

COGENERACIÓN CON GASES DE COK RESIDUALES DE ACERÍA

Rafael Quiles Puente^(*), Antonio J. Gutiérrez Trashorras^(), Eduardo Álvarez
Álvarez^(**)**

(*) Alumno; () Tutor(es)**
UO199226@uniovi.es^(*)

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

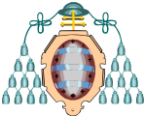
RESUMEN

Las industrias de alto consumo de energía, como el hierro y el acero, el cemento y la generación de energía se muestran como las industrias clave para el control de la contaminación. La mayoría de compuestos emitidos son aromáticos simples que se encuentran en el petróleo, carbón, depósitos de alquitrán, y aparecen en la combustión incompleta del carbón, aceites o materias orgánicas. Han sido caracterizados como carcinógenos y mutagénicos de aquí su importancia. Además de esta problemática medioambiental se suma la eficiencia energética en la industria, que es clave, ya que precede el ahorro tanto económico como el de los recursos energéticos limitados de nuestro planeta.

Como acción a esta problemática se realiza un estudio para un sistema de aprovechamiento de la energía química de un combustible residual (gas cok), subproducto de las baterías de Cok y proceso de la fabricación del acero, para transformarla en energía térmica de gases generando calor por medio de un ciclo de vapor.

ABSTRACT

The industries of high energy consumption, such as iron and steel, cement and power generation are shown as key industries for pollution control. Most simple aromatic compounds are emitted; the oil, coal, tar deposits, and appear in the incomplete combustion of coal, oil or organic matter. They have been characterized as carcinogenic and mutagenic hence its importance. In addition to the environmental problems of energy efficiency in the industry, which is key because it precedes both economic savings as the limited energy resources of our planet adds. As action to study this problem for a system of harnessing the chemical energy of a fuel oil (gas coke), by-product coke oven battery and also process steel manufacturing is done to transform it into thermal energy gas generating heat through steam cycle.



1. INTRODUCCIÓN

El calor residual es el calor contenido en los productos y subproductos de un proceso, que a veces se desaprovecha. En este estudio se analizan los gases en un mechero industrial, ya que son quemados simplemente por un sobre exceso de gases y la imposibilidad de almacenamiento de los mismos, debido a un aumento de producción de la planta y el escaso espacio de los gasómetros ya saturados, hace que esta energía sea objeto de estudio para su reutilización. Este calor puede ser aprovechado de modo que se cumplan dos objetivos simultáneamente [1]:

- Recoger y distribuir el calor para reutilizarlo en el mismo equipo o en otros.
- Disminuir la temperatura de emisión de fluidos de manera que se reduzca la contaminación térmica de la planta.



Imagen 1: Proceso de baterías de cok. AM Avilés.

En la fabricación del acero el carbón de cok es imprescindible como combustible para la alimentación de los hornos altos y la producción de arrabio que luego será acero. Las baterías (imagen 1) son unos hornos donde se introduce carbón de hulla pulverizado para generar el cok con un calor específico mayor. En esos hornos se producen una serie de gases como subproducto.

Estos gases tienen que ser purificados de impurezas y sólidos en suspensión para poder

reutilizarlos, ya que de forma bruta no nos servirían por la gran cantidad de productos corrosivos y dañinos que afectarían cualquier sistema energético.

Los gases pasan por los refrigerantes para eliminar el alquitrán y las aguas amoniacaes. Seguidamente circulan por los electrofiltros para capturar las nieblas de alquitrán y luego por una serie de lavadores de gases (Naftalina, H_2S , NH_3 y Benzol) para así almacenar estos gases limpios y reutilizarlos en otros procesos y son $36000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de caudal total generado.

Debido al aumento de demanda del acero y por tanto de producción estos últimos años, es superior la capacidad de generación de gases como subproducto, por lo que estos gases en exceso se queman un 10% aprox. (fuente AM) desaprovechando su energía.

A fin de no desperdiciar energías residuales y minimizar las emisiones de gases calientes a la atmósfera que fomentan el calentamiento global del planeta se plantea un sistema de aprovechamiento energético.

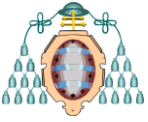
En la antorcha (imagen 2) tenemos la combustión del gas Cok en exceso con las siguientes características.

Caudal máximo (Nm^3/h):	3600
Temperatura de servicio:	50 °C
P.C.I (kcal/Nm^3):	4170
Presión máxima (mm.c.a):	400
Peso molecular:	10

Fuente: AM Avilés. Planta de fabricación de acero.



Imagen 2: Antorcha quemando gas cok. AM Avilés.



Se va a reutilizar estos gases para hacer un proceso de cogeneración, aprovechando la energía térmica en su gran mayoría y la eléctrica.

Como se desaprovecha en torno a un 10% de los gases nos quedaría un caudal de entrada para cogenerar de 3600 Nm³/h.

Una vez descritos los componentes principales de un sistema de cogeneración tenemos que ver cómo combinarlos para que los aportes distintos de energía se adapten a nuestras necesidades. En nuestro caso será el ciclo con turbina de vapor, el vapor de la turbina es utilizado en el proceso industrial.

