



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# INSTALACIONES DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

**Apellidos y nombre:** Velázquez Martí, Borja ([borvemar@dmta.upv.es](mailto:borvemar@dmta.upv.es))<sup>1</sup>

**Departamento/Centro:** <sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria  
Universitat Politècnica de València

## Índice general

<b>1. Resumen de las ideas clave</b>	<b>2</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>4. Partes de la instalación</b>	<b>3</b>
<b>5. Depuración de los gases</b>	<b>5</b>
<b>6. Cálculo de las necesidades de aire</b>	<b>6</b>
<b>7. Balance de energía</b>	<b>8</b>
7.1. Balance en el aire . . . . .	8
7.2. Balance en el ciclo de Rankine . . . . .	9
<b>8. Cierre</b>	<b>10</b>
<b>9. Ejercicios propuestos</b>	<b>10</b>
<b>10. Bibliografía</b>	<b>10</b>

## 1 Resumen de las ideas clave

La incineración de residuos es un proceso en el cual los desechos sólidos se queman a altas temperaturas con el objetivo de reducir su volumen y destruir materiales, patógenos y algunos contaminantes. Los residuos de la incineración son gases formados principalmente por  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , cenizas y energía. En algunos casos, las instalaciones de incineración llevan incorporado un sistema de recuperación de calor con el objeto de su aprovechamiento para producir electricidad a través de un ciclo de Rankine y calor para otros procesos. Sin embargo, la incineración de residuos también ha sido objeto de controversia debido a preocupaciones ambientales y de salud. La emisión de ciertos gases y subproductos durante la combustión puede contribuir a la contaminación del aire y la liberación de sustancias tóxicas. Por lo tanto, es esencial implementar tecnologías adecuadas y estrictos controles de depuración de gases. En este artículo se describen las partes y funcionamiento de las plantas de incineración, junto al análisis de los balances de masa y energía.

*Si estás listo, empezamos...*

## 2 Introducción

Una incineradora de residuos es una instalación industrial diseñada para quemar desechos sólidos, líquidos o gaseosos a altas temperaturas con tres objetivos:

- a) Reducir el volumen, lo que facilita su disposición final en vertederos.
- b) Eliminación de sustancias peligrosas: Las sustancias tóxicas y peligrosas presentes en los residuos pueden ser destruidas mediante oxidación a altas temperaturas, reduciendo así el riesgo ambiental.
- c) Producción de energía: En algunos casos, la incineración de residuos puede utilizarse para generar calor o electricidad, recuperando la energía de los gases residuales antes de ser liberados a la atmósfera.

Sin embargo, es importante destacar que la incineración de residuos también tiene críticos, ya que puede liberar contaminantes atmosféricos si no se controla adecuadamente, como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas finas. Por esta razón, las incineradoras modernas están equipadas con tecnologías de control de emisiones para minimizar la liberación de contaminantes al ambiente.

## 3 Objetivos

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

- Describir el funcionamiento de una incineradora de residuos sólidos
- Calcular el aire necesario para una combustión completa
- Realizar balance de energía en el sistema de recuperación

## 4 Partes de la instalación

Una instalación incineradora consta de varias partes y componentes clave para llevar a cabo el proceso de incineración de residuos de manera segura y eficiente. A continuación, se describen las partes principales de una instalación incineradora:

1. Tolva de alimentación. Este es el punto de entrada de los residuos sólidos en la incineradora. Suele estar constituida por un foso donde los residuos se descargan directamente desde los camiones de recogida. Desde ahí pueden ser conducidos a instalaciones preparatorias de tratamiento, tales como el secado, trituración o molienda, separación e materiales; o ser alimentados directamente en el horno. La carga de los residuos en la línea de procesamiento se realiza a través de una grúa de pinzas, o un sistema de elevación por cangilones.

