

Informe de rendimiento de los generadores de vapor en XXX, S.A.

Objetivo

El presente informe tiene por objeto analizar y evaluar el funcionamiento de las calderas de vapor instaladas en XXX, S.A. y sus quemadores;

CALDERA 1:

FABRICANTE : GEVAL

FECHA: 1.991

POT.: 4.800.000 KCAL/H

CALDERA 2:

FABRICANTE : GEVAL

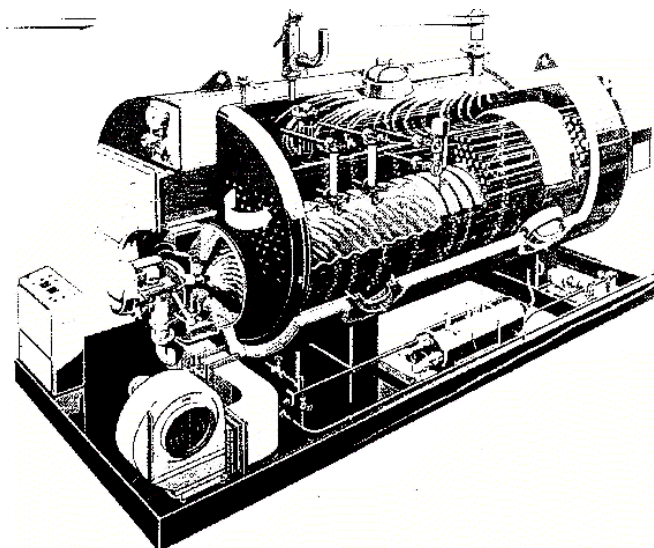
FECHA: 1.991

POT.: 4.800.000 KCAL/H

con el fin de identificar las posibilidades de mejora tanto de rendimiento energético como de emisiones atmosféricas de las mismas. El informe incluye también un estudio técnico-económico que incluye recomendaciones sobre las inversiones a acometer.

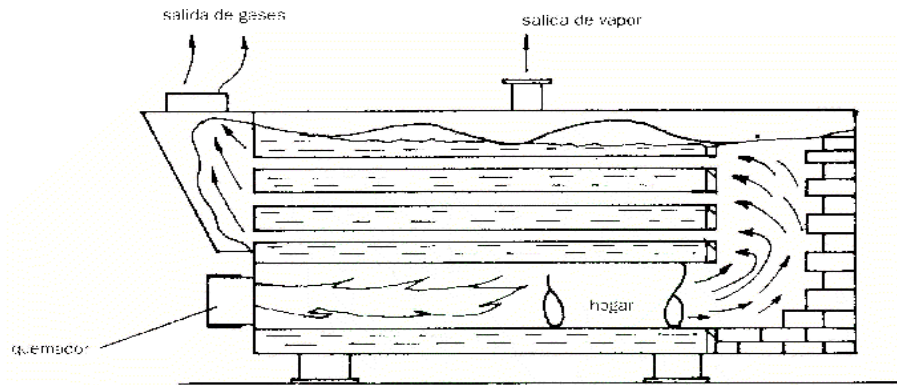
Descripción

Una caldera o generador de vapor es un equipo estático que se utiliza para producir vapor de agua a una cierta presión para usos industriales, a partir del agua de alimentación y combustible (gas natural). El diagrama adjunto corresponde al de una caldera pirotubular como las instaladas en XXX, S.A.



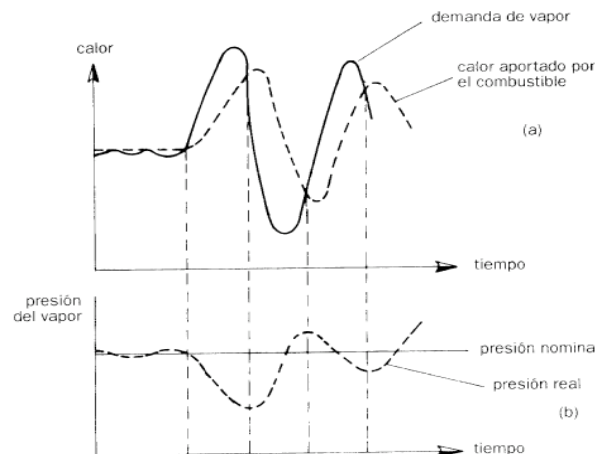
El aporte de calor al agua de alimentación para lograr su vaporización se logra a partir de la combustión de un combustible (gas natural) mediante un quemador. La transmisión de calor se produce en parte por radiación de la llama en el hogar y en parte por convección de los humos calientes que circulan por los tubos. El agua se transforma así en vapor saturado.

