelóleo es muy variada. Es una de las fracciones más pesadas del petróleo. Los fuelóleos contienen mezclas complejas de componentes con un peso molecular relativamente elevado. Contiene muchos tipos de hidrocarburos de cadena larga (más de 20 carbonos) y aromáticos policíclicos (fenantrenos, benzopirenos, antracenos,...), además de poder contener otros elementos, como oxígeno, azufre, nitrógeno y metales pesados. Su poder calorífico es de alrededor de 9,8 Kcal/g [8,9]. Tomando

como fórmula general para el fuel $C_nH_{1,5n}$ (intermedia entre las parafinas, C_nH_{2n} , y los compuestos aromáticos, C_nH_{2n}), escribiríamos su reacción de combustión:



Como disponemos de un poder calorífico referido al gramo de combustible, vamos a calcular la cantidad de CO_2 desprendido referido también al gramo de combustible:

Peso molecular del fuel $\rightarrow n \times (12 \times 2 + 3) = 27n$

Masa de CO_2 desprendida en la combustión $\rightarrow 44 \times 2 \times n$

Por tanto,

Masa de CO_2 desprendido por gramo de combustible $\rightarrow 88n/27n = 3,26 g$

Relacionando este dato con el poder calorífico de 41 kJ/g, tenemos:

Gramos(CO_2)/kJ = $3,26/41 = 0,08 g$ de CO_2 /kJ

Aplicando la eficiencia promedio de las centrales termoeléctricas, 28%, la cantidad de CO_2 por kWh de electricidad producido resulta ser intermedia entre la del gas natural y la del carbón:

Gramos(CO_2)/electricidad producida = $0,08/0,28 = 0,284 g/kJ \times 3,6 = 1,02 Kg/kWh$

3. Media nacional de emisiones de dióxido de carbono

A continuación, vamos a tratar de reproducir el dato de emisiones de la información de la factura de la luz.

En la siguiente tabla mostramos, a modo de resumen, los resultados obtenidos para los diferentes combustibles fósiles que intervienen la producción de electricidad.

Tabla 2. Resumen de resultados obtenidos para los diferentes combustibles.

	PCI (kJ/g)	g CO_2 /kJ desprendido	Eficiencia central	Kg CO_2 /kWh	% produc. eléctrica
Carbón	32,8	0.11	28%	1.42	15,9
Fuelóleo	41	0.0795	28%	1.02	3,3
Gas natural	50	0.055	58%	0.34	30,1

Sólo nos queda ponderar las emisiones de CO_2 /kWh obtenidas para cada combustible con su porcentaje de contribución en el sistema de producción español.

Emisiones de CO_2 /kWh electricidad = $(0,34 \times 30,1 + 1,42 \times 15,9 + 1,00 \times 3,3)/100$

Emisiones = 0,36 Kg CO_2 /kWh electricidad en España

Si comparamos con la información de la factura de la luz, el resultado es prácticamente el mismo (en la factura aparecen 0,38 kg/kWh). La ligera discrepancia se debe a que no disponemos de un dato exacto de eficiencia de las centrales y a que hemos promediado la composición de los combustibles.

4. Total de emisiones y residuos anuales en España

Para terminar con la actividad, el profesor aporta el dato del **consumo anual de electricidad en España** [10], que, para el año 2009, fue de **268300 GWh**. A partir de ese dato, resulta sencillo calcular la cantidad total de CO₂ desprendido, así como el total de residuos radiactivos de alta actividad generados, aprovechando que la factura también suministra esa información.

$$\text{CO}_2 \text{ desprendido} / \text{año} = 0,38 \text{ Kg} / \text{kWh} \times 268300 \text{ GWh/año} \times 10^6 \text{ kWh} / \text{GWh} = 1,02 \times 10^{11} \text{ Kg}$$

$$\text{CO}_2 \text{ desprendido} / \text{año} = 1,02 \times 10^{11} \text{ Kg/año} = \mathbf{102 \text{ millones de Tm/año}}$$