Una ventaja que presentan estos ciclos es la posibilidad de usar cualquier tipo de combustible [2]: sólido, líquido o gaseoso. Esto hace que se pueda emplear en industrias donde existen energías residuales, como por ejemplo: gases de refinería, leñías negras, gases calientes, etc. La existencia de este combustible residual hace que el ciclo con turbina de vapor sea más rentable que otro basado en turbina de gas o en motores. También se les puede denominar ciclos de cola.

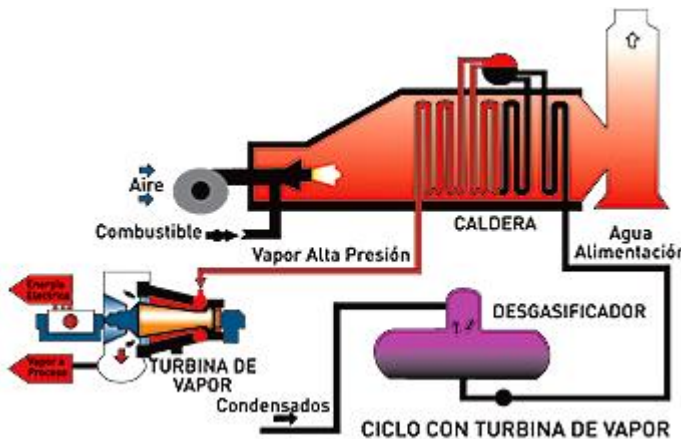


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso con caldera horizontal.

La parte principal del proceso es la caldera la que vamos a someter a estudio. Se dispone de una caldera pirotubular horizontal (figura 4) de vapor saturado según las características del ciclo de vapor y además de ser una caldera comercial y más económica respecto a otras. Finalmente

pasará el vapor por la turbina para su compresión y distribución.



Figura 2: Diagrama de fase del agua

En las calderas de vapor saturado es fácil que condense el vapor en el circuito por eso hay varias opciones para evitarlo como purgas, recalentadores o calorifugado en buen estado que mantienen la temperatura evita la condensación prematura en el circuito [3].

Para generar vapor en la caldera tenemos que tener en cuenta:

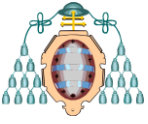
1. Tratamiento de aguas de aporte
2. Desgasificación
3. Combustión
4. La caldera

1.1 Tratamiento de aguas de aporte

El contenido de sustancias corrosivas, en el agua de alimentación antes de su entrada en la caldera debe ser lo más bajo que sea posible.

- a. Evitar la formación de incrustaciones sobre las superficies de calentamiento del agua.
- b. Proteger contra la corrosión los metales de las calderas, recuperadores y tuberías.

Los descalcificadores de agua [4], son muy recomendados para aquellos lugares donde la dureza de agua, contiene muchas sales y minerales, lo que implica muchas desventajas en



la limpieza, obligando a gastar dos o tres veces más en detergentes y químicos de limpieza.

Los descalcificadores son aparatos que permiten sustituir los iones minerales incrustantes por iones solubles en el agua.

Para evaluar las características del agua de calderas, es decir, los parámetros que se deben determinar en cada uno de los análisis efectuados, se toma como referencia la norma UNE-9075-85 [5].

Esta norma tiene por objeto evitar la corrosión, la fragilidad cáustica, los depósitos de incrustaciones sobre las superficies metálicas, y los arrastres en el vapor.

Principales impurezas del agua y sus efectos según la norma UNE-9075-85 [5].

1.2 Desgasificación

Un desgasificador térmico consiste en una cámara colocada sobre el tanque de alimentación de agua a la caldera, que contiene una serie de bandejas perforadas por las que cae el agua de alimentación introducida por su parte superior y circulada a contracorriente.

Esta lluvia de agua en finas gotas de vapor producido por la caldera o por el revaporizado de los condensados recogidos, logran con ello el calentamiento del agua y como consecuencia la separación del aire disuelto en el agua.

Para asegurar que la eliminación ha sido completa, se eleva la temperatura del agua hasta los 102 - 105 °C, por posibles restos de aire. El conjunto de desgasificador y depósito de alimentación deben estar cerrados y presurizados. [6]

La salida del aire se realiza por la parte superior del desgasificador mediante una válvula de punzón que comunica con la atmósfera.

La instalación de un sistema de desgasificación térmica del agua de alimentación de una caldera ofrece las siguientes ventajas:

- Alimentación de agua a la caldera a 105°C, reduciendo los inconvenientes de los choques térmicos y las oscilaciones de presión en los casos de alimentación de agua del tipo Todo/Nada.

- Reducción del porcentaje de purgas a realizar en la caldera para mantener el contenido de sales disueltas.
- Como consecuencia de lo anterior, reducción en la cantidad combustible consumido.
- Estos ahorros pueden alcanzar un valor a considerar y son función en cada caso de las condiciones particulares de cada instalación.

