	Asignatura: Fuentes de Energía		PRACTICA 1
	UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DPTO. INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS, grupo ITEA.		

Título.

Impacto ambiental de emisiones a la atmósfera y coste económico del consumo energético de un hogar.

Objetivos.

Confirmar y asentar conceptos de la teoría como balances energéticos y de materia, fuentes de energía, sistema eléctrico, emisiones contaminantes y costes. Ejercitarse en el cálculo de emisiones de contaminantes asociadas a la producción energética y en el de costes de una unidad de consumo.

Alcance.

- Identificar las emisiones de NO_x , CO , SO_x y PM_{total} en un año asociadas a la producción de cada una de las energías consumidas.
- Identificar el coste de producción de las distintas energías consumidas de acuerdo a datos en España del año 2011.
- Calcular el valor global de emisiones y coste de acuerdo al perfil de consumo y al mix de producción de la energía.
- Comparar distintas opciones realistas.

Introducción.

Las fuentes de energía pueden ser clasificadas de acuerdo a su tipo de reposición natural como:

- **Renovables:** su regeneración es más rápida que la velocidad en la que es consumida, por ejemplo la biomasa, ó simplemente porque proviene de una fuente que se supone inagotable, como por ejemplo la radiación solar.
- **No renovables:** su regeneración es muy lenta y su cantidad acumulada por la naturaleza es limitada como por ejemplo los combustibles fósiles ó la energía nuclear de fisión.

Comúnmente, los usuarios desconocen el origen, el proceso de obtención, conversión, transporte y distribución de la energía desde la fuente hasta su punto de consumo final. En este proceso, las fuentes de energía empleadas son variadas y no suele ser posible discriminar la procedencia de la energía final una vez mezclada (mix) para hacerla llegar al consumidor como un

único suministro. Por ejemplo: en la energía eléctrica consumida no se sabe de qué fuente primaria de energía proviene la misma (mix de la electricidad), ya que la energía eléctrica total en la red es la suma de las contribuciones de varias fuentes primarias de energía y en España como en muchos otros países no le es posible al consumidor elegir la fuente de procedencia.

En ese sentido, toda conversión de energía tiene unas eficiencias, emisiones y costes asociados, inherentes al tipo de fuente primaria que deben ser consideradas para poder realizar un análisis de impacto ambiental y coste del consumo energético.

Por otro lado, las residencias y entre ellas los hogares no generan productos conteniendo energía, al ser unidades netamente consumidoras.

Metodología

La energía tal y como se encuentra en la naturaleza debe pasar por una serie de procesos ó transformaciones para ser puesta a disposición del usuario. Estos procesos están compuestos por una serie de sub procesos donde la energía puede ser generada, transportada, transformada y disipada en una trayectoria lineal o hilo conductor. Puede ser necesario aportar energía que no revierte en aumentar la energía final, p. e. transporte de materia.

Se puede trazar la trayectoria que ha realizado cualquier energía E desde su forma nativa (fuente) hasta el punto de consumo \bar{E} y viceversa. Para poder cuantificar se aplica un balance energético a una sola especie energética i en una única trayectoria compuesta por l sub-procesos cuya entrega es \bar{E}_i y cuya eficiencia energética individual es $\eta_{h,i}$ para tener en cuenta sus pérdidas E' individualmente:

$$\bar{E}_{i,total} \equiv \bar{E}_{h,i} = E_i \cdot \eta_i \quad \text{Donde} \quad \eta_i = \prod_{h=1}^l \eta_{h,i} \tag{1}$$

$$\eta_{h,i} = \frac{\bar{E}_{h,i}}{\bar{E}_{h-1,i}} = 1 - \frac{E'_{h,i}}{\bar{E}_{h-1,i}} \tag{2}$$

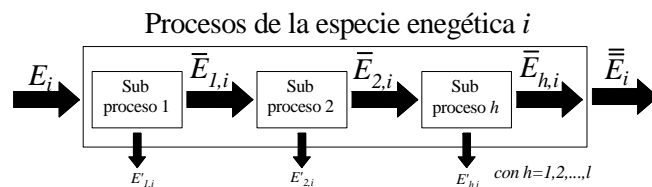



Figura 1 Balance de energía en la trayectoria de una especie genérica i con h procesos.