En la figura siguiente se puede ver un esquema típico de una caldera convencional de tipo pirotubular.



Los quemadores normalmente utilizados son de *tiro forzado*, pues el aire suministrado para la combustión es introducido en el hogar por un ventilador que toma el aire de la atmósfera y lo introduce a una presión adecuada para que haya tiro suficiente en el conducto de salida de humos.

El funcionamiento de la caldera pasa por ciclos de presurización – despresurización en los que la presión en la caldera varía ligeramente en torno al punto de consigna. Como se puede ver en la figura siguiente, cuando la demanda de vapor excede a la aportación de calor la presión decrece y se produce revaporizado (efecto flash); cuando la demanda es inferior a la aportación de calor aumenta la presión, almacenando el agua y el vapor más energía térmica.



Rendimiento energético

Los humos de escape salen por la chimenea a una cierta temperatura. Cuanto menor es dicha temperatura mejor es el rendimiento de la caldera ya que mayor es la cantidad de calor cedido por los humos en la caldera. Para lograr este efecto las calderas deben diseñarse con la superficie de intercambio adecuada (debe tenerse en cuenta que temperaturas de humos excesivamente bajas pueden provocar problemas de corrosión por condensación ácida, especialmente en calderas que utilizan combustibles con niveles significativos de azufre: fuel-oil y gas-oil). Por otro lado tanto el hogar como los tubos deben mantenerse limpios de incrustaciones (mediante limpiezas químicas periódicas y buen tratamiento del agua de alimentación). Los tubos, a su vez, deben mantenerse limpios de hollín; todo ello con objeto de maximizar el rendimiento energético de la caldera.

El rendimiento de la caldera está también íntimamente ligado a la calidad de la combustión. Para lograr un rendimiento máximo debe mantenerse un mínimo aire de combustión que permita la combustión completa del combustible sin producir inquemados (opacidad, CO, hidrocarburos) en los humos. Un quemador de diseño adecuado deber ser capaz de trabajar con un nivel de oxígeno en humos del 3% sin producir problemas de inquemados (ver ANEXO II).

Las calderas objeto de este estudio se han sometido a prueba, y con una sonda se han analizado muestras de los humos. Con estos datos se ha calculado el rendimiento actual real de las calderas. Se observa que dicho rendimiento es sorprendentemente bajo (ver ANEXO I.).

Para evaluar el funcionamiento de las 2 calderas, se han probado las mismas a 3 cargas de trabajo.

Mediante una serie de cálculos realizados internamente por el aparato de medida (ver ANEXO II) en base a la composición de los humos y su temperatura, se llega a los siguientes resultados:

RENDIMIENTOS	CALDERA 1	CALDERA 2
Carga Mínima	79.7 %	19.5 %
Carga Media	78 %	75.8 %
Carga Máxima	75.8 %	73.5 %

Una vez obtenidos estos rendimientos, se procede a su evaluación; observándose que son sensiblemente inferiores a los teóricamente alcanzables para una caldera de este tipo empleando gas natural como combustible.

Valoración económica

Para realizar esta valoración se van a comparar los resultados a partir de los cálculos de rendimiento real anteriormente obtenidos, con los resultados que se obtendrían a partir del rendimiento esperado para estas calderas correspondiente a una combustión correcta con un quemador adecuado.

Para obtener la energía que consumen realmente estas calderas (**Q real**) se procede de la siguiente manera: se asume una producción de vapor saturado a 10 bar a partir de un agua de alimentación a 70°C, y el rendimiento señalado anteriormente.

Dicho calor se compara con el calor que deberían consumir las calderas (**Q diseño**) asumiendo una combustión correcta con un quemador adecuado.

Con estos datos se calcula la energía consumida en ambas calderas para producir una tonelada métrica de vapor, que resulta ser de:

Equipo	Q real KJ/Tm	Q diseño KJ/Tm	DQ KJ/Tm
<i>CALDERA 1</i>	3.278.856	2.701.492	577.363
<i>CALDERA 2</i>	3.381.460	2.701.492	679.968

Se comparan ambos valores, obteniendo la diferencia de energía **DQ**. Este parámetro indica el consumo extra de energía que implica operar estas calderas con los pobres rendimientos actuales.