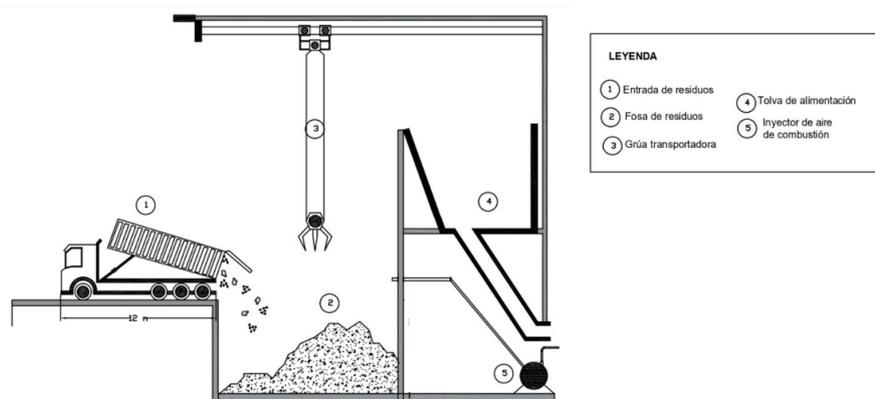


Figura 1: Esquema foso de alimentación

2. Horno de incineración. Es el receptáculo donde se lleva a cabo la combustión de los residuos sobre la parrilla.

3. Parrilla (Figura 3). Es la estructura que sostiene los residuos y permite su desplazamiento gradual a través del horno mientras se queman. Esto asegura una exposición adecuada de los residuos al calor, y ayuda en la distribución uniforme del aire comburente. La parrilla puede ser inclinada fija, inclinada móvil (vibrante), rotativa o de lecho fluidificado.

4. Sistema de alimentación de aire. Por debajo de la parrilla se instala un sistema de aspiración de aire atmosférico para introducirlo dentro del horno para que actúe como comburente. Este aire se llama *aire primario*. También existe un sistema de alimentación de aire por encima de la parrilla complementando el aporte de oxígeno a los gases liberados durante la pirolisis. A este aire se denomina *aire secundario*. Aparte de aportar el oxígeno, tanto el aire primario como secundario cumplen la función de absorber el calor de la combustión para posteriormente transferir ese calor en un intercambiador recuperador de energía. La temperatura alcanzada por el aire puede llegar a unos 1000°C.

4. Sistema de alimentación de combustible complementario. Para la ignición de los residuos es necesario el aporte de una energía que proviene de un combustible adicional como gas natural o gasóleo. Una vez los residuos sean capaces de mantener la combustión puede suprimirse su uso hasta que se requiera para mantener la temperatura del horno en niveles óptimos.

5. Sistema de recuperación de energía. Tras el horno el aire caliente se hace circular por un intercambiador de calor, transfiriéndose la energía a agua que se evapora a alta presión. Entonces el vapor pasa a un ciclo de Rankine para obtener energía eléctrica y calor de proceso.

El ciclo de Rankine (7.2) consiste en hacer pasar el vapor de agua a alta presión a través de una turbina. La turbina está acoplada a un alternador produciendo energía eléctrica. En la turbina el

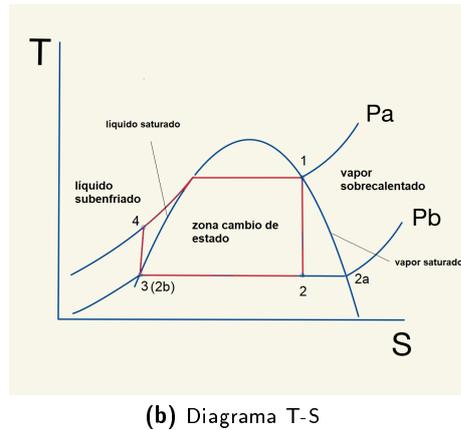
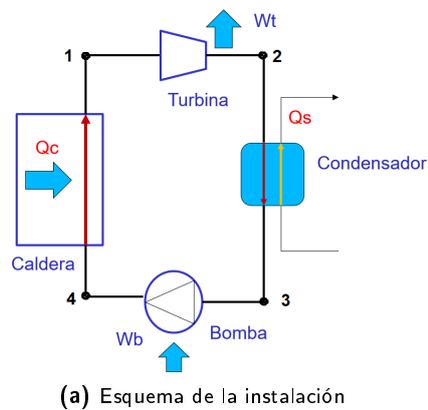


Figura 2: Ciclo de Rankine

vapor sufre una despresurización condensándose parcialmente. Tras la turbina, se hace pasar la mezcla vapor-líquido por un condensador para que todo el fluido torne a estado líquido. El calor residual disipado en el condensador es captado por un caloportador para algún proceso. Tras el condensador, el agua líquida se vuelve a presurizar mediante una bomba para introducirla dentro del intercambiador del recuperador volviendo a comenzar el ciclo. El ciclo se representa en el diagrama T-S (Temperatura-entropía).

