

Comparación de combustibles utilizados en quemadores industriales acoplados a un secador

Apellidos, nombre	Tomás Egea, Juan Ángel ¹ (juatomeg@upv.es) Castro Giraldez, Marta ^{1,2} (marcasgi@upv.es) Ortolá Ortolá, M ^a Dolores ^{1,2} (mdortola@tal.upv.es) Fito Suñer, Pedro José ^{1,2} (pedfisu@tal.upv.es))
Departamento	¹ Instituto de Ingeniería de los Alimentos para el Desarrollo ² Departamento de Tecnología de los Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen

En este artículo vamos a plantear los conocimientos necesarios para poder hacer una comparativa entre distintos combustibles. Para ello se verá primero el funcionamiento de un quemador acoplado a un secador alimentario que trabaja con aire caliente y segundo las propiedades de los combustibles a tener en cuenta para la comparación, desde los contaminantes que son hasta la energía que aporta su combustión.

2 Introducción

Una de las opciones más extendidas a la hora de deshidratar alimentos para conservarlos es el secado con aire caliente, que se basa en generar un gradiente poniendo en contacto el producto con un flujo de aire con una humedad relativa baja. Los secadores de este tipo normalmente están conformados por, además de la cámara de secado, por un quemador que proporciona el aire caliente y seco.

El quemador (figura 1) acondiciona el aire quemando combustible, reacción que genera una llama y calienta un flujo de aire que proviene del exterior. Ese flujo alcanza temperaturas muy elevadas, por lo que antes de utilizarlo para secar el producto hay que bajarle la temperatura, especialmente en alimentos por la termolabilidad de algunos de sus compuestos. Esta bajada de temperatura se realiza en un mezclador de aire, previo a la cámara de secado, que mezcla aire caliente de la cámara de combustión y aire exterior hasta lograr una mezcla con las características deseadas.

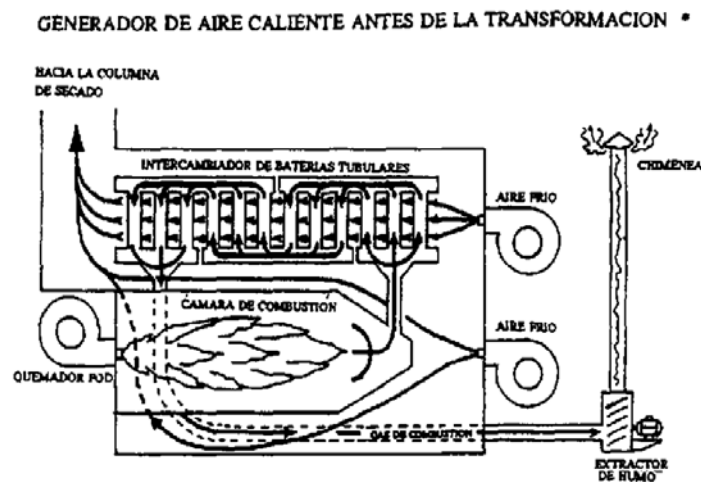


Figura 1. Esquema de un quemador clásico acoplado a una columna de secado.

Normalmente el quemador es la operación que más energía gasta y una de las que más contamina dentro de las plantas que se instalan, debido principalmente a que los combustibles fósiles son los más utilizados. Esto, unido a un dimensionamiento por encima de las necesidades energéticas necesarias para el secado, deficiencias en los sistemas de control y el bajo rendimiento de la propia reacción de combustión, hace que producir energía de este modo sea muy ineficiente. Con la elevación del coste de la energía hay una tendencia a instalar equipos más eficientes e investigar la viabilidad de fuentes energéticas alternativas más respetuosas con el medio ambiente [1].

La combustión de estos compuestos genera, entre otros elementos, CO₂, el cual es un activo importante en el aumento del efecto invernadero. El efecto invernadero no es perjudicial para el medioambiente per se, de hecho es necesario para la vida en el planeta, ya que debido a las propiedades físicas de gases como el dióxido de carbono o el metano reflejan la emisión de fotones en infrarrojos, generando un aislamiento radiante de la tierra. El problema surge cuando se desequilibra el ciclo que sigue el carbono, liberando más CO₂ del que el planeta es capaz de asimilar y transformar, aumentando el efecto invernadero y provocando que menos radiación infrarroja salga de la atmósfera, lo que aumenta las temperaturas y desequilibra el clima.

3 Objetivos

Una vez que el alumno lea este documento, será capaz de:

- Comparar la eficiencia de dos o más combustibles.
- Comparar el aporte al efecto invernadero que producen dos o más combustibles.
- Extraer datos de esta herramienta, útiles para el cálculo de la huella de carbono, como el CO₂ generado.

