



TEMA 4: BALANCES TÉRMICOS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

MATERIALES DE ESTUDIO

Blanca M^a Caballero Iglesias
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

BALANCES TÉRMICOS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN

4.1. Rendimiento de la combustión

4.2. Rendimiento térmico. Aumento del rendimiento térmico

4.2.1. Empleo de combustibles de mayor poder calorífico

4.2.2. Aumento de la temperatura adiabática de llama

4.2.3. Disminución de la temperatura de gases de combustión

4.2.4. Reducción de las pérdidas de calor

4.3. Balances térmicos y diagramas de Sankey

RENDIMIENTO DE LA COMBUSTIÓN

Rendimiento de la combustión (η_c): medida de la efectividad de un proceso de combustión en el horno o cámara de combustión.

$$\eta_c = \frac{Q_c - Q_h}{Q_c} = 1 - \frac{Q_h}{Q_c} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Es el cociente del calor contenido en los gases de combustión de salida (Q_h) y el calor cedido por el combustible (Q_c) y es indicativo de las pérdidas.

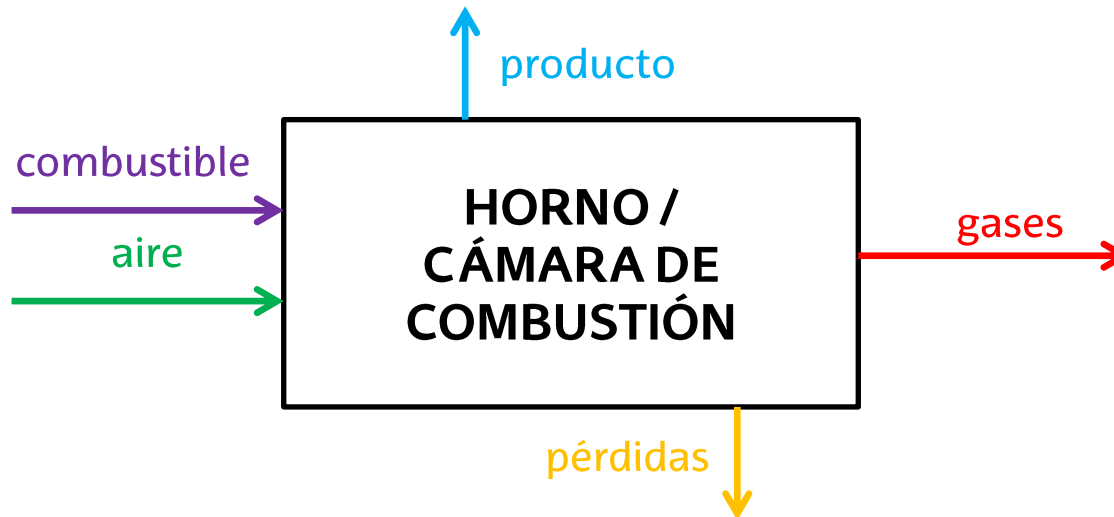


Figura 4.1. Diagrama de flujo de un horno/cámara de combustión. Imagen propia

RENDIMIENTO TÉRMICO

Rendimiento térmico (η_t): medida de la eficiencia energética de una instalación de combustión → minimización del consumo con el máximo aprovechamiento energético.

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_c}$$

Ecuación 4.2

Es el cociente entre el calor útil cedido en la instalación, transmitido al producto (Q_p), y el calor cedido por el combustible (Q_c). Por ejemplo, en un horno de fusión el producto podría ser vidrio, aluminio, etc., mientras que en una caldera el producto es el vapor de agua.

Realizando el balance térmico del proceso (entradas = salidas, y despreciando el calor contenido en el aire utilizado para la combustión a temperatura ambiente, ver figura 4.1):

$$Q_c = Q_p + Q_h + P$$

Ecuación 4.3

Donde P son las pérdidas en la instalación (paredes, refrigeración, purgas, etc.)

$$\eta_t = \frac{Q_c - Q_h - P}{Q_c} = \frac{Q_p}{Q_c}$$

Ecuación 4.4

RENDIMIENTO TÉRMICO

Desarrollando la ecuación 4.4 (rendimiento térmico):