A partir de estos resultados y asumiendo una producción media de 5800 kg/h en cada caldera durante 10 horas al día, con un precio de gas natural de 1.89 cent €/ Termia PCS (precio estimado a medio plazo) se realiza la **valoración económica**, explicada detalladamente en el ANEXO III, donde se obtienen los siguientes resultados:

Equipo	DQ (€/Tm)	Δ€ (€/día)
<i>CALDERA 1</i>	2.90	168.20
<i>CALDERA 2</i>	3.42	198.36
<i>Total:</i>		336.56

Es decir, centrándonos en la caldera nº2, la mejora de rendimiento que supondría la utilización de un quemador adecuado en esta caldera implicaría una disminución en la demanda de combustible equivalente a 198.36 €/ día (33.004 pts/día)

La inversión en un nuevo quemador y en el sistema de bombeo para la caldera nº2 se estima en unos 49.000 €, de forma que la amortización de la inversión se produciría en 247 días de funcionamiento.

Conclusiones

La causa principal de este bajo rendimiento es una combustión deficiente de la caldera. Esta conclusión es evidente a la vista de los altos contenidos de inquemados en los humos a pesar del alto exceso de aire con el que están trabajando los quemadores (oxígeno elevados en humos). Estas deducciones se ven reforzadas por la presencia de hollín y oxidaciones en los haces tubulares detectados en la inspección de las calderas. Por otro lado las emisiones atmosféricas de las calderas sobrepasan los límites legales, por lo que se hace preciso implantar las soluciones pertinentes en el menor plazo posible.

La solución propuesta es la de cambiar los quemadores existentes por unos más adecuados para conseguir una combustión completa con un mínimo exceso de aire, al menos en la caldera n°2, maximizando el rendimiento energético de la misma, a la vez que minimizando la formación de hollines y de corrosión.

El retorno de esta inversión es elevado (amortización de 247 días), por ello se recomienda acometer la inversión de un nuevo quemador y equipo de bombeo en caldera n°2 ajustados a las especificaciones técnicas de Mavainsa con el objeto de obtener rendimientos energéticos adecuados en la caldera y mantener los niveles de emisiones de los humos en valores admisibles dentro de la legislación medioambiental.

También se recomienda la realización de limpiezas químicas periódicas para evitar incrustaciones (según procedimiento de Mavainsa de limpieza química con pasivantes) así como la inspección y limpieza de hollines de los tubos de las calderas.

La monitorización de los niveles de oxígeno e inquemados en humos así como la temperatura de los mismos permitirá evaluar la evolución del rendimiento de los equipos y la detección de anomalías con prontitud.

ANEXO I: RESULTADOS DEL ENSAYO

CALDERA 1

Cal. N° 1
 *** KANE-MAY ***
 ** KM QUINTOX **
 FECHA 03-06-02
 HORA 10:57:17
 GAS NATURAL
 O2 % 6.9
 CO PPM 7
 PRES hPa 0.00
 REND % (B) 79.7
 AIRE % 48
 CO2 % 8.0
 NO PPM 29
 NO2 PPM 0
 NOX PPM 29
 SO2 PPM 0
 REF %O2 3.0
 REL. .. C 140.7
 HUM. .. C 170.5
 ENTR NO CONECT.
 AMBIENTE C 29.8

Cal. N° 1
P. Media
 *** KANE-MAY ***
 ** KM QUINTOX **
 FECHA 03-06-02
 HORA 10:59:07
 GAS NATURAL
 O2 % 9.5
 CO PPM 0
 PRES hPa 0.00
 REND % (B) 78.0
 AIRE % 82
 CO2 % 6.5
 NO PPM 30
 NO2 PPM 0
 NOX PPM 30
 SO2 PPM 0
 REF %O2 3.0
 REL. .. C 149.7
 HUM. .. C 179.6
 ENTR NO CONECT.
 AMBIENTE C 29.9

Cal. N° 1
P. Max.
 *** KANE-MAY ***
 ** KM QUINTOX **
 FECHA 03-06-02
 HORA 11:01:30
 GAS NATURAL
 O2 % 10.0
 CO PPM 2
 PRES hPa 0.01
 REND % (B) 75.8
 AIRE % 91
 CO2 % 6.2
 NO PPM 33
 NO2 PPM 0
 NOX PPM 33
 SO2 PPM 0
 REF %O2 3.0
 REL. .. C 176.7
 HUM. .. C 206.9
 ENTR NO CONECT.
 AMBIENTE C 30.2