	Asignatura: Fuentes de Energía		PRACTICA 1
	UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DPTO. INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS, grupo ITEA.		

En la ecuación (1) $\overline{E}_{i,total}$ se refiere a la energía total requerida en el punto de consumo, mas adelante en este documento se verá que en el caso de la energía eléctrica existe una diferencia entre la energía total y la energía real consumida (demanda energética en el punto de consumo). E_i puede ser la energía primaria al entrar en un país, con lo que el consumo desde la fuente hasta la frontera no se considera, o bien puede ser la energía primaria en la fuente, si es autóctona.

Si se aporta energía a la especie i en algún punto de la trayectoria, que no revierte en el consumo, sería necesario considerar una especie energética adicional con la eficiencias terminal $\eta_{l,i}$ nula. Un ejemplo es el transporte de gas natural. En este proceso se emplean motores térmicos que consumen algo del propio gas natural transportado por el gasoducto con una eficiencia de conversión a energía mecánica en torno a 0,5, o alternativamente se emplea un motor eléctrico con eficiencia en torno a 0,95, para en un caso y en el otro mover un compresor de eficiencia en torno a 0,7. Éste bombea el gas natural para vencer las pérdidas de presión de remanso del flujo dentro del ducto las cuales terminan en un calentamiento del gas (degradaciones) por intermedio de la viscosidad; energía térmica que es perdida al ambiente en forma de calor. Por ello, la eficiencia terminal de este proceso es nula.

Para no tener que introducir ramificaciones en el balance energético hasta ahora considerado se asumirá que este eventual consumo está tenido en cuenta en la sub-eficiencia $\eta_{h,i}$ que corresponda. Esto significa que hay un consumo de energía primaria mayor que el real de la fuente considerada, al propagar estos consumos auxiliares hacia el consumo primario con sus respectivas eficiencias, como es el caso del motor eléctrico citado. En el caso de consumirse parte del propio portador de energía, se puede considerar este consumo de otra manera, como una pérdida directa; es decir, una fuga virtual del portador con la pérdida de energía correspondiente y las emisiones que correspondan (en el caso citado del motor térmico que consume el propio gas natural emitiendo CO_2 y contaminantes atmosféricos, pero no el propio gas natural pues es quemado), lo que en definitiva hace bajar la eficiencia del proceso.

En cuanto a costes, el consumidor asume el coste de producción, el de transporte, distribución y comercialización, además de los costes de alquiler de ciertos equipos necesarios, como los contadores; además asume las tasas e impuestos que correspondan y los beneficios industriales en cada caso de las empresas participantes. Para simplificar, en esta práctica se ha optado por calcular solamente los costes de producción. Los costes externos tampoco serán contabilizados.

En ocasiones una misma especie de energía final, de cantidad \tilde{E} y consumida en un cierto lapso de tiempo proviene en media de un total m de especies distintas i , durante un cierto periodo, como es el caso de la energía eléctrica. Ésta es generada mediante distintos combustibles o incluso sin consumo de combustible alguno (termosolar p. e.), usando para ello distintas tecnologías para

formar el mix. En consecuencia, la energía total es la suma de todas las especies contributivas; por tanto se cumple que:

En términos de energía final en la red eléctrica:

$$\tilde{E} = \sum_{i=1}^m \bar{\bar{E}}_i \quad (3)$$

Las fracciones empleadas para ello x_i son tal que:

$$\bar{\bar{E}}_i = x_i \cdot \tilde{E} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m x_i = 1 \quad (5)$$

En términos de energía primaria habría que considerar las eficiencias correspondientes, de acuerdo al algoritmo de la Ec. (1):

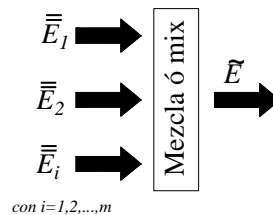


Figura 2 Proceso de mezcla ó mix de la cesta de las energías.


Determinación de la energía en el punto de consumo.

El primer paso para determinar la emisión de contaminantes y el coste de producción en un año debido al consumo de un hogar, es determinar la cantidad de energía requerida en ese periodo de tiempo para cubrirlo.