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_C} - \frac{T_h \sum_{i=1}^n c_{h,i}(T_h) V_i}{T_A \sum_{i=1}^n c_{h,i}(T_A) V_i} - \frac{P}{Q_C} \approx 1 - \frac{T_h}{T_A} - \frac{P}{Q_C}$$

↑
aproximadamente

Ecuación 4.5

Donde: T_h = temperatura de los gases de combustión

T_A = temperatura adiabática de llama

$C_{h,i}(T_h), C_{h,i}(T_A)$ = calor específico de los gases de combustión a T_h y T_A

V_i = volumen de gases de combustión

De la ecuación 4.5 se deduce que el **rendimiento térmico aumenta**:

- ✓ Utilizando combustibles de mayor poder calorífico (Q_C)
- ✓ Aumentando la temperatura de llama (T_A)
- ✓ Disminuyendo la temperatura de los gases de combustión (T_h)
- ✓ Reduciendo las pérdidas en la instalación (P)

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Empleo de combustibles de mayor poder calorífico

No siempre es posible intercambiar un combustible por otro, pero frecuentemente pueden intercambiarse combustibles en el mismo estado de agregación¹: aumento del poder calorífico → aumento de la T_A

Tabla 4.1. PCI de combustibles sólidos seleccionados. Adaptado de IDAE [1]

Combustible	PCI(kcal/kg)
Antracita industrial	5829
Hulla industrial	5757
Carbón subbituminoso	3194
Lignito	3195
Biomasa en general	3382
Serrines y virutas	3780
Cortezas	3650
Pellets en general	3940

Tabla 4.2. PCI de combustibles líquidos seleccionados. Adaptado de IDAE [1]

Combustible	PCI(kcal/kg)
Petróleo Bruto	10190
GLP	10990
Queroseno	10270
Gasolina	10510
Gasóleo automoción	10170
Fuelóleo	9550
Bioetanol	6449
Biodiesel	8837

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Empleo de combustibles de mayor poder calorífico

Para intercambiar combustibles gaseosos es necesario que pertenezcan a la misma familia de gases (1^a: gases manufacturados, 2^a: gas natural, 3^a: GLP) y que cumplan los criterios de intercambiabilidad ¹:

Tabla 4.3. Poder calorífico inferior (PCI) y superior (PCS) de diversos combustibles gaseosos. Adaptado de IDAE [\[1\]](#)

Combustible	PCI (kcal/m ³ N)	PCS (kcal/m ³ N)
Propano	11063	21800
Butano	10723	28300
Gas natural	-	9667
Gas de refinería	11820	-
Gas de coquería	-	4540
Gas de alto horno	-	6900
Biogás de vertedero	-	4775
Biogás de depuradora	-	6327

¹: más información en la guía de la Unión Internacional del Gas [\[2\]](#)

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Aumento de la temperatura adiabática de llama

✓ **Intercambiar un combustible por otro:** al utilizar un combustible de mayor poder calorífico la temperatura adiabática (T_A) será mayor

Tabla 4.4. Temperatura adiabática de distintos combustibles adaptado de Florescu et al. (2013) [3]

Combustible	T_A (°C)
Gas natural	2070
Queroseno	2093
Fuelóleo ligero	2104
Fuelóleo intermedio	2101
Fuelóleo pesado	2102
Carbón bituminoso	2172
Antracita	2180

✓ **Reducir el exceso de aire:** cuanto más cercano sea a la unidad ($n = 1$ combustión teórica), mayor será la temperatura adiabática.

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Aumento de la temperatura adiabática de llama

- ✓ **Enriquecer el aire en O_2** (hasta 25-30 %): el volumen de gases de combustión disminuye, pero el hecho de aumentar la proporción de oxígeno en el aire tiene limitaciones económicas y requiere medidas de seguridad adicionales.
- ✓ **Precalentar el combustible en regeneradores mediante** intercambio de calor con los gases de combustión → el efecto es doble ($T_A \uparrow$ y $T_h \downarrow$, *páginas 14 y 15*)
 - Los combustibles gaseosos de bajo PC necesitan aporte suplementario de calor para alcanzar la temperatura de ignición
 - Los combustibles líquidos pesados se precalientan para reducir su viscosidad y favorecer su vaporización, necesaria para poder llevar cabo su combustión. El objetivo principal no es aumentar T_A , pero se consigue
- ✓ **Precalentar el aire de combustión en regeneradores o recuperadores** mediante intercambio de calor con los gases de combustión → el efecto es doble ($T_A \uparrow$ y $T_h \downarrow$, *páginas 11-15*)