CALDERA 2

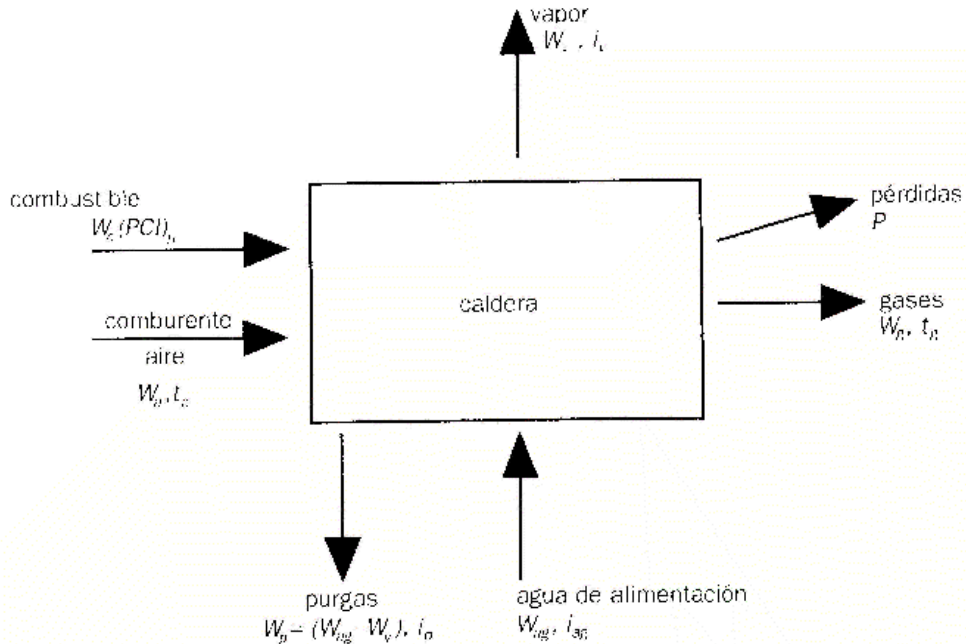
Cal. N° 2 (Min.)
 *** KANE-MAY ***
 ** KM QUINTOX **
 FECHA 03-06-02
 HORA 11:15:05
 GAS NATURAL
 O2 % 4.2
 CO PPM .. 1875
 PRES hPa 0.00
 REND % (B) 19.5
 AIRE % 25
 CO2 % 9.5
 NO PPM 35
 NO2 PPM 0
 NOX PPM 35
 SO2 PPM 1
 REF %O2 3.0
 REL. .. C 141.5
 HUM. .. C 172.9
 ENTR NO CONECT.

Cal. N° 2 (P. Media)
 *** KANE-MAY ***
 ** KM QUINTOX **
 FECHA 03-06-02
 HORA 11:17:27
 GAS NATURAL
 O2 % 7.9
 CO PPM 27
 PRES hPa 0.00
 REND % (B) 75.0
 AIRE % 61
 CO2 % 7.4
 NO PPM 46
 NO2 PPM 0
 NOX PPM 46
 SO2 PPM 0
 REF %O2 3.0
 REL. .. C 182.9
 HUM. .. C 214.9
 ENTR NO CONECT.
 AMBIENTE C 31.9

Cal. N° 2 (P. Max)
 *** KANE-MAY ***
 ** KM QUINTOX **
 FECHA 03-06-02
 HORA 11:18:48
 GAS NATURAL
 O2 % 8.8
 CO PPM 34
 PRES hPa 0.15
 REND % (B) 73.5
 AIRE % 72
 CO2 % 6.9
 NO PPM 39
 NO2 PPM 0
 NOX PPM 39
 SO2 PPM 0
 REF %O2 3.0
 REL. .. C 208.2
 HUM. .. C 240.4
 ENTR NO CONECT.
 AMBIENTE C 32.2

ANEXO II: PROCEDIMIENTO DE CALCULO DE RENDIMIENTO

Para obtener el rendimiento de la caldera, se procede a realizar un balance energético, tal como se muestra en la figura siguiente:



Teniendo en cuenta los anteriores parámetros de funcionamiento, se ha obtenido el rendimiento h de las mismas mediante los siguientes cálculos:

$$\zeta (\%) = 100 - \text{PÉRDIDAS}$$

$$\text{PÉRDIDAS} = P_1 + P_2 + P_3$$

Estas pérdidas vendrán dadas en $\%(PCI)_h$; Poder Calorífico Inferior Húmedo del gas combustible, siendo el PCI del GAS NATURAL= 9627,33 kcal/Nm³.

P_1 : pérdidas por calor sensible en los gases (en $\%(PCI)_h$).

Se calculan mediante la siguiente expresión:

$$P_1 = K \cdot \frac{T_g - T_a}{CO_2 + SO_2}$$

donde:

$K = 0.47$ (por ser GAS NATURAL).

T_g = temperatura de salida de gases de escape (°C).

Ta = temperatura ambiente (°C).

CO₂+SO₂ = contenido de éstos en los gases de escape (%).