6. Sistema de tratamiento de emisiones. Tras el paso por el sistema de recuperación de energía los gases residuales deben ser tratados para controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera. Estos sistemas pueden incluir filtros de mangas, precipitadores electrostáticos y scrubbers (limpiadores de gases) que capturan y tratan los contaminantes antes de que sean liberados en la atmósfera.

7. Sistema de monitoreo y control. Se utiliza un sistema de control automatizado para supervisar y regular la temperatura, la velocidad de alimentación de los residuos y otros parámetros clave del proceso de incineración. Una temperatura excesiva podría provocar la fusión de las cenizas arrastradas por el aire y averiar el intercambiador. Por otra parte, una temperatura elevada en la chimenea final significa que el sistema de recuperación de la energía no está funcionando correctamente.

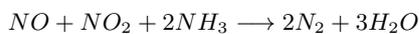
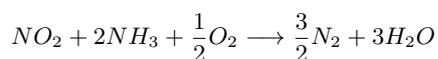
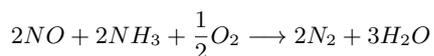
8. Sistema de eliminación de cenizas. Después de la incineración, queda un residuo sólido no combustible conocido como ceniza. Este residuo debe ser manejado y eliminado de manera adecuada, a menudo a través de sistemas de transporte de cenizas a vertederos o instalaciones para su reciclaje como por ejemplo aditivo de cementos, ladrillos, impermeabilizantes asfálticos entre otros posible usos.

9. Almacenamiento de residuos peligrosos. Si la incineradora maneja residuos peligrosos, es importante contar con áreas de almacenamiento seguras y designadas para estos residuos antes y después del proceso de incineración.

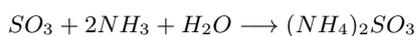
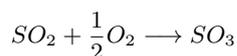
## 5 Depuración de los gases

La depuración de gases en una incineradora de residuos es un aspecto crítico para minimizar la liberación de contaminantes atmosféricos y cumplir con las regulaciones ambientales. Durante el proceso de incineración se generan gases de combustión que pueden contener compuestos tóxicos y contaminantes que deben ser tratados antes de liberarlos en la atmósfera. A continuación, se describen los principales métodos y tecnologías utilizados en la depuración de gases en una incineradora de residuos:

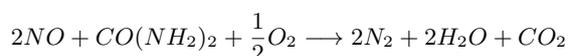
1. **Filtros de mangas (baghouses):** Los filtros de mangas son sistemas de filtración que capturan partículas sólidas suspendidas en los gases de combustión. Consisten en bolsas de tela o mangas que atrapan las partículas mientras los gases pasan a través de ellas. Posteriormente, las partículas atrapadas se retiran y se desechan haciendo pasar un flujo contracorriente cayendo las partículas a un recipiente.
2. **Precipitadores electrostáticos:** Estos dispositivos utilizan cargas eléctricas para atrapar partículas sólidas en los gases de combustión. Los gases pasan entre placas cargadas eléctricamente, lo que provoca que las partículas se adhieran a las placas. Luego, las partículas se desprenden y se recogen para su eliminación adecuada.
3. **Lavadores de gases (scrubbers):** Los scrubbers son sistemas que utilizan líquidos, como agua o soluciones químicas, para eliminar gases y partículas de los gases de combustión. Los gases se hacen pasar a través de un líquido que absorbe los contaminantes. Los contaminantes luego se eliminan del líquido, y el líquido limpio se recircula o se trata antes de su liberación.
4. **Desulfuración de gases (para eliminar el dióxido de azufre):** El dióxido de azufre ( $SO_2$ ) es un contaminante común en los gases de combustión. Se puede utilizar un proceso de desulfuración para eliminar el  $SO_2$  mediante la adición de sustancias químicas como caliza o cal apagada a los gases. Esto forma compuestos sólidos de sulfato que pueden retirarse del flujo de gas.
5. **Reducción catalítica selectiva (SCR):** La SCR es un método utilizado para reducir óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) en los gases de combustión. Implica la inyección controlada de amoníaco o urea en el flujo de gases, que luego reacciona con los óxidos de nitrógeno en presencia de un catalizador para convertirlos en nitrógeno y agua.