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

La temperatura de los gases de combustión procedentes del horno/cámara de combustión suele rondar los **1000 °C**. El calor de los gases de combustión puede aprovecharse para **precalentar el aire de combustión o el combustible, generar vapor de agua, etc.**

El límite inferior de los gases de escape depende de la temperatura de rocío, para evitar la corrosión por condensación, y de la temperatura necesaria para la evacuación de los humos por chimenea, según el tiro de la misma.

Tipos de intercambiadores de calor utilizados:

- ✓ **Recuperadores.** La transferencia de calor, por radiación o convección, entre los gases de combustión y el aire es continua a través de las paredes, pero los fluidos circulan por conductos separados físicamente.
- ✓ **Regeneradores.** La transferencia de calor entre los gases de combustión y el aire es intermitente, los fluidos circulan por el mismo conducto, pero de forma alterna.

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

Recuperadores de radiación

- ✓ La transferencia de calor ocurre por radiación si la temperatura de los gases de combustión supera los 1000 °C. A menor temperatura la eficacia de transferencia de calor por radiación disminuye.
- ✓ Son tubos concéntricos en posición vertical en los que no es necesario tiro adicional y la pérdida de carga es baja. Los gases de combustión circulan por el conducto interior ($T_{h1} > T_{h2}$) y el aire por el exterior ($T_{a1} < T_{a2}$).

* T_{h1}, T_{h2} y T_{a1}, T_{a2} temperaturas de entrada y salida, de los gases y del aire respectivamente

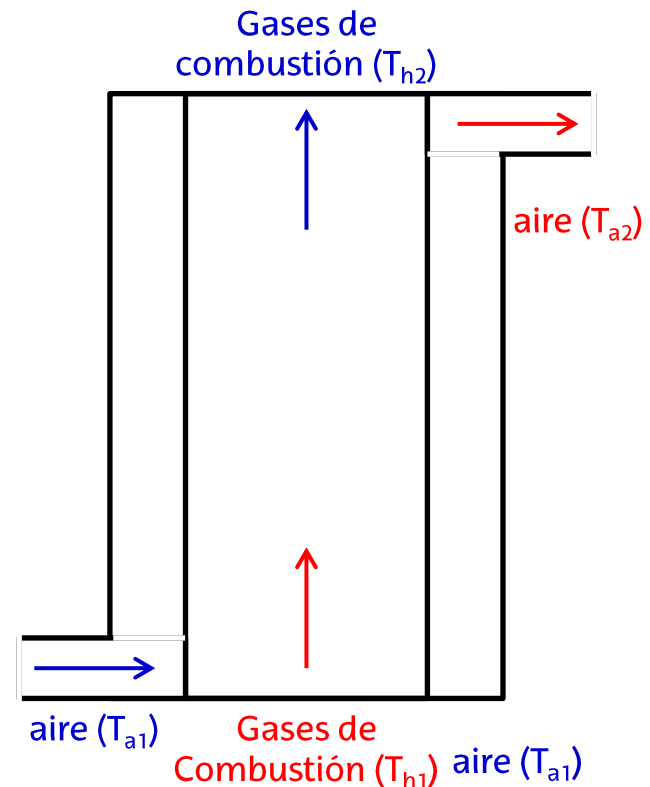


Figura 4.2. Esquema de un recuperador de radiación.
Imagen propia

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

Recuperadores de convección

- ✓ La transferencia de calor ocurre por convección si la temperatura de los gases de combustión no supera los 1000 °C.
- ✓ Los materiales cerámicos son los más utilizados hoy en día en recuperadores de convección, que están formados por haces de tubos en posición horizontal, vertical o inclinada.
- ✓ Distintas disposiciones en función de la dirección del flujo:

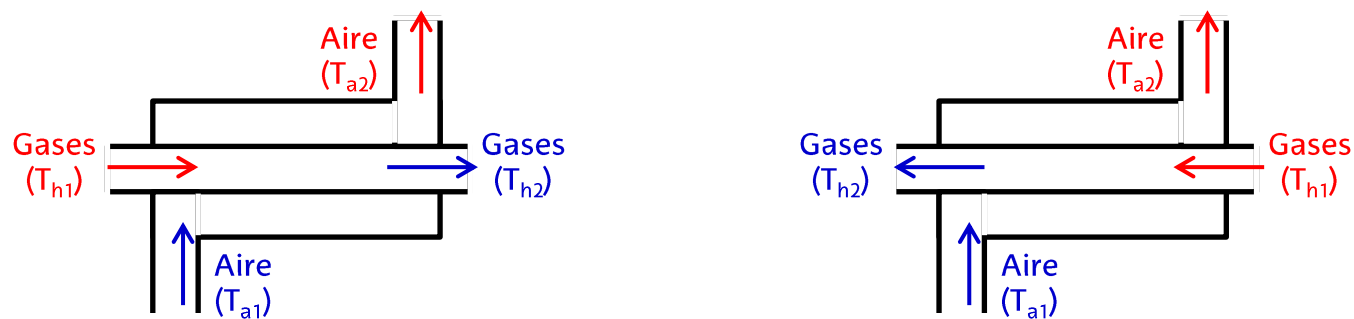


Figura 4.3. Esquemas de recuperadores de convección según flujo: paralelo o equicorriente (izquierda) y contracorriente (derecha), $T_{h1} > T_{h2}$ y $T_{a2} > T_{a1}$. Imagen propia

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

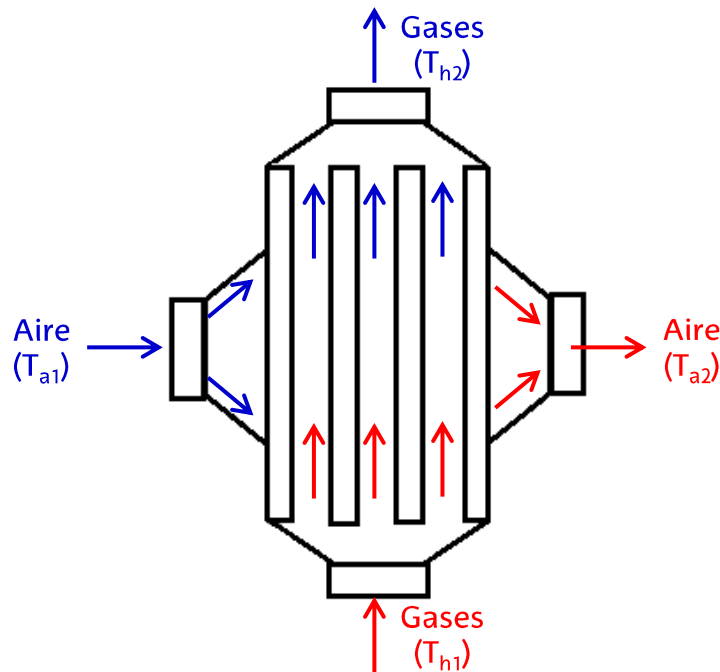


Figura 4.4. Esquema de un recuperador por convección de flujo combinado,

$T_{h1} > T_{h2}$ y $T_{a2} > T_{a1}$. Imagen propia

Figura 4.5. Intercambiadores de calor.

Fotografía tomada por Repsol publicada en Flickr bajo licencia

CC BY-NC-SA 2.0 [4]

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

Regeneradores

- ✓ Se utilizan en instalaciones en las que es necesario precalentar el aire de combustión, y en ocasiones se utilizan para precalentar combustibles gaseosos de bajo poder calorífico, por ejemplo gas de gasógeno. De esta forma se obtienen altas temperaturas de llama: por ejemplo en hornos de fusión de vidrio.
- ✓ La secuencia de trabajo en parejas de regeneradores consta de dos etapas:
 - 1) **Periodo de calentamiento:** los gases de combustión calientes ascienden, de manera que se enfrían y el regenerador almacena calor.
 - 2) **Periodo de enfriamiento:** el aire o el combustible frío desciende, de manera que se calienta mediante el calor almacenado en el regenerador.
- ✓ Se fabrican de **material refractario** apilado, de gran capacidad y resistencia térmica.