4 Desarrollo

La comprensión de los aspectos que se presentan en este apartado, desarrollan herramientas en el alumno para que sea capaz de discernir qué características le aporta cada combustible y sea capaz de realizar comparativas entre ellos.

- 4.1. Tipos de combustibles
- 4.2. Composición y propiedades de los combustibles
- 4.3. Ciclo del carbono
- 4.4. Herramienta de comparación
- 4.5. Comparación de combustibles (ejemplos)

4.1 Tipos de combustibles

Como ya se ha comentado anteriormente, el tipo de combustible más utilizado en los quemadores son los combustibles fósiles. Son combustibles de origen orgánico, de alto poder calorífico y por tanto, muy eficientes aportando energía con su combustión. Además, debido a un uso tan extendido, gran parte de la maquinaria está muy adaptada para su uso. El problema principal de estos combustibles radica en las emisiones producidas durante su combustión, desequilibrando el balance del ciclo de carbono con el CO₂ o en el caso del diésel concretamente, emitiendo NO₂, cuyas propiedades agravan los problemas respiratorios.

Dos ejemplos de este tipo de combustible muy usados en los quemadores son el gasóleo y el gas natural (figura 3), con un poder calorífico de 44,8 MJ·kg⁻¹ [2] y 55,5 MJ·kg⁻¹ [2] respectivamente. Aunque el gasóleo es más contaminante, hay que tener en cuenta que el gas natural está en fase gaseosa, por lo que una fuga sería peor para el medioambiente debido a uno de sus componentes, el metano, que equivale a 25 veces el efecto invernadero aportado por el dióxido de carbono.



Figura 2. Gasóleo a la izquierda y gas natural a la derecha

Una alternativa a los combustibles fósiles es la biomasa, la cual tiene en contra la eficiencia generando energía y la poca adaptabilidad que hay actualmente en la industria, por lo que ahora mismo es muy difícil que compitan en el mercado de los combustibles junto a los derivados del petróleo. En cambio, aunque no generan tanta energía, en proporción emiten menos dióxido de carbono, evitan gases nocivos para la salud y al existir la posibilidad de que su procedencia sea la de residuos de otras industrias, las hace muy interesantes por su aprovechamiento.

Dos ejemplos son la cascarilla de arroz y la cáscara de nuez (figura 3), con un poder calorífico de $17,644 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [3] y $18,61 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [4] respectivamente. Aunque el poder calorífico sea mayor en la nuez y genere menos cenizas, la producción de la cascarilla del arroz como residuo es mayor, por tanto podría utilizarse de forma más recurrente como combustible.



Figura 3. Cascarilla de arroz a la izquierda y cáscara de nuez a la derecha

4.2 Composición y propiedades de los combustibles

Cuando el objetivo es comparar el comportamiento de distintos combustibles cuando se utilizan para alimentar un quemador acoplado a un secador de aire caliente, es necesario recabar ciertos datos.

Lo primero es conocer el poder calorífico del combustible (ΔG_i^c), el cual en el caso del gasóleo por ejemplo es muy fácil de encontrar por la cantidad de estudios en los que está presente, pero en el caso de la cáscara de nuez es más complicado. En el caso de que no se sepa el poder calorífico del combustible, se puede estimar en función de los poderes caloríficos de los compuestos combustibles del material. Ejemplo: combinando las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Tabla composicional con las relaciones entre los 3 carbohidratos combustibles de distintas variedades de cáscara de arroz. * v1, v2, v3, v4: Variedades canadienses. * v5: Variedad colombiana. [4], y variedades de nuez [5].

Elemento	Cascarilla de arroz					Media	Cáscara de nuez
	v ₁ *	v ₂ *	v ₃ *	v ₄ *	v ₅ *		Media
Celulosa	29,20	33,47	25,89	35,50	19,53	28,72	27,50
Hemicelulosa	20,10	21,03	18,10	21,35	19,53	20,02	27,50
Lignina	20,00	18,80	24,60	18,20	22,80	20,88	35,00

Tabla 2. Tabla con la fórmula química, reacción de combustión, masa molecular (Mr), calor específico (Cp), calor latente de combustión (ΔG) y temperatura de llama (T llama) [6] [7]. * Temperaturas halladas experimentalmente.