P₂: pérdidas por inquemados (en %(PCI)_v).

Se calculan mediante la siguiente expresión:

$$P_2 = \frac{21}{21 - [O_2]} \left[\frac{[CO]}{3100} + \frac{[CH]}{1000} + \frac{OP}{65} \right]$$

donde:

[O₂] = contenido en oxígeno de los gases de escape.

[CO] = contenido monóxido de carbono de los gases de escape (ppm).

[CH] = contenido en hidrocarburos de los gases de escape (ppm).

OP = opacidad de los gases de escape (%).

P₃: otras pérdidas (en %(PCI)_v).

Corresponden a las pérdidas en purgas de agua y a las debidas a la vaporización. En función de la carga a la que trabajan, se consideran aproximadamente en torno a un 3-5%.

En la siguiente tabla se puede ver la composición del GAS NATURAL tras la combustión:

Composición de los gases y aire mínimos en la combustión de algunos combustibles gaseosos industriales

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Gas de coquería	4,48	4,02	1,11	10,60	0,49	5,82	6,31	5,12	9,14	11,87	10,45	12,87
Gas horno alto	0,73	1,53	0,48	24,79	1,29	0,95	2,24	1,57	0,57	0,74	11,21	1,74
Gas de agua azul	2,22	2,26	0,98	20,55	0,71	2,89	3,60	2,77	3,12	4,07	3,90	5,07
Gas carburado	4,51	4,37	1,03	17,15	0,86	5,86	6,72	4,84	5,24	6,81	5,62	7,81
Gas de gasógeno	1,23	1,83	0,67	18,87	1,10	1,60	2,70	2,03	1,11	1,45	1,84	2,45
Gas de Lacq	9,78	8,77	1,11	11,86	0,75	12,71	13,46	10,80	13,04	17,00	14,40	18,00
Gas natural	10,68	9,62	1,10	12,14	0,84	13,88	14,72	11,77	12,70	17,00	14,01	18,00
Gas de refinería	19,10	17,43	1,09	13,43	1,55	24,83	26,38	20,77	12,32	16,02	13,40	17,02
Gas mezcla	8,72	7,79	1,12	11,44	0,65	11,34	11,99	9,68	13,41	17,45	14,90	18,45
Gas reformado	4,20	3,87	1,08	12,19	0,60	5,46	6,06	4,89	7,00	9,10	8,32	10,10
Propano puro	23,80	21,80	1,09	13,77	2,01	30,94	32,90	125,80	11,84	15,40	12,83	16,36
Butano puro	30,94	28,44	1,09	14,07	2,60	40,22	42,82	33,44	11,90	15,47	12,86	16,47
Butano industrial	30,44	27,97	1,09	13,33	2,56	39,57	42,11	32,90	11,90	15,45	12,85	16,45

(1) Va = Nm³ aire/Nm³ gas
 (2) Vf = Nm³ humos seco/Nm³ gas
 (3) f = Va/Vf
 (4) [CO₂] máx

(5) kg/Nm³ gas
 (6) Ga = kg aire/Nm³ gas
 (7) Gh = kg humos húm./Nm³ gas
 (8) Vth = Nm³ humos húm./Nm³ gas

(9) Nm³ aire/kg gas
 (10) kg aire/kg gas
 (11) Nm³ humos húm./kg gas
 (12) kg humos húm./kg gas

A continuación, se muestra una tabla del análisis de la combustión completa del GAS NATURAL (composición del combustible):

Composicion del combustible (Nm³/Nm³): CH₄= 0.86; C₂H₆= 0.076; C₃H₈= 0.024; C₄H₁₀= 0.01; N₂=0.03