Para ello se debe conocer la cantidad, frecuencia de uso y potencias de los equipos que están conectados a la red eléctrica, conexión de gas (natural en nuestro ejemplo) u otra fuente de energía. De modo que si sumamos todas estas contribuciones tenemos que:

$$\dot{\bar{E}}_i = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^e \dot{\bar{E}}_{i,k} \langle t \rangle \quad (6)$$

Los paréntesis quebrados indican dependencia funcional, para distinguirlos del paréntesis algébrico. En la Ec. (6) $\dot{\bar{E}}_i$ Representa la potencia consumida instantáneamente y que se disipará, t

	Asignatura: Fuentes de Energía	PRACTICA 1
	UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DPTO. INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS, grupo ITEA.	

indica el tiempo, i enumera la especie de energía usada (eléctrica, gas natural, biomasa, etc.), k indica el equipo individual que consume (lavadora, calefacción, etc.) de un total de e de ellos.

La Ec. (6) de consumo instantáneo de energía (potencia) es global y por ello no identifica la especie de energía consumida. No obstante, podemos re-escribir la misma para cada una de las especies de energía final consumida. Por tanto:

$$\dot{\bar{E}}_i = \sum_{k=1}^{e_i} \dot{\bar{E}}_{i,i,k} \langle t \rangle \quad (7)$$

Luego, para determinar la energía real consumida en un periodo de tiempo determinado por un total de e_i equipos, se debe integrar la ecuación (7).

$$\bar{\bar{E}}_i = \sum_{k=1}^{e_i} \int_0^t \dot{\bar{E}}_{i,i,k} \langle t \rangle dt \quad (8)$$

Si consideramos el caso de la energía eléctrica, toda la potencia que llega al punto de consumo no necesariamente es capaz de producir trabajo, esto es debido a que una fracción se pierde en calor o simplemente porque en sistemas que no son puramente resistivos los condensadores y bobinas existentes “almacenarían” parte de esta energía. Por tanto, para tener en cuenta este efecto se puede introducir en la ecuación (8) un factor de potencia¹ global de los equipos conectados al único cuadro eléctrico que se asume alimenta la residencia, donde $FP = \cos\varphi \leq 1$. Por tanto:

$$\bar{\bar{E}}_{i,total} = \frac{1}{FP} \cdot \sum_{k=1}^{e_i} \int_0^t \dot{\bar{E}}_{i,i,k} \langle t \rangle dt \quad (9)$$

Por otro lado, si introducimos en la ecuación anterior la frecuencia horaria de uso de cada equipo f_i (fracción del tiempo que se usa en horas por día) y aproximamos la integral por la regla de los rectángulos (suma de Riemann), tendríamos la ecuación del consumo energético en el hogar para un periodo horario T :

$$\bar{\bar{E}}_{i,total} = \frac{1}{FP} \sum_{k=1}^{e_i} \sum_{t=1}^T \dot{\bar{E}}_{i,i,k} \cdot N_k \cdot \Delta t \quad (10)$$

¹ El factor de potencia es el cociente entre la potencia activa consumida, es decir, la que proporciona potencia real, y la total, que es la activa más la reactiva. La reactiva es una potencia que circula por la red, pero que no realiza trabajo alguno. Sin embargo, es medida por los contadores y por ello facturada, causando cobro. Tiene sentido hacerlo pues consume capacidad de transporte en la red y es responsabilidad del usuario lograr que este factor de potencia sea lo más próximo a la unidad disponiendo de los equipos de corrección del factor de potencia adecuados. Por lo tanto este factor ha de ser tenido en cuenta para el coste del consumo.

Donde N_k representa el número de equipos (unidades).

Por último, si sustituimos el tiempo de integración por una frecuencia de uso (f_i) y asumimos (por fines prácticos) para simplificar los cálculos que cada mes tiene 30 días la ecuación (10) queda finalmente como:

$$\bar{E}_{i,total} = 30 \text{ día} \cdot \frac{1}{FP} \cdot \sum_{k=1}^{e_i} \dot{E}_{i,k} \cdot N_k \cdot f_i \quad (11)$$

Una vez determinada la energía consumida, uno puede retroceder a cualquier etapa de la trayectoria de la energía llegando incluso hasta la correspondiente fuente primaria haciendo uso de las Ecs. (1), (3) y (4).