Con varias reacciones secundarias



La reacción con urea en lugar del amoníaco es la siguiente



Los catalizadores SCR están formados por una variedad de materiales cerámicos porosos que actúan como soporte en la reacción, el más usado el óxido de titanio. Los componentes catalíticos activos suelen incluir óxidos de metales básicos como vanadio, molibdeno y tungsteno, así como zeolitas.

6. Control de emisiones de mercurio: El mercurio es un contaminante preocupante en la incineración de residuos. Se pueden utilizar tecnologías específicas, como adsorbentes de carbón activado o sistemas de absorción, para capturar el mercurio de los gases de combustión.

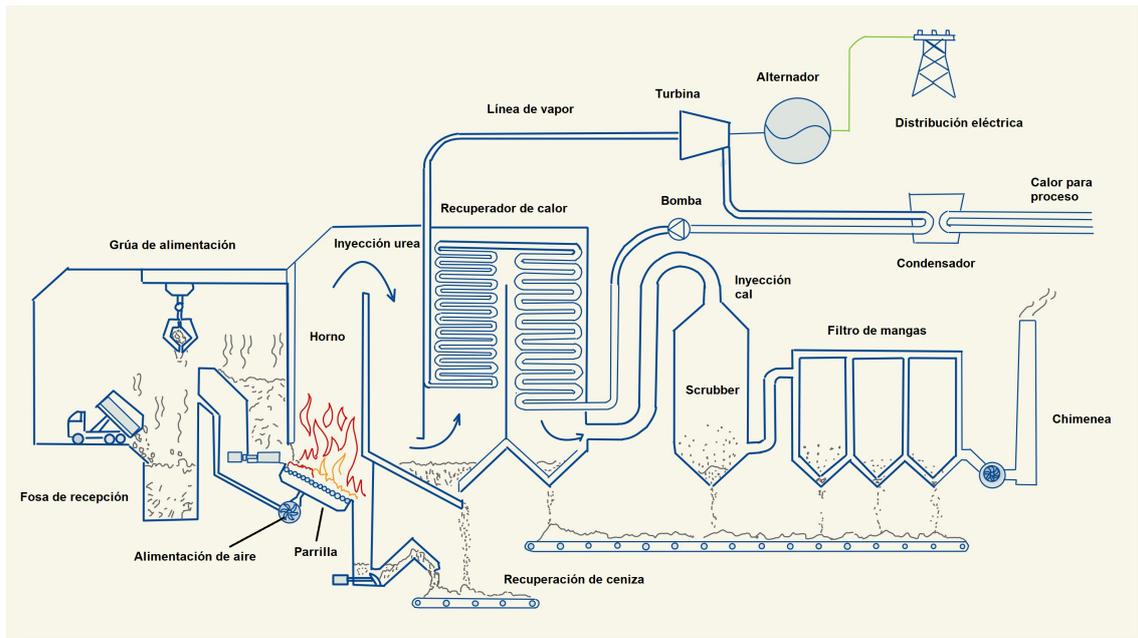


Figura 3: Esquema de una planta de incineración

## 6 Cálculo de las necesidades de aire

Para determinar la cantidad de aire necesaria para una combustión completa es necesario conocer la composición elemental de los residuos en cuanto a los contenidos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. A partir de los moles de cada uno de estos elementos por cada mol de carbono se obtiene la formulación empírica de los residuos a combustionar  $CH_wO_xN_yS_z$  (Figura 4).