POR CIENTO		AIRE		GASES (kg/Nm ³)							GASES (Nm ³ /Nm ³)		GASES DENSIDAD		GASES ENTALPIA		
O ₂	CO+SO ₂	N ₂	EXCESO	kg/Nm ³	Nm ³ /Nm ³	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	SECOS	HUMED.	SECOS	HUMED.	kg/Nm ³	M	N
0,00	11,98	88,02	1,00	13,40	10,37	2,21	0,00	1,68	0,00	10,33	12,54	14,23	9,39	11,48	1,239	0,265	0,0000293
0,50	11,69	87,81	1,02	13,69	10,60	2,21	0,00	1,68	0,07	10,56	12,84	14,52	9,62	11,71	1,240	0,264	0,0000291
1,00	11,40	87,60	1,05	14,01	10,84	2,21	0,00	1,68	0,14	10,80	13,15	14,83	9,86	11,95	1,241	0,264	0,0000289
1,50	11,11	87,39	1,07	14,33	11,09	2,21	0,00	1,68	0,22	11,05	13,48	15,16	10,11	12,21	1,242	0,263	0,0000287
2,00	10,83	87,17	1,10	14,68	11,36	2,21	0,00	1,68	0,30	11,32	13,82	15,51	10,38	12,47	1,243	0,263	0,0000285
2,50	10,54	86,96	1,12	15,04	11,64	2,21	0,00	1,68	0,38	11,60	14,19	15,87	10,66	12,76	1,244	0,262	0,0000283
3,00	10,25	86,75	1,15	15,43	11,94	2,21	0,00	1,68	0,47	11,89	14,57	16,26	10,96	13,06	1,245	0,262	0,0000281
3,50	9,97	86,53	1,18	15,83	12,26	2,21	0,00	1,68	0,56	12,20	14,98	16,66	11,28	13,37	1,246	0,261	0,0000279
4,00	9,68	86,32	1,21	16,26	12,59	2,21	0,00	1,68	0,66	12,54	15,41	17,09	11,61	13,71	1,247	0,261	0,0000277
4,50	9,39	86,11	1,25	16,72	12,94	2,21	0,00	1,68	0,77	12,89	15,86	17,55	11,97	14,06	1,248	0,260	0,0000275
5,00	9,11	85,89	1,28	17,21	13,32	2,21	0,00	1,68	0,88	13,26	16,35	18,03	12,34	14,44	1,249	0,260	0,0000273
5,50	8,82	85,68	1,32	17,72	13,72	2,21	0,00	1,68	1,00	13,66	16,87	18,55	12,74	14,84	1,250	0,259	0,0000271
6,00	8,53	85,47	1,36	18,27	14,15	2,21	0,00	1,68	1,13	14,08	17,42	19,10	13,17	15,27	1,251	0,259	0,0000269
6,50	8,25	85,25	1,41	18,86	14,60	2,21	0,00	1,68	1,27	14,54	18,01	19,69	13,63	15,73	1,252	0,258	0,0000267
7,00	7,96	85,04	1,46	19,50	15,09	2,21	0,00	1,68	1,41	15,02	18,64	20,33	14,12	16,22	1,253	0,258	0,0000265
7,50	7,67	84,83	1,51	20,18	15,62	2,21	0,00	1,68	1,57	15,54	19,32	21,01	14,65	16,75	1,254	0,257	0,0000263
8,00	7,38	84,62	1,56	20,91	16,19	2,21	0,00	1,68	1,74	16,11	20,06	21,74	15,22	17,31	1,256	0,257	0,0000261
8,50	7,10	84,40	1,62	21,70	16,80	2,21	0,00	1,68	1,92	16,72	20,85	22,53	15,84	17,93	1,257	0,256	0,0000258
9,00	6,81	84,19	1,68	22,56	17,46	2,21	0,00	1,68	2,12	17,38	21,71	23,39	16,50	18,60	1,258	0,256	0,0000256
9,50	6,52	83,98	1,75	23,50	18,19	2,21	0,00	1,68	2,34	18,10	22,64	24,33	17,23	19,32	1,259	0,255	0,0000254
10,00	6,24	83,76	1,83	24,52	18,98	2,21	0,00	1,68	2,57	18,88	23,66	25,35	18,02	20,11	1,260	0,254	0,0000252
10,50	5,95	83,55	1,91	25,64	19,84	2,21	0,00	1,68	2,83	19,74	24,78	26,47	18,89	20,98	1,261	0,254	0,0000250
11,00	5,66	83,34	2,01	26,87	20,80	2,21	0,00	1,68	3,12	20,69	26,01	27,70	19,85	21,94	1,262	0,253	0,0000247
11,50	5,38	83,12	2,11	28,23	21,85	2,21	0,00	1,68	3,43	21,73	27,38	29,06	20,91	23,00	1,264	0,253	0,0000245
12,00	5,09	82,91	2,22	29,75	23,03	2,21	0,00	1,68	3,79	22,90	28,90	30,58	22,08	24,18	1,265	0,252	0,0000243
12,50	4,80	82,70	2,35	31,45	24,34	2,21	0,00	1,68	4,18	24,21	30,59	32,28	23,40	25,50	1,266	0,252	0,0000240
13,00	4,52	82,48	2,49	33,37	25,83	2,21	0,00	1,68	4,62	25,68	32,51	34,19	24,89	26,99	1,267	0,251	0,0000238
13,50	4,23	82,27	2,65	35,54	27,51	2,21	0,00	1,68	5,13	27,35	34,68	36,37	26,58	28,67	1,268	0,251	0,0000236
14,00	3,94	82,06	2,84	38,03	29,44	2,21	0,00	1,68	5,70	29,26	37,18	38,86	28,51	30,61	1,270	0,250	0,0000233
14,50	3,65	81,85	3,05	40,91	31,67	2,21	0,00	1,68	6,37	31,48	40,06	41,74	30,75	32,85	1,271	0,249	0,0000231
15,00	3,37	81,63	3,31	44,29	34,28	2,21	0,00	1,68	7,15	34,07	43,43	45,12	33,37	35,47	1,272	0,249	0,0000229