Cantidad de combustible requerido


Se define el poder calorífico inferior (PCI) como la máxima cantidad de calor que puede ser aprovechada al quemar la unidad de masa, típicamente 1 kg de combustible, sin condensación alguna de la humedad producto de la combustión. Este valor es determinado experimentalmente en un calorímetro y es función de la composición química del combustible, de modo que la cantidad de combustible teóricamente necesario para generar una cantidad determinada de energía viene dada por la siguiente expresión. En la práctica habrá que considerar una eficiencia de combustión y de recuperación del calor de los gases de combustión, que conjuntamente forman la eficiencia energética² de la caldera.

$$m_i = \frac{E_i}{PCI_i} \quad (12)$$

Tabla 1 Poder calorífico inferior de algunos combustibles

Tipo combustible	PCI kWh/kg
Gas natural	13,5
Carbón (Lignito)	4,436
Leña 35% de humedad	3,34

² Cuando no interviene la electricidad se habla de eficiencia térmica en lugar de eficiencia energética. Ello proviene de que a menudo su expresión simplificada es función exclusiva de las temperaturas.

	Asignatura: Fuentes de Energía		PRACTICA 1
	UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DPTO. INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS, grupo ITEA.		

Emisión de contaminantes

Para la estimación de las emisiones de contaminantes se suele usar los llamados factores de emisión (FE) que proporcionan valores de emisiones, por unidad de consumo final o de producción justo a la salida de la central ó en cualquier otro punto de consumo. Se pueden encontrar en la literatura. A su vez pueden ser: i) factores de emisión directa: considerando únicamente la emisión de contaminantes producto de un proceso, ii) indirectos: donde se considera las emisiones acaecidas para producir algún bien o servicio asociado a un proceso. Como ejemplo la generación eólica, que si bien es cierto que la misma no origina directamente ningún contaminante por no haber ninguna combustión asociada al mismo, cierta cantidad de contaminantes fueron emitidos en el proceso de fabricación de las aeroturbinas y también durante la producción; por ejemplo, consumos de combustibles en el mantenimiento y operación y finalmente en su desmantelamiento y gestión como residuo. Los datos que se proporcionan se asume que son solamente para las de tipo directo. Por tanto las emisiones del contaminante k se pueden calcular como:

$$C_{i,j} = 3,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{GJ}}{\text{kWh}} FE_{i,j} E_i \quad (13)$$

Donde:

$FE_{i,j}$: Factor de emisión del contaminante j (p. e. g/GJ) para la especie energética i .

E_i : Energía producida (p. e. kWh).

Tabla 2 Factores de emisión en la generación de electricidad (g/GJ_e).

Combustible (i)	NO _x	CO	SO _x	PM _{total} ⁽¹⁾	Fuente
Carbón (Lignito)	360	113	820	29	Ref. [1]
Gas Natural	89	39	0,3	1,8	Ref. [1]
Leña	100	1.000	43	-	Ref. [1]

Tabla 3 Factores de emisión para aplicaciones térmicas residenciales (g/GJ_t). ⁽¹⁾ Particulated Matter (materia particulada en suspensión en el aire).

Combustible	NO _x	CO	SO _x	PM _{total}	Fuente
Carbón (Lignito)	110	4.600	900	848	Ref. [2]
Gas Natural	57	31	0,5	1	Ref. [2]
Leña	74,5	5.300	20	1.390	Ref. [2]

Planteamiento del problema

Asumiremos un país hipotético que posee un sistema energético sencillo comparado con el de un país plenamente desarrollado. No se consideran intercambios con otras naciones vecinas. En él, la generación eléctrica se realiza mediante varias fuentes y tecnologías formando un mix que incorpora: i) hidráulica (regímenes ordinario y especial), ii) Nuclear, iii) ciclo combinado (donde las centrales funcionan con gas natural), iv) eólica, v) solar termoeléctrica, vi) solar fotovoltaica, vii) térmica renovable (funciona con leña que contiene una cantidad de humedad del 35%), viii) y carbón (ciclo Rankine). La producción eléctrica, costos de generación y eficiencias de las respectivas centrales de este país hipotético casualmente rinden unos datos muy similares a los de España durante el año 2011 (ver Tablas 4 y 5).