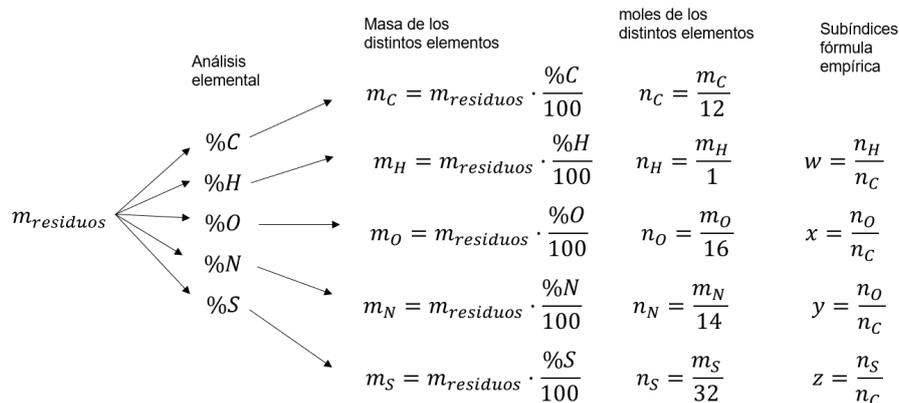
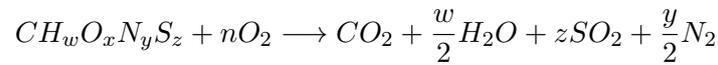


Figura 4: Obtención de la fórmula empírica de los residuos

El número de moles de oxígeno necesario para la combustión completa se obtiene del ajuste de la reacción de oxidación.



$$n = 1 + \frac{w}{4} + z - \frac{x}{2}$$

$$n = 1 + \frac{1}{4} \cdot m_H + \frac{m_S}{32} - \frac{1}{2} \cdot \frac{m_O}{16}$$

$$v_{aire} = \frac{22,4}{1000} \cdot \frac{1}{0,21} \cdot \left( 1 + \frac{1}{4} \cdot m_H + \frac{m_S}{32} - \frac{1}{2} \cdot \frac{m_O}{16} \right) \text{ (m}^3\text{/kg residuo)}$$

$$F_{aire} = v_{aire} \cdot \dot{m}_{residuo} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Una vez calculado el caudal de aire que se debe introducir en el horno desde el punto de vista estequiométrico, éste se incrementa para asegurar que toda la superficie de los residuos recibe el oxígeno suficiente. A la relación entre el aire inyectado en el horno y el aire necesario desde el punto de vista estequiométrico se denomina *exceso de aire* ( $\lambda$ ). Este parámetro adquiere generalmente un valor entre 1,5 y 2.

### Ejemplo 1 Cálculo de las necesidades de aire en la combustión de residuos

Se desea determinar cual es el volumen de aire a inyectar en un horno en el que se queman 2 t de residuos por hora, cuya composición elemental es de 40 % de C, 18 % de H, 2 % de N, 30 % de O, 0,5 % de S.

#### Resolución

Por cada kg de residuos se obtienen los siguientes moles de cada uno de los elementos.

$m_C = 400 \text{ g}$	$n_C = 400/12 = 33,33 \text{ moles}$	
$m_H = 180 \text{ g}$	$n_H = 180 \text{ moles}$	$w = 5,4$
$m_O = 300 \text{ g}$	$n_O = 300/16 = 18,75 \text{ moles}$	$x = 0,5625$
$m_N = 20 \text{ g}$	$n_N = 20/14 = 1,43 \text{ moles}$	$y = 0,043$
$m_S = 5 \text{ g}$	$n_S = 5/32 = 0,156 \text{ moles}$	$z = 0,0046$

De la ecuación estequiométrica se calculan los moles de oxígeno necesarios por cada kilogramo de residuo para una combustión completa.

$$n = 1 + \frac{w}{4} + z - \frac{x}{2} = 1 + \frac{5,4}{4} + 0,0046 - \frac{0,5625}{2} = 2,36 \text{ moles de } O_2 / \text{ kg de residuo}$$

$$v_{aire} = \frac{22,4}{1000} \cdot \frac{n}{0,21} = 0,281 \text{ m}^3\text{/kg residuo}$$

$$F_{aire} = v_{aire} \cdot \dot{m}_{residuo} = 0,281 \cdot \frac{2000}{3600} = 0,156 \text{ m}^3\text{/s}$$

Considerando un exceso de aire de 1,8, se inyectarían  $0,281 \text{ m}^3\text{/s}$

## 7 Balance de energía

### 7.1 Balance en el aire

El calor desprendido en el horno viene definido por la masa de residuos que entran por unidad de tiempo ( $\dot{m}_r$ ) por el poder calorífico de la mezcla ( $PC_r$ ).