En la siguiente tabla se pueden ver los parámetros resultantes de la combustión del GAS NATURAL (pérdidas por calor sensible en los gases):

O ₂	CO ₂	AIRE EXCESO (POR UNO)	GASES (kg/NHR)	PERDIDAS EN GASES DE COMBUSTION (°C) EN FUNCION DE: TEMP GASES - TEMP AMBIENTE (°C)																
				100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	
0.00	11.97	1.00	14.22	4.0	4.9	5.7	6.5	7.4	8.2	9.1	9.9	10.8	11.6	12.5	13.4	14.2	15.1	16.0	16.9	
0.50	11.68	1.02	14.52	4.1	5.0	5.8	6.7	7.5	8.4	9.2	10.1	11.0	11.9	12.7	13.6	14.5	15.4	16.3	17.2	
1.00	11.40	1.04	14.83	4.2	5.1	5.9	6.8	7.7	8.5	9.4	10.3	11.2	12.1	13.0	13.9	14.8	15.7	16.6	17.5	
1.50	11.11	1.06	15.16	4.3	5.2	6.1	6.9	7.8	8.7	9.6	10.5	11.4	12.3	13.2	14.2	15.1	16.0	16.9	17.9	
2.00	10.82	1.09	15.50	4.4	5.3	6.2	7.1	8.0	8.9	9.8	10.7	11.7	12.6	13.5	14.5	15.4	16.3	17.3	18.2	
2.50	10.54	1.12	15.87	4.5	5.4	6.3	7.2	8.2	9.1	10.0	11.0	11.9	12.9	13.8	14.8	15.7	16.7	17.7	18.6	
3.00	10.25	1.15	16.25	4.6	5.5	6.5	7.4	8.3	9.3	10.3	11.2	12.2	13.1	14.1	15.1	16.1	17.1	18.0	19.0	
3.50	9.96	1.18	16.66	4.7	5.6	6.6	7.6	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.4	15.4	16.4	17.5	18.5	19.5	
4.00	9.68	1.21	17.09	4.8	5.8	6.8	7.7	8.7	9.7	10.7	11.7	12.8	13.8	14.8	15.8	16.8	17.9	18.9	19.9	
4.50	9.39	1.24	17.54	4.9	5.9	6.9	7.9	9.0	10.0	11.0	12.0	13.1	14.1	15.2	16.2	17.3	18.3	19.4	20.4	
5.00	9.10	1.28	18.03	5.0	6.1	7.1	8.1	9.2	10.2	11.3	12.3	13.4	14.5	15.5	16.6	17.7	18.8	19.9	20.9	
5.50	8.81	1.32	18.55	5.2	6.2	7.3	8.4	9.4	10.5	11.6	12.7	13.8	14.9	16.0	17.1	18.2	19.3	20.4	21.5	
6.00	8.53	1.36	19.10	5.3	6.4	7.5	8.6	9.7	10.8	11.9	13.0	14.1	15.3	16.4	17.5	18.7	19.8	20.9	22.1	
6.50	8.24	1.40	19.69	5.5	6.6	7.7	8.8	10.0	11.1	12.3	13.4	14.6	15.7	16.9	18.0	19.2	20.4	21.5	22.7	
7.00	7.95	1.45	20.32	5.6	6.8	7.9	9.1	10.3	11.4	12.6	13.8	15.0	16.2	17.4	18.6	19.8	21.0	22.2	23.4	
7.50	7.67	1.50	21.00	5.8	7.0	8.2	9.4	10.6	11.8	13.0	14.2	15.5	16.7	17.9	19.1	20.4	21.6	22.9	24.1	
8.00	7.38	1.56	21.73	6.0	7.2	8.5	9.7	10.9	12.2	13.4	14.7	16.0	17.2	18.5	19.8	21.1	22.3	23.6	24.9	
8.50	7.09	1.62	22.53	6.2	7.5	8.8	10.0	11.3	12.6	13.9	15.2	16.5	17.8	19.1	20.4	21.8	23.1	24.4	25.8	
9.00	6.81	1.68	23.39	6.4	7.8	9.1	10.4	11.7	13.1	14.4	15.7	17.1	18.5	19.8	21.2	22.6	23.9	25.3	26.7	
9.50	6.52	1.75	24.32	6.7	8.1	9.4	10.8	12.2	13.6	14.9	16.3	17.7	19.1	20.6	22.0	23.4	24.8	26.3	27.7	
10.00	6.23	1.83	25.34	7.0	8.4	9.8	11.2	12.7	14.1	15.5	17.0	18.4	19.9	21.4	22.8	24.3	25.8	27.3	28.8	
10.50	5.95	1.91	26.46	7.2	8.7	10.2	11.7	13.2	14.7	16.2	17.7	19.2	20.7	22.3	23.8	25.3	26.9	28.4	30.0	
11.00	5.66	2.00	27.69	7.6	9.1	10.7	12.2	13.8	15.3	16.9	18.5	20.1	21.7	23.3	24.9	26.5	28.1	29.7	31.3	
11.50	5.37	2.10	29.06	7.9	9.5	11.2	12.8	14.4	16.1	17.7	19.4	21.0	22.7	24.3	26.0	27.7	29.4	31.1	32.8	
12.00	5.08	2.22	30.57	8.3	10.0	11.7	13.4	15.1	16.9	18.6	20.3	22.1	23.8	25.6	27.3	29.1	30.8	32.6	34.4	
12.50	4.80	2.34	32.27	8.8	10.6	12.3	14.1	15.9	17.8	19.6	21.4	23.2	25.1	26.9	28.8	30.6	32.5	34.3	36.2	
13.00	4.51	2.49	34.19	9.3	11.2	13.0	14.9	16.9	18.8	20.7	22.6	24.5	26.5	28.4	30.4	32.4	34.3	36.3	38.3	
13.50	4.22	2.65	36.36	9.8	11.8	13.8	15.9	17.9	19.9	21.9	24.0	26.0	28.1	30.2	32.2	34.3	36.4	38.5	40.6	
14.00	3.94	2.83	38.86	10.5	12.6	14.8	16.9	19.1	21.2	23.4	25.6	27.8	30.0	32.2	34.4	36.6	38.8	41.0	43.3	
14.50	3.65	3.05	41.74	11.2	13.5	15.8	18.1	20.4	22.7	25.1	27.4	29.7	32.1	34.5	36.8	39.2	41.6	44.0	46.4	
15.00	3.36	3.30	45.11	12.1	14.6	17.1	19.5	22.0	24.5	27.0	29.6	32.1	34.6	37.1	39.7	42.3	44.8	47.4	50.0	