Podemos, además, pasar este dato a volumen. Considerando al CO₂ como un gas ideal, sabemos que un mol, es decir, 44 g en el caso del CO₂, ocupan 22,4 litros. Por tanto,

$$\text{Vol. de CO}_2 / \text{año} = 1,02 \times 10^{11} \times 10^3 \text{ g} \times 22,4 \text{ litros} / 44 \text{ g} = 5,2 \times 10^{13} \text{ litros} = \mathbf{52 \text{ Km}^3/\text{año}}$$

A modo de comparación, podemos calcular también el total de residuos radiactivos de alta actividad generados:

$$\text{Masa de residuos radiactivos} / \text{año} = 0,42 \times 10^{-3} \text{ g} / \text{kWh} \times 268300 \text{ GWh/año} \times 10^6 \text{ kWh} / \text{GWh}$$

$$\text{Masa de residuos radiactivos} / \text{año} = \mathbf{112,686 \text{ Tm} / \text{año}}$$

Suponiendo una densidad aproximada para estos residuos de 1,5 kg / litro, resulta un volumen de residuos de:

$$\text{Vol. de residuos radiactivos} / \text{año} = 112686 \text{ Kg} / \text{año} \times 1 \text{ litro} / 1,5 \text{ Kg} = 75124 \text{ l} / \text{año} = \mathbf{75 \text{ m}^3/\text{año}}$$

En la tabla 3 mostramos los resultados obtenidos para las emisiones anuales de CO₂, así como para el total de residuos radiactivos de alta actividad implicados en la producción de electricidad.

Tabla 3. Residuos anuales derivados de la producción de electricidad en España.

	Masa	Volumen
Emisiones de CO₂ anuales en España	102 millones de Tm/año	52 Km ³ /año
Residuos radiactivos de altaactividad	112,7 Tm/año	75 m ³ /año

5. CONCLUSIONES

La aplicación sencillos cálculos estequiométricos y termoquímicos permite calcular la cantidad de CO₂ desprendido al quemar un combustible por kJ de energía obtenida. Estos cálculos muestran que en la combustión de carbón se genera el doble de CO₂ que en la combustión de gas natural, referidos a la misma cantidad de energía desprendida. Si además tenemos en cuenta las eficiencias de las centrales termoeléctricas en las que estos combustibles están implicados (centrales de gas natural con ciclo combinado vs centrales de carbón tradicionales) la cantidad de CO₂ generada con el carbón se eleva al cuádruple de la generada en una central de gas natural con ciclo combinado.

Estos sencillos cálculos estequiométricos nos permiten calcular el total de emisiones de CO₂, por kWh de electricidad producida, así como la emisión anual en España.

En comparación con los boletines de problemas tradicionales, se ha observado que los alumnos se implican mucho más en este tipo de actividades, ya que muchos alumnos traen trabajo

preparado y participan más que en una clase de problemas expositiva. No tenemos una valoración cuantitativa de los resultados que este tipo de actividades tienen sobre el aprendizaje, pero sí tenemos constancia de su aceptación por parte de los alumnos. En las encuestas de calidad realizadas a los alumnos, algunos han resaltado el acierto de incluir estas actividades en la programación de la asignatura de Química General.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Prieto Navarro. La enseñanza universitaria centrada en el aprendizaje. Ed Octaedro. ICE. Universitat de Barcelona (2008).
- [2] J. Alonso Tapia. Motivación y aprendizaje en el aula. Cómo enseñar a pensar. Ed. Santillana. Madrid (1995).
- [3] http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2007/08/20/166035.php
- [4] <http://www.unesa.net>
- [5] P. Atkins, J. de Paula, Química Física, Ed. Panamericana (2008)
- [6] Tecnología de combustibles. I, combustibles sólidos y gaseosos.
- [7] Introducción a la Ingeniería Química. G. Calleja y col, Ed Síntesis S.A. Madrid (1999).
- [8] Wauquier, J.P.El refino del petróleo: petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación. Recurso electrónico.
- [9] <http://energia.mecon.gov.ar/Electricidad/boletines/quinquenales/1991>
- [10] https://www.thecommerce.es/epages/ea3441.sf/es_ES/?ViewObjectID=443389