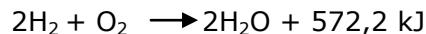
1.3 Combustión

Es el proceso que se realiza en el quemador del generador de vapor el cual transforma la energía química en energía térmica.

En sentido industrial, un combustible es una sustancia sólida, líquida o gaseosa, que siendo rica en carbono, hidrógeno o ambos, es capaz de reaccionar con el oxígeno del aire a una velocidad tal que el calor producido la lleve a la incandescencia, resultando, además, aceptables las condiciones económicas.

Los elementos químicos que hacen que una sustancia sea combustible son el carbono, el hidrógeno y el azufre. Este último no es importante como fuente energética, pero debe de tenerse muy en cuenta porque origina productos altamente corrosivos y contaminantes.

Las reacciones de combustión son [7]:



El objeto de una buena combustión es producir la máxima cantidad de calor, de acuerdo con las propiedades del combustible, minimizando las pérdidas por combustión imperfecta o exceso de aire.

El aire es la fuente normal de oxígeno para la combustión.

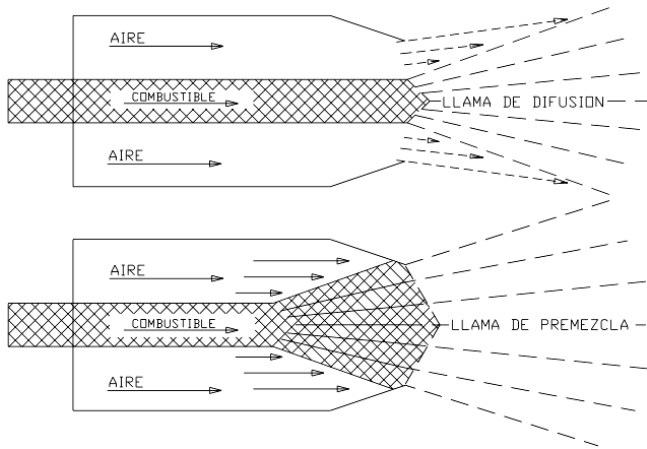


Figura 3: Formación de llamas en el quemador

Para que la combustión sea buena se requieren las siguientes condiciones:

- Temperatura suficientemente alta para que los constituyentes entren en ignición.
- Proporción adecuada aire/comburente.
- Grado de mezcla adecuado para que el aire y el combustible tengan un buen contacto superficial.
- Tiempo necesario para el desarrollo de una combustión completa.

Es necesario controlar el proceso de combustión para obtener un buen rendimiento, para lo cual es necesario una proporción correcta del exceso de aire.

1.4 La caldera

Se utiliza una caldera pirotubular horizontal [8], funciona con los tubos en el interior por los cuales pasan los gases y el agua los rodea en él depósito. El agua se evapora al contacto con los tubos calientes producto a la circulación de los gases de escape. Esta se compone de;

- Quemador, es el dispositivo de la caldera de generar la llama (Figura 3) que provocará la liberación de energía del combustible atomizado. Generalmente los quemadores de las calderas son de llama turbulenta no premezclada, es decir, que a la zona donde se está generando la llama llega por separado el aire y el combustible.

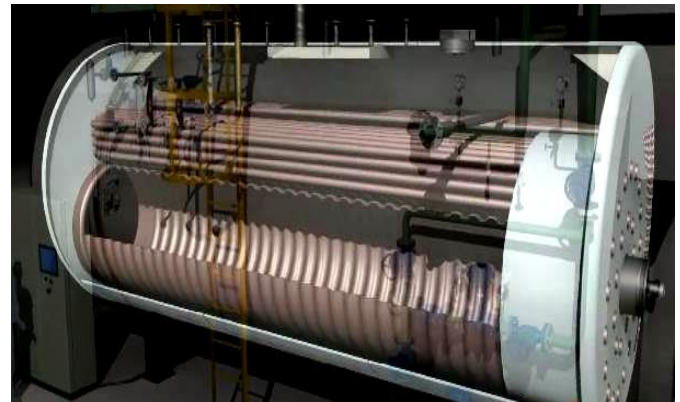
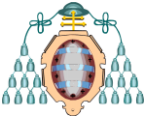


Imagen 3: Interior de una caldera pirotubular horizontal de 3 pasos.

Componentes	COMPOSICIÓN DE ALGUNOS COMBUSTIBLES GASEOSOS			
	Composición en volumen a 15 °C y presión atmosférica			
	Gas natural	Gas de horno alto	Gas de horno de coque	Gas de refinería
CO ₂	0,14	10,00	1,80	3,30
CO	-	27,50	6,30	1,50
O ₂	0,10	0,50	0,20	-
H ₂	-	2,70	53,00	5,60
N ₂	3,20	59,00	3,40	-
CH ₄	87,40	0,30	31,60	30,90
C ₂ H ₆	6,80	-	-	19,80
C ₃ H ₈	1,55	-	-	38,10
C ₄ H ₁₀	0,81	-	-	0,60
C ₂ H ₁₂	-	-	-	-
C ₂ H ₄	-	-	3,70	0,20