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

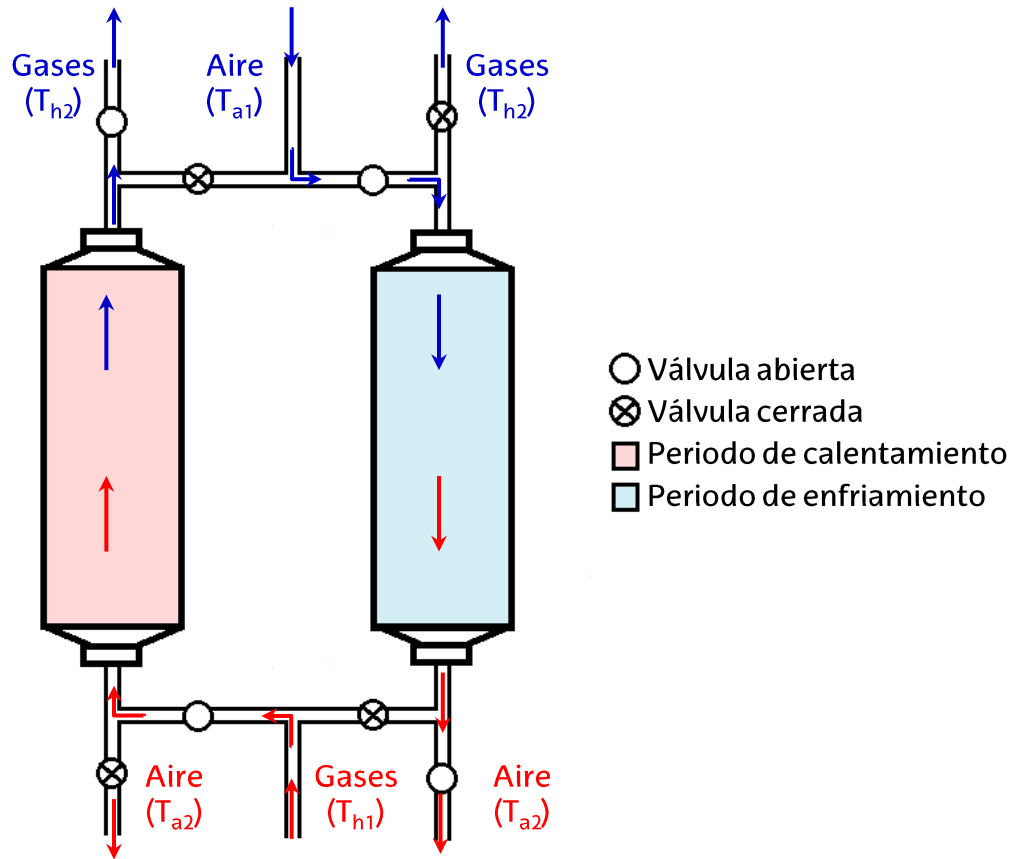


Figura 4.6. Regeneradores, $T_{h1} > T_{h2}$ y $T_{a2} > T_{a1}$.
Imagen propia adaptada de Thermopedia [5]



Figura 4.7. Ladrillos refractarios. Fotografía tomada por byrev y publicada en Pixabay bajo dominio público [6]

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

Calderas de recuperación

- ✓ Se utilizan en instalaciones en las que la temperatura de los gases de combustión a la salida del recuperador/regenerador es mayor que 500 °C. También se utilizan si no es necesario precalentar el aire/combustible.
- ✓ Balance térmico en la caldera de recuperación: $Q_{\text{agua}} + Q_{h1} = Q_v + Q_{h2} + P_c$
El calor aportado al vapor de agua: $Q_v = m_v H_v$, donde, m_v : cantidad de vapor producido y H_v : entalpía del vapor de agua (a T y P dadas)