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_{residuo} \cdot PC_r$$

El poder calorífico de los residuos será la media ponderada de cada uno de los componentes con los que está constituido. En la Tabla 1 se muestra el poder calorífico inferior de distintos materiales que pueden tener los residuos sólidos urbanos.

**Tabla 1:** Poder calorífico inferior de materiales presentes en las basuras

	PCI (MJ/kg)		PCI (MJ/kg)
Orgánicos	4	Papel	18
Plástico	40	Cuero	16
Gomas	25	Madera	15
Textiles	15	Polietileno	45
Nylon	30	Vinílicos	30

El calor desprendido en la combustión es absorbido por el aire que se aspira desde el exterior, aumentando su entalpía,  $\dot{Q}_r = \dot{Q}_{aire}$ , pasando de entalpía  $h_{aire1}$  a  $h_{aire2}$ .

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire} \cdot (h_{aire2} - h_{aire1})$$

La entalpía del aire depende de la temperatura y de la humedad absoluta del aire ( $\omega$ ).

$$h_{aire} = C_{p_{aire}} \cdot T + \omega \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T)$$

La humedad absoluta del aire se puede calcular a partir de la presión de vapor en el aire ( $P_v$ ), y éste depende de la humedad relativa ( $HR$ ) y la presión de vapor en el aire saturado a esa temperatura ( $P_{vs}$ ).

$$P_v = \frac{RH}{100} \cdot P_{vs} \quad \omega = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

La presión de vapor en el aire saturado en pascales(Pa) se calcula como  $P_{vs} = 10^{\frac{10,2818T + 661}{T + 237,3}}$ , donde T se expresa en °C.

Si el calor liberado en la combustión es absorbido por el aire, se puede calcular la temperatura que alcanza éste en la salida del horno.

$$h_{aire2} = \frac{\dot{Q}_{aire}}{\dot{m}_{aire}} + h_{aire1} \quad T_2 = \frac{h_{aire2} - \omega \cdot \lambda}{C_{p_{aire}} + \omega \cdot C_{p_{vapor}}}$$

El calor absorbido por el aire se reparte entre el calor transferido al agua del recuperador y el perdido por la temperatura de las escorias y el aire eliminado por la chimenea.

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{perdidas}$$

## 7.2 Balance en el ciclo de Rankine

Para la recuperación de la energía liberada en la incineración de los residuos se suele aplicar un ciclo de Rankine. Este ciclo queda representado en la Figura 2. De aplicar el balance en energía en cada uno de los elementos que conforman el ciclo obtenemos la potencia de cada uno de ellos cómo el flujo de agua en circulación por la diferencia de entalpía entre la salida y la entrada.

Cada una de las entalpías dependerá de la presión y temperatura en cada uno de los puntos de la instalación. Sus valores se pueden consultar en tablas de las propiedades del agua en estado líquido o vapor saturados, o en tablas de las propiedades termodinámicas del vapor sobrecalentado (Tablas).

$$\begin{array}{ll}
 \text{Potencia absorbida en el recuperador} & \text{Potencia de la turbina} \\
 \dot{Q}_c = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot (h_1 - h_4) & \dot{W}_t = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot (h_1 - h_2) \\
 \text{Potencia en el condensador} & \text{Potencia de la bomba} \\
 \dot{Q}_s = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot (h_2 - h_3) & \dot{W}_b = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot (h_4 - h_3)
 \end{array}$$

### Ejemplo 2 Balance de energía en un ciclo de Rankine

En una instalación con ciclo de Rankine ideal se desean obtener 5 MW haciendo circular vapor de agua. A la turbina entra vapor saturado a 8 MPa y sale a 0,008 MPa. A esa presión entra en el condensador de donde sale líquido. Determinése la potencia de cada uno de los elementos del sistema.