Tabla 1: Composición en % de los gases cok

- El hogar o cámara de combustión, es en esta parte de la caldera en donde se realiza la reacción química del combustible (combustión) lo cual produce la liberación de la energía del combustible que se transferirá al agua. El hogar debe de tener la longitud suficiente y el diámetro apropiado para asegurar que exista una total combustión del combustible que se está utilizando para obtener una eficiencia mayor del equipo.
- El haz de tubos, está compuesto por múltiples tubos de menor diámetro que el



hogar, por los cuales ya solo circulan productos de combustión a temperaturas aproximadas de 1000°C a la entrada del haz, el agua que está en la parte exterior de los tubos. Con esto se logra extraer la mayor cantidad de energía disponible de los productos de combustión hasta obtener temperaturas de salida de los mismos alrededor de 250°C que es un parámetro normal para calderas que están bien diseñadas. Se debe destacar que el hogar es considerado como el primer paso de la caldera y luego se cuentan los haces de tubos existentes. Generalmente las calderas pirotubulares horizontales son de 2, 3 y hasta 4 pasos (3 en nuestro caso) [9].

- La coraza, es básicamente un cilindro construido de acero dentro del cual se encuentran alojado de manera integral la cámara de combustión y el haz de tubos.
- Chimenea, es por donde salen los productos de combustión hacia el medio ambiente.
- Dispositivos de control y seguridad, que sin duda alguna son aquellos que garantizan el correcto funcionamiento del equipo



Imagen 4: Exterior de una caldera pirotubular horizontal.

2. MÉTODODO TRABAJO

El balance de calor de una caldera se establece la siguiente igualdad [10]:

$$\text{Calor entrante} = \text{Calor saliente}$$

Para realizar el balance deberemos:

- establecer una temperatura de referencia (normalmente la temperatura ambiente)
- realizar un balance de masa
- considerar el PCI del combustible

A continuación se describen los calores que toman parte en el balance de una caldera de vapor y los cálculos [11].

2.1 Calor entrante

1. calor de combustión (q_{entra})

$$q_{\text{entra}} = \text{PCI}[\text{kcal/ud. de combustible}]$$

2. calor del fluido de entrada (q_{entra})

$$q_{\text{entra}} = q_v \cdot h_s$$

Donde:

h_s = entalpía del fluido de entrada [kcal/kg]

q_v = caudal volumétrico del gas.

2.2 Calor saliente

1. Calor del fluido de salida (q_{salida})

$$q_{\text{salida}} = q_{\text{entra}} - q_{\text{pérdidas}}$$

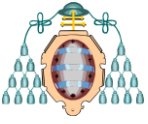
Donde

$q_{\text{pérdidas}}$ = sumatorio de los calores perdidos en la caldera (humos, inquemados, purgas y radiación)

2. Calor por inquemados gaseosos (q_{inq})

q_{inq} = [% de pérdidas sobre el PCI del combustible]

$$q_{\text{inquemados}} = \frac{21}{21 - [\text{O}_2]} \cdot \left[\frac{[\text{CO}]}{3100} + \frac{[\text{CH}]}{1500} \right]$$



3. calor por purgas (q_{purgas})
4. calor por radiación ($q_{radiación}$)
5. Calor de los humos (q_{humos})

$q_{humos} = x$ [kg. humos/Ud. de combustible] \cdot y [kcal/kg humos]
 El calor de los gases de combustión se muestra en la (tabla 4).
 Con el % de O_2 y CO_2 se obtiene el caudal de humos (x) expresado en kg de humos/Ud. de combustible. Con la temperatura de los humos, y en la tabla 4 se encuentra la entalpía específica de los humos (y) en kcal/kg humos.

6. Flujo másico de vapor (m_{vapor}) [kg/h]

$$m_{vapor} = \frac{q_{gas} - q_{perdidas}}{h_{gas} - h_{agua}}$$

7. Rendimiento (η) [%]

$$\eta = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos de entrada:

$Q = 3.600 \text{ m}^3/\text{h}$
 $PCI: 4.170 \text{ kcal}/\text{Nm}^3$
 $P_{H_2O} = 1 \text{ Bar}$
 $T_{ambiente} = 23,7^\circ\text{C}$ (Avilés)

Datos de salida:

$P_{vapor} = 16 \text{ Bar}$
 $T_{Humos} = 200,4 \text{ }^\circ\text{C}$

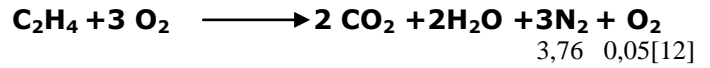
(2) $Q_{entra} = q_v \cdot h_s = 3.600 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 4.170 \text{ kcal}/\text{Nm}^3$
 $= \underline{15,01 \cdot 10^6 \text{ kcal}/\text{h}}$

Con los % de cada gas obtenidos en la (tabla 1) se procede al cálculo del flujo volumétrico de cada componente para calcular el volumen total que se obtiene con estos gases tras la combustión:

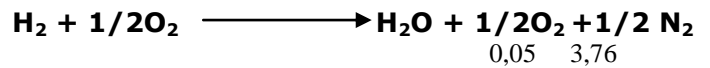
COMPUESTO	% GAS COK	CAUDAL (m^3/h)
C_2H_4	3,70	133,2
H_2	53	1.908
CO_2	1,8	64,8
CO	6,3	226,8
O_2	0,2	7,2
N_2	3,4	122,4
CH_4	31,6	1.137,6

Tabla 2: Caudales y % por compuesto

Ajuste de reacciones implicadas para obtener los flujos volumétricos:

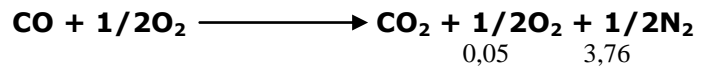


$$V_{L1} = 133,2 \cdot 2 + 2 \cdot 133,2 + 3 \cdot 3,76 \cdot 133,2 + 0,05 \cdot 3 \cdot 133,2 = 2055,27 \text{ m}^3/\text{h}$$



$$V_{L2} = 1.908 \cdot (1 + 0,05 \cdot 1/2 + 1/2 \cdot 3,76) = 5542,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

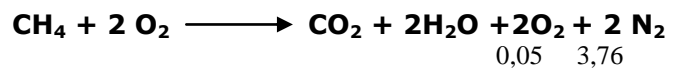
$$V_{CO2} = 64,8 \text{ m}^3/\text{h} = V_{L3}$$



$$V_{L4} = 22,68 \cdot (1 + 0,05/2 + 3,75/2) = 658,85 \text{ m}^3/\text{h}$$

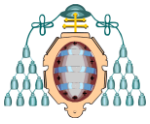
$$V_{O2} = 7,2 \text{ m}^3/\text{h} = V_{L5}$$

$$V_{N2} = 12,24 \text{ m}^3/\text{h} = V_{L6}$$



$$V_{L7} = 1.137,6 \cdot (1 + 2 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 3,76) = 12.081,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{TOTAL} = \underline{20.532,5 \text{ m}^3/\text{h}}$$



Donde se obtiene el % de cada componente después de la combustión:

$$O_2 = 19,98 + 47,7 + 5,67 + 7,2 + 113,76 = 194,31 \text{ m}^3/\text{h} \quad \mathbf{0,95\%}$$

$$N_2 = 1502,496 + 3587,04 + 463,84 + 122,4 + 8554,752 = 14.193,07 \text{ m}^3/\text{h} \quad \mathbf{69,12\%}$$

$$H_2O = 266,4 + 1908,0 + 2275,2 = 4.449,6 \text{ m}^3/\text{h} \quad \mathbf{21,67\%}$$

$$CO_2 = 266,4 + 64,8 + 226,8 + 1137,6 = 1.695,6 \text{ m}^3/\text{h} \quad \mathbf{8,26\%}$$

Con los % de cada componente se buscan los valores de las entalpías en el Perry en función de la Tª de los humos para un cálculo más detallado de las pérdidas.

Presión Kg/cm ²	Temperatura de saturación °C	Volumen específico		Densidad vapor saturado y seco kg/m ³	Entalpía del líquido kcal/kg	Entalpía del vapor saturado y seco kcal/kg	Calor latente de vaporización kcal/kg
		Líquido Litro/kg	Vapor saturado m ³ /kg				
1,50	110,8	1,052	1,181	0,8467	110,99	643,1	532,1
2,00	119,6	1,060	0,9018	1,109	119,94	646,3	526,4
2,50	126,8	1,067	0,7318	1,367	127,2	648,7	521,5
3,00	132,9	1,073	0,6169	1,621	133,4	650,7	517,3
3,50	138,2	1,078	0,5338	1,873	138,9	652,4	513,5
4,00	142,9	1,083	0,4709	2,124	143,7	653,9	510,2
4,60	147,2	1,087	0,4215	2,373	148,1	655,2	507,1
5,00	151,1	1,092	0,3817	2,620	152,1	656,3	504,2
6,00	158,1	1,100	0,3213	3,111	159,3	658,3	498,9
7,00	164,2	1,107	0,2778	3,600	165,7	659,9	494,2
8,00	169,6	1,114	0,2448	4,085	171,4	661,2	489,8
9,00	174,5	1,120	0,2189	4,568	176,5	662,3	485,8
10,00	179,0	1,126	0,1980	5,051	181,3	663,3	482,1
11,00	183,2	1,132	0,1808	5,531	185,7	664,1	478,4
12,00	187,1	1,137	0,1663	6,013	189,8	664,9	475,1
13,00	190,7	1,143	0,1540	6,494	193,6	665,6	472,0
14,00	194,1	1,148	0,1434	6,974	197,3	666,2	468,9
15,00	197,4	1,153	0,1342	7,452	200,7	666,7	466,9
16,00	200,4	1,157	0,1261	7,930	204,0	667,1	463,1
17,00	203,3	1,162	0,1189	8,410	207,2	667,5	460,3
18,00	206,1	1,166	0,1125	8,889	210,2	667,8	457,6
19,00	208,8	1,171	0,1067	9,372	213,1	668,2	455,1