Componente	Fórmula	Reacción	Mr (g·mol ⁻¹)	Cp (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	ΔG (kJ·kg ⁻¹)	T llama (°C)
Celulosa	C ₆ H ₁₀ O ₅	C ₆ H ₁₀ O ₅ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 5H ₂ O	162,1406	1,4	16996	*
Hemicelulosa	C ₆ H ₁₀ O ₆	C ₆ H ₁₀ O ₅ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 5H ₂ O	162,1406	1,4	16592	*
Lignina	C ₃₁ H ₃₄ O ₁₁	C ₃₁ H ₃₄ O ₁₁ + 34O ₂ = 31CO ₂ + 17H ₂ O	582,59506	1,2	18012	*
Aceite / Ácido oléico	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	2C ₁₈ H ₃₄ O ₂ + 51O ₂ = 36CO ₂ + 34H ₂ O	282,46136	1,79	39000	*
Glucosa	C ₆ H ₁₂ O ₆	C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 6H ₂ O	180,15588	1,244	14080	*
Fructosa	C ₆ H ₁₂ O ₆	C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 6H ₂ O	180,15588	1,244	14080	*
Gasoil	C ₁₂ H ₂₃	4C ₁₂ H ₂₃ + 71O ₂ = 48CO ₂ + 46H ₂ O	167,31102	2,05	44800	2138
Metano	CH ₄	CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	16,04246	2,197	55500	1963
Etano	C ₂ H ₆	2C ₂ H ₆ + 7O ₂ = 4CO ₂ + 6H ₂ O	30,06904	1,6435	51900	1955
Propano	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O	44,09562	1,6513	50350	1980
Etanol	C ₂ H ₆ O	C ₆ H ₁₂ O ₆ + 3O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O	46,06844	2,44	29800	2082

No siempre combustiona todo el combustible que alimenta al quemador, en el caso del gas natural no quedan residuos pirolizados; la cascarilla de arroz, en cambio, al combustionar genera hasta un 40 % de su peso en cenizas. Por tanto hay que saber también la proporción de compuestos combustibles.

La temperatura de llama es interesante, ya que es la temperatura que alcanzará el aire en la cámara de combustión. Se puede encontrar en bibliografía (tabla 2) en lo que respecta a los combustibles fósiles, pero en los lignocelulósicos es probable que deba determinarse empíricamente.

Otros datos necesarios son la reacción de combustión, masa molecular y calor específico. En la tabla 2 hay reflejados algunos ejemplos.

4.3 Ciclo del carbono

El ecosistema terrestre transforma continuamente los compuestos que contienen carbono, transformaciones que quedan englobadas en el ciclo del carbono (figura 4).

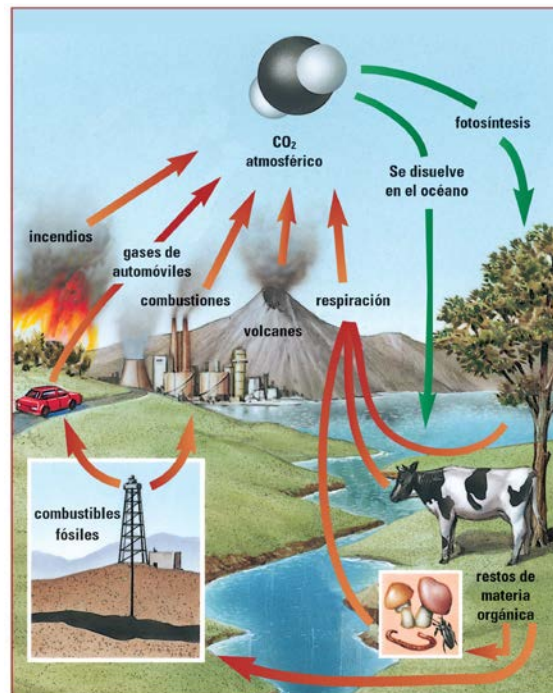


Figura 4. Ciclo del carbono

Dentro de esa transformación, el dióxido de carbono se genera y consume a través de las plantas y los animales, realizándose un balance neto productivo nulo. Por esta razón, la utilización de material vegetal para producir energía a partir de la combustión del mismo, representa la devolución a la atmósfera de parte del dióxido de carbono sustraído de la misma en la producción de tejido vegetal. Sin embargo, cuando la fuente de energía utilizada es un combustible de origen fósil, el balance neto se rompe, ya que el dióxido de carbono sustraído de la atmósfera para la generación de plantas y animales en era Mesozoica (65,5 millones de años) ya ha sido reequilibrado en la atmósfera por lo que la combustión del mismo solo incrementa la concentración de CO_2 en la atmósfera [8].

Por esta razón hay dos ciclos diferenciados, definidos por el tiempo que tardan en asimilar el CO_2 atmosférico que han producido, que son: ciclo corto y ciclo largo. El ciclo corto no varía la concentración neta de los gases de la atmósfera; en cambio, el ciclo largo está desequilibrado por emitir el CO_2 , al quemar los combustibles fósiles, más rápido de lo que se asimila.

4.4 Herramienta de comparación

Para comparar y poder discernir las diferencias entre combustibles de forma virtual, vamos a utilizar la herramienta desarrollada en el artículo docente "Simulación matemática del funcionamiento de un quemador acoplado a un secador" por parte del laboratorio de Propiedades Dieléctricas, del IIAD. Mediante esta simulación es posible predecir el flujo de aire y su composición que se emite a la atmósfera sin necesidad de extraerlo de forma experimental en planta.