Tabla 4 Porcentaje mensual de la cobertura de la demanda eléctrica del año 2011 en España (%), Ref. [3].

Fuente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hidráulica (ordinario)	18,97	11,96	14,18	15,11	11,53	8,16	6,03	6,06	5,10	5,98	8,96	8,78
Nuclear	19,57	19,85	18,63	22,13	17,90	22,56	21,84	24,54	23,38	21,88	21,58	21,80
Carbón	8,75	11,77	13,16	12,49	15,04	13,50	19,33	19,33	22,30	21,22	18,86	17,48
Ciclo combinado	20,45	21,07	16,63	13,58	20,04	22,66	19,93	21,26	20,51	17,64	15,62	14,78
Hidráulica (especial)	2,63	2,25	2,70	2,79	2,30	1,85	1,63	1,35	1,05	0,87	1,92	1,92
Eólica	15,85	17,73	19,13	15,98	14,83	13,35	13,88	11,97	10,34	14,50	17,18	19,59
Solar fotovoltaica	1,31	2,14	2,09	3,00	3,38	3,56	3,54	3,40	3,12	2,78	1,55	1,73
Solar termoelectrica	0,16	0,40	0,40	0,65	0,73	1,06	1,21	1,03	1,02	0,79	0,35	0,36
Térmica renovable	1,21	1,24	1,25	1,44	1,47	1,31	1,37	1,43	1,49	1,59	1,53	1,50
Térmica no renovable	11,09	11,61	11,83	12,83	12,78	12,00	11,25	9,63	11,69	12,74	12,45	12,07

Tabla 5 Valores típicos de Eficiencias en la generación de energía eléctrica.

Tecnología	Eficiencia de generación	Fuente
Hidráulica (ordinario)	0,96	Ref. [4]
Nuclear	0,415	Ref. [5]
Carbón	0,35	
Ciclo Combinado	0,46	Ref. [6]
Hidráulica (especial)	0,96	Ref. [4]
Eólica	1,00	
Solar fotovoltaica	0,10	Ref. [7]
Solar termoeléctrica	0,15	Ref. [7]
Térmica renovable	0,32	
Térmica no renovable	0,35	

Encargo


- 1) Realizar el análisis de un hogar con características de consumo mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6 Características de consumo de los equipos domésticos.

Equipo	Consumo unitario (W/und.)	Und.	Frecuencia de uso (h/día)	Notas
Iluminación	32	5	1	-
Cocina eléctrica	1.500	1	0,65	-
Frigorífico	170	1	14	-
Horno	2.100	1	0,3	-
Calentador de agua (termo eléctrico 30 l)	1.500	1	1 para meses de invierno y 0,25 para meses de verano	-
Aire acondicionado	2.000	1	2	Meses de verano (Junio-Septiembre)
Calefacción eléctrica	1.800	1	2	Meses de invierno (Octubre-Mayo)
Licuadaora	120	1	0,3	-
Cafetera	1.340	1	0,16	-
Microondas	1.700	1	0,16	-
Tostador de pan	1.000	1	0,096	-
Otros	100	1	1	-
Cuadro eléctrico principal	Este cuadro eléctrico indica un factor de potencia de $\cos \varphi = 0,99$			

Para ello se pide:

- Dibujar un esquema del proceso de transferencia de energía desde la fuente primaria hasta el punto final de consumo (electricidad).
 - Calcular el coste de la producción eléctrica asociada al consumo en un año en el hogar estudiado. Suponga una pérdida en la transmisión eléctrica del 10 %. Para el régimen especial asuma que la retribución es igual al coste de producción multiplicado por 1,1.
 - Estimar la emisión directa de los contaminantes atmosféricos indicados durante el proceso de generación.
 - Calcular la cantidad de gas natural que sería necesario para producir la misma cantidad de electricidad que se ha consumido en el **hogar**, haciendo uso de una única central en ciclo combinado ($\eta = 46\%$) y una pérdida debida al consumo energético del transporte del gas natural desde la fuente hasta el punto de generación eléctrica equivalente al 5% de la cantidad de gas total.
- 2) Sustituir la cocina eléctrica por una de las mismas características pero que funcione con gas natural e igualmente sustituya la calefacción eléctrica y el termo eléctrico por una caldera de condensación que trabaje con gas natural como combustible y una eficiencia energética del 95% basado en el PCI. Suponga una pérdida por el transporte del 5% del gas total. Para ello se pide:

	Asignatura: Fuentes de Energía	PRACTICA 1
	UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DPTO. INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS, grupo ITEA.	

