

Sistema para la recuperación de energía térmica de gases de combustión

Turbina de gas Solar Turbines T-60, con aire a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ estable controlando la humedad (limitando el punto de rocío) y generando vapor a 18 bara, gases de combustión al inicio de la chimenea $285\text{ }^{\circ}\text{C}$ y rebajando la temperatura hasta $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Mar5.0 Agua y Energía SLU ha desarrollado en estos años algunas aplicaciones que se irán publicando en la revista Ingeniería Química mensualmente. Hoy se publicará el resumen de una turbina de gas que se ha rebajado la temperatura del aire de admisión y controlado la humedad del aire para que no supere los $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ de punto de rocío.

Mar 5.0 Agua y Energía, SLU

Todos los combustibles al quemarse generan agua (vapor de agua), CO_2 , otros productos y energía térmica. Además del agua que se forma en la combustión del combustible, hay un agua que entra con la humedad del aire (oxígeno), necesario para la combustión del combustible. Es importante medir la humedad del aire que varía a lo largo de las horas del día hasta las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno). Para conocer la cantidad de agua que entra en la caldera, hay que medir lo que se denomina humedad específica en gramos de agua por kilogramo de aire, y los kilogramos de aire necesarios en la combustión que entran en el quemador.

Se trata de generar más kWe, al rebajar la temperatura del aire de admisión a la turbina de gas ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$), y aprovechar los gases de combustión que van a la caldera de recuperación para generar vapor saturado a 18 bara. Los gases de combustión al inicio de la chimenea tienen una temperatura de $285\text{ }^{\circ}\text{C}$ y

una cantidad importante de vapor de agua (el agua que se ha formado en la combustión y el agua que ha entrado con la humedad del aire necesario para la combustión).

El cuadro de la turbina de gas aparece en la Tabla 1. La especificación de la turbina se da en condiciones ISO y la turbina de gas trabaja en las condiciones climáticas que se dan en el lugar donde se encuentra la turbina de gas.

En la turbina de gas trabajando con aire a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con una humedad del 100 % hay que eliminar $0,00308\text{ kg}$ de agua por kg de aire, que son en total $241,5\text{ kg/h}$ de agua. En estas condiciones, la turbina de gas, consumiendo un poco más de gas natural, genera $46.742.400\text{ kWe}$. La diferencia es de $592.220,07\text{ €}$. año ¿Y si en lugar de bajar $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, bajamos a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ o a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$?

La caldera vapor recibirá más cantidad de gases calientes a $478\text{ }^{\circ}\text{C}$. Incluyendo el quemador postcombustión de la calde-

ra, supone 25.000 kg/h de vapor a 18 bar sobre los 20.000 kg/h que recibía con la temperatura del aire a temperatura ambiente. Por la chimenea saldrán mayor cantidad de gases de combustión a una temperatura de 285 °C.

ECONOMIZADORES

Si colocamos cinco economizadores en serie al inicio de chimenea, en una geometría especial, y al final, cuando los gases de combustión alcanzan los 25 °C, colocamos un "extractor" para "corregir" la pérdida de carga de todos los economizadores y mantener la presión al inicio de la chimenea para no variar las condiciones de la combustión, los consumos y producción será los siguientes:

- La cantidad de gas natural consumido: 2.074 Nm³/h, incluido el quemador post combustión de la caldera.
- La cantidad de aire necesario para la combustión: 78.388 kg/h que todo entra como aire a la turbina.
- La cantidad de gases de combustión húmedos que entran en la caldera: 82.750,424 kg/h.
- La cantidad de agua generada en la combustión del gas natural y el aire: 4.362,424 kg/h de agua (gas natural).
- La cantidad de agua máxima que ha entrado con la humedad del aire: 241,43504 kg/h de agua.
- Los gases de combustión al inicio de la chimenea: 285 °C.

Los gases de combustión de 285 °C pasan a 25 °C y se ha transforman en agua saturada a 25 °C, recuperando una gran cantidad de energía térmica. Si aprovechamos toda la

energía térmica que recuperamos, lograremos una rebaja importante del CO₂ por ahorro de combustible.