#### Resolución

En la tabla se muestran las entalpías de los puntos de la instalación. El punto 1 (entrada en la turbina) corresponde a vapor saturado a 8 MPa y los valores de volumen específico ( $v$ ), entalpía específica ( $h$ ) y entropía específica ( $s$ ) se pueden consultar en la [tabla correspondiente](#).

Debido a que en el punto 2 (salida de la turbina) el agua está constituida por una mezcla de líquido-vapor, para el cálculo de su entalpía se debe obtener previamente el título de la mezcla  $x$ . Se define título como relación entre la cantidad de vapor de la mezcla y la masa total de ella misma. Sabiendo que la entropía del punto 2 es la misma que la del punto 1, el título y entalpía en el punto 2 se obtiene por:

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{2a}}{s_{2b} - s_{2a}} \quad h_2 = x \cdot h_{2b} - (1 - x) \cdot h_{2a}$$

Donde  $s_{2a}$  y  $h_{2a}$  son la entropía y entalpía del líquido saturado a 0,008 MPa y  $s_{2b}$  y  $h_{2b}$  son la entropía y entalpía del vapor saturado a esa misma presión.

El punto 3 (salida del condensador) corresponde a líquido saturado a 0,008 MPa, coincidente con 2a.

La entalpía del punto 4 (salida de la bomba y entrada en el recuperador de energía) se calcula como:

$$h_4 = h_3 + v_3 \cdot (P_4 - P_3) = 173,88 + 1,008410^{-3} \cdot (8000 - 8) = 181,94 \text{ kJ/kg agua}$$

*¡ojo! las presiones se expresan aquí en kPa*

Punto	x	P (MPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m <sup>3</sup> /kg)
1	1	8	2758,35	5,7432	0,02352
2	<b>0,675</b>	0,008	<b>1794,78</b>	5,7432	
2b	1	0,008	2577	8,2287	
3(2a)	0	0,008	173,88	0,5926	1,0084 10 <sup>-3</sup>
4	0	8	<b>181,94</b>	0,5926	

A partir de la energía neta requerida en la instalación (5 MW) se calcula el flujo de agua circulante (en forma líquida o vapor).

$$\dot{m}_{agua} = \frac{W_t - W_b}{h_1 - h_2 - (h_4 - h_3)} \frac{5000}{963,57 - 8,06} = 5,42 \text{ kg agua/s}$$

Potencia absorbida en el recuperador $\dot{Q}_c = \dot{m}_{agua} \cdot (h_1 - h_4) = 13481,9 \text{ kW}$	Potencia de la turbina $\dot{W}_t = \dot{m}_{agua} \cdot (h_1 - h_2) = 5042,2 \text{ kW}$
Potencia en el condensador $\dot{Q}_s = \dot{m}_{agua} \cdot (h_2 - h_3) = 8481,9 \text{ kW}$	Potencia de la bomba $\dot{W}_b = \dot{m}_{agua} \cdot (h_4 - h_3) = 42,2 \text{ kW}$

## 8 Cierre

Diseñar una planta de incineración es un proceso complejo que implica considerar varios aspectos técnicos, ambientales y de seguridad. Se ha de tener en cuenta la ubicación, alejada de centros urbanos y áreas sensibles desde el punto de vista ambiental; el tipo de residuos (residuos médicos, desechos industriales, desechos urbanos etc.), su composición va a influir en la eficiencia de la combustión y en las emisiones realizadas. Debe elegirse la tecnología de incineración (parrilla, lecho fluidizado, horno de reverbero, etc.). Debe diseñarse el sistema de control y tratamiento de gases residuales (filtros de mangas, scrubbers o catalizadores). Debe planificarse el manejo de residuos sólidos residuales (cenizas).



Figura 5: Esquema de diseño de una planta de incineración

## 9 Ejercicios propuestos

Investiga y propón un conjunto de alternativas para el control de la emisión de dioxinas en la incineración de residuos sólidos.

*Si has propuesto dos alternativas ¡Objetivo conseguido!*

## 10 Bibliografía

Elias X.(2009) Reciclaje de residuos industriales. 2ª Ed. Ed. Diaz de Santos. 1320pp. ISBN: 978-8479788353

Velázquez Martí B. (2017). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. 2ª ed. Ed Reverté. 885pp. ISBN:978-84-291-4755-1