- a) Estimar la cantidad de gas natural necesario para cubrir la demanda citada y las emisiones contaminantes emitidas.
- 3) Suponga ahora que la caldera no es de condensación y la misma trabaja con una biomasa como combustible (Leña con 35% de humedad) y una eficiencia energética de la caldera del 85%, suponga un consumo energético para la elaboración y transporte de la leña equivalente a una pérdida de combustible del 5%.
- a) Responda las preguntas a) de la parte 2).
- b) ¿Cuál de los sistemas de calefacción emite menor cantidad de contaminantes al ambiente? ¿A qué se debe esta diferencia?

Tabla 7 Costes estimados de producción en régimen ordinario en España para el tercer trimestre de 2008, [3]

Tecnología	Producción (GWh _e)	Costes Fijos		Costes Variables ⁽²⁾		Coste Total	
		€/MWh _e	Miles de €	€/MWh _e	Miles de €	€/MWh _e	Miles de €
Hidráulica ⁽¹⁾	6.822,00	36,00	245.601,00	3,00	20.467,00	39,00	266.068,00
Ciclo Combinado	18.734,00	11,73	219.765,00	56,91	1.066.214,00	68,64	1.285.979,00
Carbón	18.392,00	13,67	251.370,00	58,16	1.069.766,00	71,83	1.321.136,00
Nuclear	11.037,00	26,37	291.060,00	18,00	198.658,00	44,37	489.718,00
Total	54.985,00	87,77	1.007.796,00	136,07	2.355.105,00	223,84	3.362.901,00

Nota: ⁽¹⁾ Se excluye el bombeo hidroeléctrico y sus costes fijos. ⁽²⁾ Incluye costes de combustible, operación y mantenimiento y derechos de emisión de CO₂.

Tabla 8 Precio medio de retribución para generación de electricidad en régimen especial, España 2008 [3].

Tecnología	Potencia Instalada (MW _e)	Energía Vendida (GWh _e)	Energía Primada (GWh _e)	Retribución Total (Miles €)	Precio Medio Retribución Total (cent€/kWh)
COGENERACIÓN (térmica no renovable)	6.190,07	17.718,22	17.718,22	2.082,45	11,75
SOLAR FV	4.346,51	6.064,33	6.008,87	2.682,34	44,23
SOLAR TE	1.528,12	2.489,37	2.489,37	795,09	31,94
EÓLICA	2.1796,29	30.887,04	30.887,04	2.669,36	8,64
HIDRÁULICA	2.033,93	3.098,03	3.098,03	268,05	8,65
BIOMASA (térmica renovable)	772,14	2.755,23	2.755,23	355,52	12,90
RESIDUOS (térmica renovable)	604,64	1.864,17	1.864,17	154,74	8,30
TRATAMIENTO DE RESIDUOS	657,94	3.000,16	3.000,16	447,08	14,90
OTRAS TECNOLOG. RENOVABLES	0,30	0,06	0,06	0,00	7,00

Referencias

- [1] United States Environmental Protection Agency, «Exposure Factors Handbook,» 1998.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, «Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,» 2006.
- [3] Comisión Nacional de Energía, «Precios y costes de la generación de electricidad,» 2008.
- [4] Á. L. Orille Fernandez, Centrales Eléctricas, Ediciones UPC, 1993.
- [5] L. Drbal, P. Boston, K. Westra y B. Erickson, Power Plant Engineering, Sexta edición ed., Kluwer Academic Press, 2003.
- [6] J. H. Horlock, Combined Power Plants, Pergamon Press, 1992.
- [7] T. Elliot, K. Chen y R. Swanekamp, Standard Hanbook of Power Plant Engineering, Segunda edición ed., McGraw Hill, 1998.
- [8] A. Lecuona Neumann, Apuntes de la Aasignatura Fuentes de Energia, Servicio de Reprografia UC3M, 2012.