Cantidades en kg/h en economizador E – 08 ⇒ gases de combustión 82.750,424 kg/h, agua tratada, 32.893,125 kg/h.

ECONOMIZADOR E – 08

El economizador E – 08 se diseña para encontrar la temperatura más elevada de los gases de combustión que puedan de entrar en el segundo economizador E – 10; pueda elevar la temperatura de la mezcla del condensado y agua fresca hasta la temperatura de 110 °C, para que el desgasificador no necesite aportar vapor y se aproveche la toda energía térmica de los gases de combustión cuando pasan por el E – 10.

E – 08, lado gases de combustión ⇒ temperatura de entrada 285 °C, temperatura de salida 167 °C.

E – 08, lado agua tratada ⇒ temperatura de entrada 80 °C, temperatura de salida 167 °C.

En el economizador E – 08 recuperamos ⇒ 26.436.667,0 kWt y/o 793.100,16 €.

Cantidades en kg/h. en economizador E – 10 ⇒ gases de combustión 82.750,424 kg/h, condensado 25.000 kg/h.

ECONOMIZADOR E – 10

El economizador E – 10 se diseña para calentar el condensado y el agua fresca hasta una temperatura de 110 °C para no consumir vapor en el desgasificador.

E – 10, lado gases de combustión ⇒ temperatura de entrada 167 °C, temperatura de salida 110 °C.

TABLA 1

	Unidad	Caso ~	Caso 5	Caso 4	Caso 3	Caso 2	Caso 1	Notas
Temperatura del aire, entrada	°C	-30	-7	-6	-5	15	35	
Humedad relativa	%	100	95	98	100	100	100	Humedad = 100 %
Humedad específica	g/kg aire	0,65	2,58	2,83	3,08	10,7	37,24	Más desfavorable
Punto de rocío	°C	-30	-7,68	-6,27	-5	15	35	
Eficiencia					0,982	0,982	0,982	
Factor de potencia					0,974	0,974	0,074	
Carga específica	kWe				toda	toda	toda	
Potencia neta	kWe				5.410	4.734	4.008	
Consumo de gas natural	kcal/s IT				4.150,22	3.777,51	3.396,92	
Ratio de energía térmica	kcal/kWe H				2.762	2.873	3.051	
Eficiencia térmica	%				31,133	29,933	28,182	
Gases combustibles, salida	kg/h				79.633	74.691	68.011	
Temperatura gases, salida	°C				478	484	498	

E – 10, lado condensado + agua fresca \Rightarrow temperatura de entrada 60 °C, temperatura de salida 110 °C.

En el economizador E – 10 recuperamos \Rightarrow 12.558.240,0 kWt y/o 376.747,20 €.

Cantidades en kg/h. en economizador E – 20 \Rightarrow gases de combustión 82.750,424 kg/h agua tratada 21.928,75 kg/h.

ECONOMIZADOR E – 20

El economizador E – 20 se diseña para tener el condensado de alta temperatura a 95 °C y poder aprovechar el calor del cambio de estado de todo el vapor de agua que llevan los gases de combustión que son como máximo 4.362,424 kg/h.

E – 20, lado gases de combustión \Rightarrow temperatura de entrada 110 °C, temperatura de salida 95 °C.

E – 20, lado agua tratada \Rightarrow temperatura de entrada 80 °C temperatura de salida 95 °C.

En el economizador E – 20 recuperamos \Rightarrow 3.304.800,0 kWt y/o 99.144,0 €.

Cantidades en kg/h. en economizador E – 24 \Rightarrow gases de combustión 82.750,424 kg/h, agua tratada 76.750,625 kg/h.

ECONOMIZADOR E – 24

El economizador E – 24 se diseña para que a salida del E – 24, la temperatura de los gases de combustión alcance los 60 °C, y se posiciona en vertical para que el vapor pueda condensar y recogerse en el punto más bajo. La temperatura de 60 °C representa que los condensados se rebajarán a la temperatura de 60 °C y el agua caliente necesaria para el aire acondicionado también llegara a 60 °C.