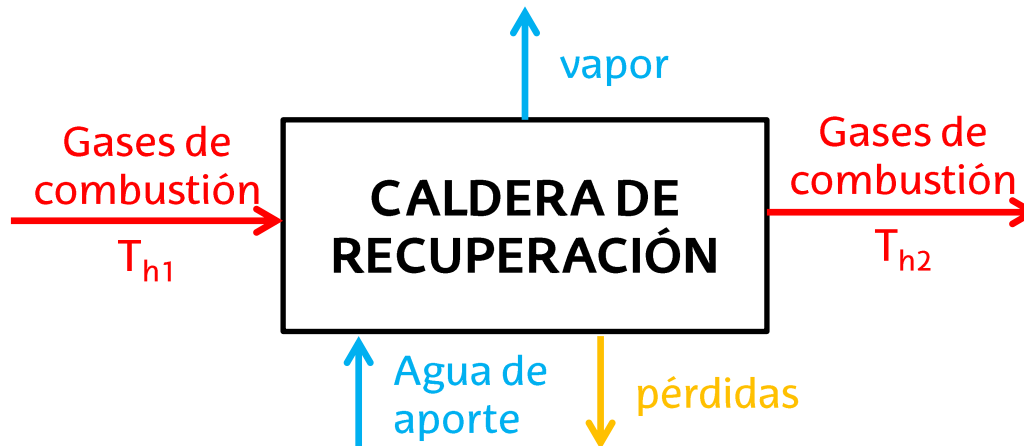


Figura 4.8. Diagrama de flujo de una caldera de recuperación. Imagen propia

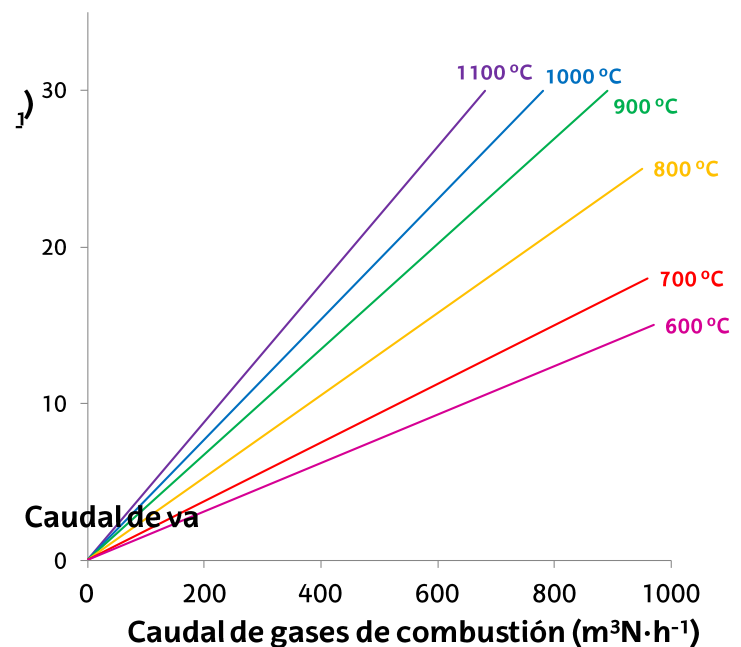
AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

Calderas de recuperación

- ✓ Se aprovecha el calor residual de los gases de combustión para producir **vapor de agua**, que puede ser utilizado en la propia instalación, por ejemplo en una turbina de vapor para la producción de energía eléctrica.
- ✓ La transmisión de calor en calderas de recuperación (por convección) es más lenta que en las calderas convencionales (por radiación), ya que a mayor T_h más eficaz es la transferencia de calor

Figura 4.9. Vapor producido vs. caudal de gases de combustión a diferentes temperaturas. Imagen propia



AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Disminución de la temperatura de gases de combustión

Precalentamiento de la carga. En hornos continuos se puede aprovechar el calor de los gases para precalentar la carga. Por ejemplo, chatarra.

Economizadores. Son intercambiadores de calor para precalentar el agua de alimentación a la caldera.