Tabla 3: Tablas de vapor de agua [11]

Según la presión de salida que queremos para nuestro proceso vamos a la (tabla 2) para obtener la entalpía del vapor saturado.

$$H_{\text{vapor sat}} = 667,1 \text{ kcal/Kg a 16 Bar (tabla 3)}$$

$$T_{\text{salida gases}} = 200,4 \text{ °C}$$

$$(1) q_{\text{perdidas}} = q_{\text{inquemados}} + q_{\text{humos}} + q_{\text{purgas}} + q_{\text{radiación}}$$

$$q_{\text{salida}} = q_{\text{entra}} - q_{\text{pérdidas}}$$

$$(2) q_{\text{inquemados}} = \frac{21}{21 - [O_2]} \cdot \frac{[CO]}{3100} + \frac{[CH]}{1500}$$

$$[O_2] = 0,95\%$$

$$[CO] = 150 \text{ ppm [9]}$$

$$[CH] = 5 \text{ ppm [9]}$$

$$q_{\text{inquemados}} = 0,05591 \text{ kcal/m}^3 \cdot 3.600 \text{ Nm}^3/\text{h} = \mathbf{2012,9 \text{ kcal/h}}$$

(3,4) $q_{\text{purgas}} + q_{\text{radiación}}$ = se estima un 5% de pérdidas en condiciones normales. [12]

$$q_{\text{purgas}} + q_{\text{radiación}} = Q_{\text{gas}} \cdot 0,05 = 15,12 \cdot 10^6 \text{ kcal/h} \cdot 0,05 = \mathbf{756 \cdot 10^3 \text{ Kcal/h}}$$

Entalpías de gases (Kcal/kg de gases) para combustibles gaseosos

Combustión	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
O ₂ (%)	12,0	11,4	10,8	10,3	9,7	9,1	8,5	8,0
CO ₂ (%)	1,00	1,05	1,10	1,15	1,21	1,26	1,36	1,46
Exceso de aire	14,2	14,8	15,5	16,3	17,1	18,0	19,1	20,3

Temp. Gases (°C)	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
6,5	6,6	6,6	6,6	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
13,3	13,3	13,2	13,2	13,1	13,1	13,1	13,0	13,0	13,0	13,0
19,9	19,9	19,8	19,8	19,7	19,6	19,6	19,6	19,5	19,5	19,5
26,8	26,7	26,6	26,5	26,4	26,3	26,3	26,1	26,0	26,0	26,0
33,5	33,4	33,3	33,2	33,0	32,9	32,9	32,8	32,6	32,6	32,6
40,4	40,2	40,1	39,9	39,7	39,6	39,6	39,4	39,3	39,3	39,3
47,2	47,0	46,9	46,7	46,5	46,3	46,3	46,1	45,9	45,9	45,9
54,1	53,9	53,7	53,5	53,3	53,1	53,1	52,8	52,6	52,6	52,6
61,0	60,8	60,6	60,3	60,1	59,8	59,8	59,6	59,3	59,3	59,3
68,0	67,7	67,5	67,2	66,9	66,7	66,7	66,4	66,1	66,1	66,1

Tabla 4: Entalpías de gases [13]

$$q_{\text{perdidas}} = 756 \cdot 10^3 \text{ Kcal/h} + 2012,9 \text{ Kcal/h} = 5 \text{ \% pérdidas}$$

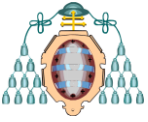
$$(6) m_{\text{vapor}} = \frac{q_{\text{gas}} - q_{\text{perdidas}}}{h_{\text{gas}} - h_{\text{agua}}}$$

$$h_{\text{agua}} \text{ (tabla 3)} = 23,81 \text{ kcal/Kg a } 23,7^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{vapor}} = \frac{(15,12 \cdot 10^6 - 0,05 \cdot 15,12 \cdot 10^6) \text{ kcal/h}}{(667,1 - 23,81) \text{ kcal/kg}}$$

$$m_{\text{vapor}} = 22330 \text{ kg/h}$$

Otra manera de calcular la producción de vapor más eficaz sería con la densidad del gas a partir de sus componentes.



$$h_{200^{\circ}\text{C}} \text{ (tabla 4)} = 53,1 \text{ kcal/Kg}$$

$$PV = nRT \quad ; \quad P \cdot PM = \rho \cdot RT$$

$$PM = 0,95 \cdot 32/100 + 28 \cdot 0,691 + 44 \cdot 0,082 + 18 \cdot 0,216 = 27,19 \text{ g/mol}$$

$$\rho = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 27,19 \text{ g/mol}}{0,082 \text{ atm}\cdot\text{l/mol}\cdot\text{k} \cdot 473 \text{ k}} = 0,70 \text{ Kg/m}^3$$

$$(1) q_{\text{salida}} = 20.532,5 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,70 = 14372,7 \text{ kg/h}$$

$$(5) q_{\text{humos}} = 14372,7 \text{ kg/h} \cdot 53,1 \text{ kcal/Kg} = 763,2 \cdot 10^3 \text{ kcal/h}$$