E – 24, lado gases de combustión \Rightarrow temperatura de entrada 95 °C, la temperatura de salida 60 °C.

E – 24, lado agua tratada \Rightarrow temperatura de entrada 50 °C, la temperatura de salida 60 °C.

En el economizador E – 24 recuperamos \Rightarrow 7.710.336,0 kWt y/o 231.310,08 €.

Cantidades en kg/h en economizador E – 28 \Rightarrow gases de combustión 82.750,424 kg/h, agua tratada 87.715,0 kg/h.

ECONOMIZADOR E – 28

El economizador E – 28 se diseña para obtener la temperatura de los gases de combustión a 25 °C y todo el vapor de agua que llevan los gases de combustión condensen y se recoja el agua en el punto más bajo del colector por donde circulan los gases de combustión. El economizador E – 28 será de mayor tamaño para que tenga mayor superficie de contacto y el vapor termine condensando.

E – 28, lado gases de combustión \Rightarrow temperatura de entrada 60 °C, temperatura de salida 20 °C.

E – 28, lado agua tratada \Rightarrow temperatura de entrada 10 °C, temperatura de salida 20 °C.

En el economizador E – 28 recuperamos \Rightarrow 8.812.800,0 kWt. y/o 264.384,0 €.

Los precios de los combustibles se han puesto los de enero de 2021, aunque los seleccionados pueden muy “caros” o muy baratos, el coste de un kWt de gas natural \Rightarrow 0,03 €, el coste de un kWe \Rightarrow 0,1 €.

El vapor que se genera en la combustión del gas natural, y el que aporta el agua del aire necesario (es función de la humedad, que es una “nueva” variable a “medir”) para la combustión al “pasarlo” a agua y recuperar el agua, genera mucha energía que recuperamos del orden 30.849.933,6 kWt y/o 926.763,20 €.

CONCLUSIONES (TABLA 2)

- En el economizador E – 10 calentamos el condensado + el agua fresca de 60 °C a 110 °C, para que entre en el desgasificador a 110 °C y no tenga que aportar “calor” generado en la caldera de vapor.

- La aportación de “calor” en el desgasificador la contemplamos para elevar la temperatura del condensado desde 20 °C a 110 °C, y el ahorro anual sería de 22.604.651,0 kWt y/o 678.139,53 €.

- El agua recuperada se la combustión del gas natural y la humedad del aire son 37.835,12 m³. año, que, al recuperarse, es agua destilada con pH 5 a una temperatura de 25 °C, y, si se mejora el pH, se puede utilizar como condensado (he escogido el coste del agua industrial más cara de España, que es 1,86 € m³ y en €, 70.373,0 €).

- El gasto inútil de combustible queda resuelto recuperando el agua y la energía térmica de convertirla en vapor a 285 °C.

- El ahorro de CO₂: como recuperamos mucha energía térmica que tirábamos por la chimenea el 94,12 %, este ahorro supone 17.311.085,35 kg. año de gas natural y un ahorro de 1.476.462,47 € anuales.

- El retorno total sería:

- Diferencia de generación de kWe: 6.580.223 kWe. coste de la diferencia 592.220,07 € año 2021.

- Por bajar la temperatura de los gases de combustión de 285 °C a 25 °C: 55.848.443 kWt: 1.764.412,44 € año 2021.

- Por condensar 37.825 m³ año de vapor de agua a 285 °C a agua a 25 °C: 30.849.933,6 kWt: 926.763,2 € año 2021.

- Ahorro de vapor de 18 bara en el desgasificador al usar el calor de los gases de combustión entre las temperaturas de 167 °C a 110 °C elevando el condensado de 20 °C a 110 °C 22.604.651 kWt: 678.139,53 € año 2021.

- Por CO₂: ahorramos 88.129.161,2 kg de CO₂ que, al coste de este año, suponen 1.476.462,47 € año (antes de la pandemia sería la mitad). Los kg de gas natural que se ahorran son 17.311.085,35 kg/h de gas natural.