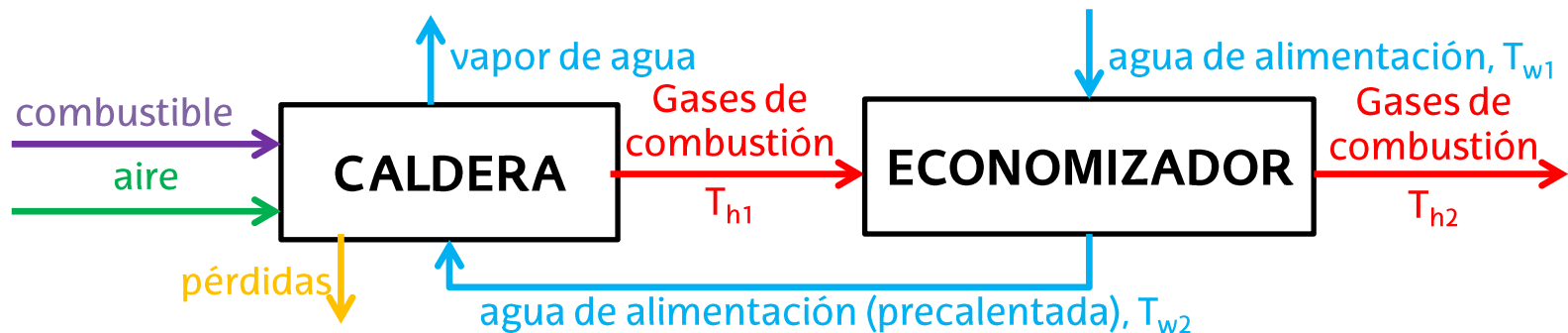


Figura 4.10. Diagrama de flujo de una caldera con economizador. Imagen propia

Recalentadores: intercambiadores de calor en los que se recalienta el vapor, bien para mejorar el rendimiento de la caldera, o bien para evitar condensación (por ejemplo si el vapor va a utilizarse en una turbina).

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Reducción de las pérdidas de calor

Las pérdidas de calor en instalaciones pueden producirse a través de las paredes, por radiación, por aperturas, por purgas, etc.

Otras pérdidas, sobre todo en aquellas instalaciones que trabajan de manera intermitente, pueden deberse al calor almacenado en contenedores y revestimientos.



Figura 4.11. Horno de inducción en una fundición. Fotografía publicada en Wikimedia bajo dominio público [7]

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Reducción de las pérdidas de calor

Pérdidas a través de superficies y paredes.

Pueden reducirse utilizando **materiales aislantes**, por ejemplo fibra de vidrio, pero a medida que se van deteriorando las pérdidas aumentan. Dependen de:

- La temperatura de la cara exterior de la superficie y del aire ambiente
- El material de la superficie
- Posición de la superficie. Las pérdidas son mayores en la parte superior de superficies horizontales que en superficies verticales y que en la parte superior de superficies horizontales.



Figura 4.12. Fibra de vidrio. Fotografía tomada por rkit y publicada en Pixabay bajo dominio público [8]

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Reducción de las pérdidas de calor

Pérdidas por radiación y enfriamiento

Las zonas que alcanzan altas temperaturas, por ejemplo el horno puede protegerse con revestimientos de materiales aislantes con el fin de reducir el **gradiente de temperatura** entre el interior y el exterior. También puede utilizarse un sistema agua/aire de refrigeración.

Este tipo de pérdidas suelen estimarse en función del gradiente de temperatura y, si se utiliza un fluido refrigerante, en función de su caudal y temperatura de entrada y salida.

Figura 4.13. Aislamiento térmico mediante mantas. Fotografía publicada en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [\[9\]](#)



AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Reducción de las pérdidas de calor

Pérdida al exterior por aperturas, grietas, fugas, etc.

Las pérdidas por radiación al exterior suelen estimarse en función del espesor y temperatura de la pared/elemento, forma de la apertura, etc.

Las pérdidas por salida o entrada de gases se estiman en función de los caudales de salida de gases o infiltración de aire, en función de la presión (P):

$P_{\text{interior}} > P_{\text{exterior}}$: fuga

$P_{\text{interior}} < P_{\text{exterior}}$: infiltración



Figura 4.14. Reparación de una fuga de amoniaco en una planta de fertilizantes. Fotografía publicada en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [\[10\]](#)

AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

Reducción de las pérdidas de calor

Pérdidas por purgas

Las purgas de agua en calderas son necesarias para mantener la salinidad y sólidos en suspensión en valores aceptables y evitar incrustaciones. El procedimiento habitual se basa en la medida de la conductividad, indicador de la salinidad del agua y posterior purga.