$$q_{\text{pérdidas}} = (763,2 \cdot 10^3 + 756 \cdot 10^3) \text{ kcal/h} = 1519 \cdot 10^3 \text{ kcal/h}$$

$$(6) m_{\text{vapor}} = \frac{q_{\text{gas}} - q_{\text{pérdidas}}}{h_{\text{gas}} - h_{\text{agua}}}$$

$$m_{\text{vapor}} = \frac{(15,12 \cdot 10^6 - 1519 \cdot 10^3) \text{ kcal/h}}{(667,1 - 23,81) \text{ kcal/kg}}$$

$$m_{\text{vapor}} = 21142 \text{ kg/h} = 21,14 \text{ t/h}$$

Los datos de la producción de vapor son similares en ambas resoluciones tomando siempre como referencia la más desfavorable.

$$(7) \text{Rendimiento}(\eta) = 1 - \frac{1519 \cdot 10^3 \text{ kcal/h}}{15,01 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}} = 0,90 \%$$

Los resultados son coherentes con respecto a calderas comerciales como la Bosch UL-S [14] además de tener un rendimiento alto.

Una de las medidas de mejora para la eficiencia energética de la caldera puede ser el precalentamiento de las aguas de aporte con el calor de los humos a 200°C. [15]

$$T_{\text{ambiente}} = 23,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad h_L = 23,81 \text{ kcal/Kg}$$

Teniendo en cuenta el % de pérdidas en humos y la combustión y tomando referencias comerciales [13,14] nos subiría la temperatura de aporte en torno a 36°C.

$$T_{\text{recupe}} = 59,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad h_L = 59,65 \text{ kcal/Kg}$$

$$m_{\text{recupe}} = \frac{(15,12 \cdot 10^6 \cdot 0,0025) \text{ kcal/h}}{(59,65 - 23,81) \text{ kcal/kg}}$$

$$m_{\text{recupe}} = \frac{37800 \text{ kcal/h}}{35,84 \text{ kcal/kg}} = 1.055 \text{ Kg/h} = (5\%)$$

$$m_{\text{Total}} = m_{\text{vapor}} + m_{\text{recupe}} = \mathbf{22197 \text{ Kg/h}}$$

Según los resultados y despreciando las pérdidas del proceso de la turbina, ya que el objeto de estudio es la caldera, la justificación es la siguiente:

En las instalaciones de AM Avilés, la cogeneración se tendrá que realizar en la zona donde se obtiene el gas subproducto, en las Baterías de cok, donde también hay otro proceso la planta de sulfato amónico que procesa el agua amoniacal proveniente de los refrigerantes.

Tiene un consumo total de vapor según la (tabla 5) de 21000 kg/h que se compra al exterior de la planta a un precio de 23,29€/T vapor. [16]

Identificación muestra: Agua amoniacal a la salida de las columnas stripping en sulfato
Fecha: 15 JULIO 2014
Hora: 9:00

Muestreo propio: SI NO

Tipo de muestreo: Simple Compuesto Integrado

Aspecto: Muestra líquida de color ligeramente amarillento

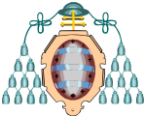
Presentación: Bote de plástico tipo orejeta de 1 L

Notificado al jefe de turno: SI NO

Parámetro	Resultados				Unidades	Método
	C-1	C-2	C-3	C-4		
pH	#N/A	9,63	9,64	9,78	pH	SM-4500- H ⁺ -pH-B
Vapor	#N/A	3,9	5,1	12	t.h ⁻¹	

Tabla 5: Consumo de vapor en la planta de sulfato. AM Avilés.

El ahorro que supone la cogeneración para abastecer de energía esta planta sería de 489 €/h por lo tanto que al día serían 11738 €/día de trabajo de la planta y 4284428 €/año.



4. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, el estudio de un proceso de cogeneración de los gases residuales de acería desaprovechados, se justifica analíticamente reutilizando estos gases para generar energía. La magnitud de los resultados es muy buena, ya que, se obtiene un rendimiento alto del 90% y con el calor obtenido más el recuperado de los humos, se genera una producción de vapor 22197 kcal/h que puede abastecer perfectamente el consumo de vapor de una planta de sulfato amónico y parte del consumo eléctrico. La planta está ubicada en las mismas instalaciones donde se realiza el estudio para el aprovechamiento energético del gas cok. Hoy en día el vapor de la planta de sulfato se compra al exterior de la acería por un importe de 23,29 €/t y la calidad del vapor es mala por las pérdidas en su transporte. Los beneficios son apreciables si se realiza la cogeneración, 11738 €/día de trabajo de la planta. Por otro lado estos resultados entran dentro del rango de calderas comerciales más utilizadas en la industria por lo que no hay que fabricar una caldera a medida con los elevados costes que llevaría. El principal objeto del artículo, es el cálculo de una caldera pirotubular horizontal donde se demuestra que es netamente iterativo ya que se empieza asumiendo unos parámetros a partir de los datos del combustible, para luego verificar si la caldera funcionará de una manera correcta. Si no es así, hay que variar dichos parámetros de una u otra manera hasta tener valores que indiquen que la caldera funciona correctamente, un buen ejemplo es la temperatura de los gases de salida por la chimenea o las pérdidas que se han recuperado de la chimenea para recalentar el agua de aporte a la caldera y aumentar así la producción de vapor en el proceso.