Este estudio no es más que un primer borrador de lo que sucede cuando una turbina de gas deja de trabajar en función

de la climatología y se enfría -en este caso el aire de admisión a la turbina- hasta -5 °C que puede enfriarse hasta -0 °C.

Pero el fabricante de la turbina de gas es el que debe facilitar los datos de cual es mejor punto que trabaje la turbina, para después buscar los medios para que pueda trabajar en el máximo rendimiento y ver si la inversión es "agradable".

Hay más puntos a mejorar en este tipo de instalaciones, pero para primer borrador resulta suficiente.

Nota: La patente de invención "Sistema para la recuperación de energía térmica de gases de combustión" fue solicitada el 29 de noviembre 2018, presentada electrónicamente el 21 de agosto de 2019, y el título de patente de invención se otorgó el 03 junio de 2020, con el número ES.2.763.635 B2.

La patente es propiedad de Mar5.0 Agua y Energía SLU, con la que, provisionalmente, se puede contactar por correo ordinario al Apartado de correos 56, 08760 Martorell, Barcelona y/o el correo electrónico ingeniería@mnmd.eu.

» Este estudio no es más que un primer borrador de lo que sucede cuando una turbina de gas deja de trabajar en función de la climatología y se enfría -en este caso el aire de admisión a la turbina- hasta -5 °C que puede enfriarse hasta -0 °C


La patente describe de forma muy genérica la recuperación de la energía térmica de los gases de combustión que salen por la "chimenea" después de "usar" cualquier combustible puede ser sólido, líquido o gas. 

TABLA 2 RESUMEN

Descripción	kWt año	Euros año	Notas
Ingresos, turbina GT1, libre, €	40.216.277,0	3.473.479,84	Datos del año 2018
Ingresos, turbina GT1, a -5 °C,	46.796.500,0	4.211.685,0	Datos del año 2021
Diferencia	6.580.223	592.220,07	El pago del kWe ⇒ 0,09 en 2021
Ingresos, turbina GT2, kWe., €	???.???.???,?	???.???.???,?	Pendiente de información del cliente
Ingresos, turbina GT2, a -5 °C,	???.???.???,?	???.???.???,?	
Diferencia	???.???.???,?	???.???.???,?	
Consumo de gas natural	0	0	El pago del kWe ⇒ 0,08637 € en 2018
Cálculo los kWe ahorrados			
Caldera, turbina 1, agua "torre"	???.???.???,0	???.???.???,0	Pendiente de información
Total kWe	???.???.???,0	???.???.???,0	
Retorno anual energía eléctrica			592.220,07 € año, retorno
Para la turbina 01			
Economizador E – 08,	26.436.667,0	793.100,16	
Economizador E – 10,	12.558.240,0	376.747,20	
Economizador E – 20,	3.304.800,0	99.144,00	
Economizador E – 24,	7.710.336,0	231.310,08	
Economizador E – 28,	8.812.800,0	264.384,00	
"Energía" vapor ↔ agua	30.849.933,6	926.763,20	
"Energía total" caldera 01	89.672.776,6	2.691.448,64	Se recupera el 94,12 % de energía térmica
Retorno anual energía térmica	89.672.776,6	2.691.448,64	2.691.448,64 € año, retorno
Ahorro desgasificador en kg/año	22.604.651,0	678.139,53	Al elevar el condensado de 20 °C a 110 °C
Consumo inútil de combustible	1.664.636,65	49.939,1	Pasar agua a vapor 235,139 kg/h
Humos chimenea	5.507.714,3	165.231,43	
Agua en m ³ /h año, 1 caldera	37.835,12	70.373,0	Coste de 1 m ³ de agua ⇒ 1,86 €
Suma energías + agua + CO ₂		4.288.901,35	4.288.901,35 € año, retorno total
	kg año de CO₂ de ahorro		
Ahorro CO ₂ ⇒ 1.476.462,47 €	88.129.161,82 kg. año de CO₂		17.311.085,35 kg año gas natural ahorrado
			Total de CO₂ ahorrado