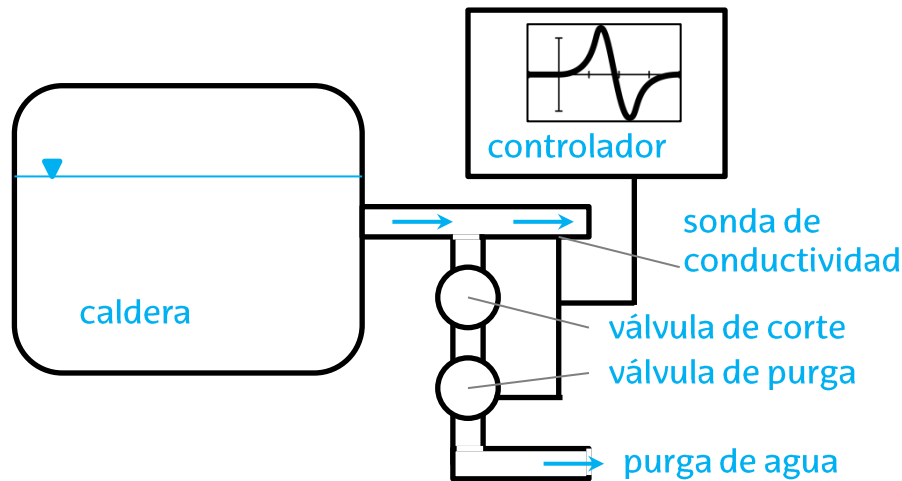


Figura 4.15. Sistema de purga de agua en una caldera. Imagen propia. Vector publicado en Pixabay [\[11\]](#)



Figura 4.16. Sección transversal de un tubo con incrustación calcárea. Fotografía publicada en Wikimedia bajo dominio público [\[12\]](#)

BALANCES TÉRMICOS Y DIAGRAMAS DE SANKEY

BALANCE TÉRMICO: desglose del total de la energía de entrada y salida del proceso por unidad de tiempo o producto: kcal/h, kcal/t producto, kcal/kg combustible, etc.

ENTRADAS {

- Q_c : energía química del combustible (PCI)
- Q_A : calor sensible del aire de combustión
- Q_F : calor sensible del combustible o de la carga (por ejemplo chatarra, agua de aporte, etc.)

* Q_A y Q_F pueden despreciarse (frente a Q_c) si el aire y el combustible se alimentan a temperatura ambiente. Suelen considerarse en el cálculo cuando se el aire, combustible o carga son se precalientan

SALIDAS {

- Q_p : calor útil transferido al producto
- Q_v : calor útil transferido al vapor de agua
- Q_h : calor sensible de los humos
- P: pérdidas de calor

BALANCES TÉRMICOS Y DIAGRAMAS DE SANKEY

El **balance térmico** puede representarse mediante una tabla (tabla 4.5) o gráficamente (figura 4.17). El **diagrama de Sankey** es la representación gráfica del balance térmico mediante flujos de energía en la que la anchura de las bandas es proporcional a la cantidad de calor que circula por las mismas.

Tabla 4.5. Ejemplo de un balance térmico (por tonelada de producto)

Entradas	kcal	Salidas	kcal	%
Combustible	Q_c	Producto	Q_u	a
		Gases	Q_h	b
		Pérdidas	P	c
TOTAL		TOTAL		100%

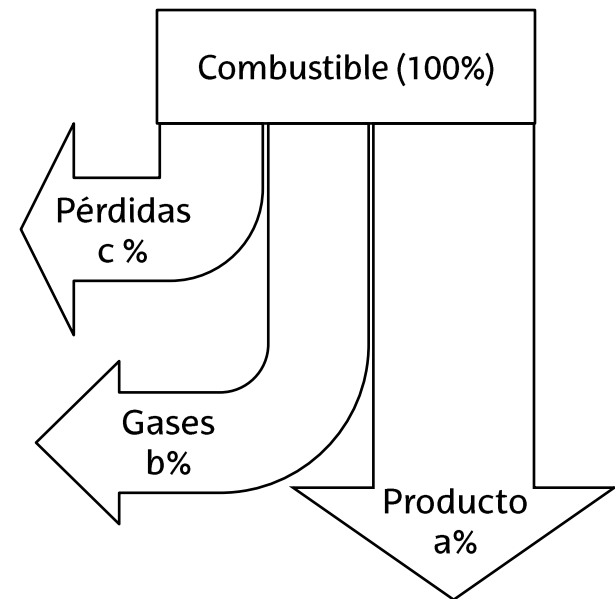


Figura 4.16. Diagrama de Sankey para el ejemplo de la tabla 4.5. Imagen propia