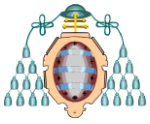
5. NOMENCLATURA

AM= ArcelorMittal Avilés (España)- Fábrica de acero – División de planos, www.arcelormittal.com
PCI: poder calorífico inferior del combustible
 Q_{entra} : calor disponible para transferir al agua de la caldera.
 Q_{agua} : calor neto transferido al agua.
 Q_v : caudal volumétrico del gas

$Q_{perdidas}$: Calor obtenido tras las pérdidas en la caldera.
 $\eta_{caldera}$: Eficiencia de la caldera.
 H_s : Entalpía de vaporización del agua.
 H_{gas} : Entalpía del vapor saturado.
 H_{atm} : Entalpía del agua a presión atmosférica.
 P_{sat} : Presión de saturación del vapor.
 P_{atm} : presión atmosférica
 P : presión absoluta.
 PM : Peso molecular.
 m_v : Flujo másico de vapor.
 m_{Total} : Flujo másico vapor más el flujo de las pérdidas recuperadas.
 m_{recupe} : Flujo másico vapor recuperado de las pérdidas.
 n : moles del gas.
 T_{recu} : Temperatura obtenida tras la recuperación de calor en el agua
 T_{salida} : Temperatura de salida de los gases por la chimenea de la caldera.
 T_{agua} : Temperatura del agua de alimentación de la caldera.
 T_{sat} : temperatura de saturación del agua.
 $T_{ambiente}$: temperatura ambiente tomada como referencia.
 T : temperatura absoluta.
 T^a : temperatura.
Perry: Manual del ingeniero químico Robert H. Perry.
 $V_{[CO_2]}$: flujo volumétrico del compuesto.
 $V_{[H_2O]}$: flujo volumétrico del compuesto.
 $V_{[N_2]}$: flujo volumétrico del compuesto.
 $V_{[O_2]}$: flujo volumétrico del compuesto.
 $X_{[CO_2]}$: concentración de CO_2 en productos de combustión.
 $X_{[H_2O]}$: concentración de H_2O en productos de combustión.
 $X_{[N_2]}$: concentración de N_2 en productos de combustión.
 $X_{[O_2]}$: concentración de O_2 en productos de combustión.
 ρ : densidad, cantidad de masa.
 R : constante universal de los gases ideales.

6. AGRADECIMIENTOS

A mi familia por apoyarme en todo momento pese a la adversidad, a mis compañeros de trabajo de Daorje y Arcelormittal Avilés (Cilindros-Laminación



e I+D) por facilitarme datos reales de los procesos en planta y animarme en mi progreso. Finalmente a la Universidad de Oviedo por darme esta oportunidad de ampliar mis conocimientos y a los profesores del máster por ser tan comprensivos y ayudarme ya que la compaginación de trabajo y estudios es complicada.

[16]Internet 7,
<http://members.questline.com/Article.aspx?articleID=18180&accountID=1863&nl=13848>

7. REFERENCIAS

- [1] Internet 1,
<http://www.empresaeficiente.com/sistemas-de-recup-de-calor-aprovechamiento-de-calor-residual>
- [2] Cogeneración, pag.114 – Mario Villares Martín – Fc editorial
- [3] Basics of boiler and Hrsg design - Brad Buecker- Amazon
- [4] Internet 2,
<http://www.babcock.com/library/pages/technical-papers.aspx>
- [5] Internet 3,
<http://www.aenor.es/aenor/inicio/home/home.asp>
- [6] Internet 4,
<http://www.cicloscombinados.com/index.php/calderas-hrsg>
- [7] Apuntes de la asignatura Generación termoeléctrica limpia- combustión 2005- Ismael Prieto, Máster Ingeniería Energética
- [8] Termotecnia, pag.278 – Lluís Jutglar y Maribel Galán – Marcombo
- [9] Cerney (thermal energy engineering & manufacturing) – www.cerney.es – ps14-a-276
- [10] Transmisión de calor – M^a. Manuela Prieto González e Inés Suárez Ramón – Ediuno
- [11] Transferencia de calor, problemas – V. Aguirrezabalaga López de Eguilaz y M.M. Prieto González – Ediuno
- [12] Internet 5,
<http://www.tiemporeal.es>
- [13] Tablas y gráficos para la resolución de problemas de "Transmisión de calor" – Inés Suarez Ramón y M^a. Manuela Prieto González – Ediuno
- [14] Internet 6,
<http://www.bosch-industrial.com/es/pagina-de-producto/caldera-de-vapor/uls-ulsx.html>
- [15] Apuntes de la asignatura Exergía, Termoeconomía y Cogeneración – Máster Ingeniería Energética