ANEXO III: CÁLCULO DE LA VALORACIÓN ECONÓMICA

Se ha obtenido la energía que consumen las calderas en cada caso a partir de la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{h_v - h_a}{\zeta} \cdot 1000$$

donde se obtiene Q (kJ/Tm) a partir de las entalpías de vapor saturado a 10 bar ($h_v=2778.1$ kJ/kg) y del agua a 70°C ($h_a=292.73$ kJ/kg) y del rendimiento (η). El rendimiento considerado para el caso de funcionamiento actual (según datos reales: ANEXO I) es del 75.8% en caldera 1 y del 73.5% en caldera 2 (Q real). El rendimiento óptimo alcanzable asumido para ambas calderas (Q diseño) es del 92%

Equipo	Q real KJ/Tm	Q diseño KJ/Tm	DQ KJ/Tm
<i>CALDERA 1</i>	3.278.856	2.701.492	577.363
<i>CALDERA 2</i>	3.381.460	2.701.492	679.968

De esta forma se obtendría la diferencia entre ambos valores por tonelada de vapor producido.

Teniendo en cuenta la proyección del coste estimado de la energía (gas natural) a medio plazo:

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ Termia PCS} &= 0.0189 \text{ €} \\ \text{PCI/PCS gas nat} &= 0.9 \\ 1 \text{ Termia} &= 4186 \text{ KJ} \end{aligned} \right\}$$

y la producción estimada para cada caldera así como las horas de funcionamiento diarias

$$\left. \begin{aligned} m &= 5.8 \text{ Tm/h} \\ t &= 10 \text{ h/día} \end{aligned} \right\}$$

se obtiene el coste extra en combustible diario debido a la baja eficiencia de las calderas:

$$\Delta\text{€} = \text{DQ} \cdot m \cdot t$$

Equipo	DQ (€/Tm)	Δ€ (€/día)
<i>CALDERA 1</i>	2.90	168.20
<i>CALDERA 2</i>	3.42	198.36
<i>Total:</i>		336.56