4.5 Comparación de ejemplos

Para que el alumno pueda ver de forma práctica la utilidad de aplicar la herramienta matemática del quemador para comparar combustibles, en la tabla 3 se muestran los resultados de la simulación.

Tabla 3. Resultados de comparar cascarilla de arroz, cáscara de nuez, gas natural y gasóleo (diésel). Donde T^{secado} es la temperatura de secado en °C, M_1 ($\text{kg}_{\text{ah}} \cdot \text{h}^{-1}$) es el caudal de entrada de aire a la cámara de combustión, M_5 ($\text{kg}_{\text{ah}} \cdot \text{h}^{-1}$) es el caudal de entrada de aire al mezclador, m_4 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) es el caudal de combustible empleado, $\text{CO}_2^{\text{generado}}$ es la huella de carbono generada en la cámara de combustión y φ^{secado} es la humedad relativa de secado expresada en tanto por uno.

	T^{secado} (°C)	M_1	M_5	m_4	$\text{CO}_2^{\text{generado}}$	φ^{secado}
Cascarilla de arroz	300	44	53,81	3,23	3,13	0,0005
	200	25	73,69	1,93	1,87	0,0021
	100	10	89,55	0,66	0,64	0,0233
	80	6	93,72	0,41	0,40	0,0462
	60	2,5	97,39	0,17	0,16	0,1012
Cascarilla de nuez	300	43	55,04	1,98	3,18	0,0005
	200	27	71,83	1,18	1,90	0,0020
	100	9,9	89,70	0,41	0,65	0,0226
	80	6,5	93,25	0,25	0,41	0,0453
	60	2,5	97,40	0,10	0,17	0,1003
Gas Natural	300	36	63,56	0,54	1,47	0,0005
	200	22	77,74	0,32	0,88	0,0020
	100	7,6	92,31	0,11	0,30	0,0230
	80	4,8	95,14	0,07	0,19	0,0458
	60	2	97,98	0,03	0,08	0,1008
Diesel	300	45	54,45	0,68	2,13	0,0004
	200	26	73,67	0,40	1,27	0,0018
	100	9	90,89	0,14	0,44	0,0219
	80	6	93,93	0,09	0,27	0,0443
	60	2,3	97,67	0,04	0,11	0,0993

* Tomando como valor del caudal de secado ($100 \text{ kg}_{\text{ah}}/\text{h}$), una temperatura ambiente de 25°C y una humedad relativa del

Como se puede ver en la tabla, para lograr la misma temperatura de secado con una humedad relativa baja, es necesario quemar más masa de residuos lignocelulósicos, lo que acaba provocando que la combustión de la cáscara de nuez y arroz emita más CO_2 total que los combustibles fósiles. Esto es debido principalmente a la diferencia entre los poderes caloríficos de los combustibles. Sin embargo, los residuos del arroz y la nuez pertenecen al ciclo corto del carbono, por lo que la emisión de CO_2 que aportan no desequilibra el balance de compuestos de la atmósfera y por tanto, no aumentan el efecto invernadero. Además, al tratarse de residuos, estos normalmente serán más baratos que los combustibles fósiles, de los cuales dependen transportes y centrales energéticas.

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos visto qué aspectos hay que tener en cuenta a la hora de comparar combustibles para alimentar el quemador de un secador, teniendo en cuenta el medioambiente. También hemos visto de forma indirecta el funcionamiento de los quemadores industriales y la problemática que generan al medioambiente los combustibles fósiles, presentando alternativas como los residuos lignocelulósicos.

6 Bibliografía

- [1] BERKOWITZ D.E. "Food processing sectors". Encyclopaedia of occupational health and safety, Chapter 67: Food industry, 2012. Ed: J.M. Stellman, International Labour office, Ginebra, Suiza.
- [2] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST), 2016, "Base de Datos de Referencia Estándar del NIST". Número 69.
- [3] VALVERDE A., SARRIA B., MONTEAGUDO J.P., 2007, "Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la Cascarilla de arroz". *Scientia et Technica*. Vol. 1-37 (0).
- [4] GREEN D., PERRY R., 2007, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", Eighth Edition. Ed: McGraw-Hill Education. New York (USA). 2585 pp.
- [5] CUERVO L., FOLCH J.L., QUIROZ R.E., 2009, "Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol". *Biotecnología y bioingeniería A.C.* 13 (3): 11-25.
- [6] REED R.J., 1978, "North American Combustion Handbook", Second Edition. Ed: North American Manufacturing. 332 pp.
- [7] HAYNES W.M., Junio 2015, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 96th Edition. p. 15-51. Ed: CRC Press.
- [8] TOMAS-EGEA J.A., 2016, "Dimensionamiento de quemadores en operaciones de secado utilizando energías alternativas sostenibles con el medioambiente". UPV.