

## **Costo de la energía eléctrica generada con turbinas de extracción de vapor, considerando solo el consumo de combustible**

Una gran cantidad de Industrias tales como Fábricas de Papel, Refinerías de Azúcar, Fábricas de Jabón, Plantas de Refinación de Aceites, Industrias Textiles, etc., requieren considerables cantidades de calor para sus procesos de fabricación o para objetivos de calefacción. Este calor es usualmente obtenido en forma económica por la condensación de vapor de relativamente baja presión. El vapor tiene la ventaja de que a una presión dada corresponde una temperatura definida de saturación, lo que permite regular exactamente la temperatura de los procesos y aplicaciones de calefacción, independientemente del consumo de calor, por la simple mantención de la presión del vapor.

El vapor de baja presión requerido en los procesos puede obtenerse en las siguientes formas:

a) Por generación directa en calderas de baja presión.

b) Por expansión de vapor de alta presión en turbinas de extracción o contrapresión.

c) Por expansión de vapor de alta presión en válvulas reductoras de presión.

El primer método es antieconómico porque las calderas de baja presión tienen un rendimiento comparativamente bajo y porque no hay posibilidad de combinar la generación de vapor con la producción de energía eléctrica.

Si se emplean, en cambio, calderas modernas de alta presión, cuyo rendimiento es del orden del 80%, y el vapor de proceso es expandido en una Turbina de contrapresión o de extracción, se alcanza la más alta economía posible de operación, porque la energía así generada en dichas turbinas es obtenida al costo de un consumo adicional de calor que es alrededor de un 30% del requerido para su producción en una Turbina Standard de condensación. La razón de ello es que en esta última sólo un 30% del calor total del vapor es convertido en energía mecánica y el resto se pierde en el agua de circulación del condensador. En las turbinas de extracción o contrapresión éste calor es aprovechado en los procesos antes mencionados.

El tercer método tiene dos ventajas: el alto rendimiento en la reducción de la presión, ya que es posible realizarla prácticamente casi sin pérdida, y el aumento

de la cifra de vaporización, producido por el enfriamiento a que debe someterse el vapor de baja presión desde la temperatura de recalentamiento hasta la de utilización.

La combinación de la válvula de reducción con una turbina de extracción tiene la gran ventaja de la flexibilidad en la operación de industrias que disponen también de otras fuentes de energía (hidroeléctrica, grupos electrógenos, interconexión con redes de servicio público). En efecto, según sean las condiciones de las demandas de energía eléctrica y de vapor, se tienen las siguientes posibilidades, independientes o combinadas, para mantenerlas: expandir parcial o totalmente el vapor de proceso en la válvula de reducción; generar energía térmica en extracción total, en condensación total o mixta, y utilizar las otras fuentes de energía.

Considerando que en las turbinas del tipo de extracción, cuando operan con todo el vapor nominalmente extraído, fluye siempre una pequeña cantidad de vapor a través de la parte de baja presión al condensador, para evitar calentamientos excesivos de esta parte de la turbina (cooling steam), el costo de la energía eléctrica generada en turbinas de extracción que operan en instalaciones como la mencionada, tomando en cuenta sólo el ítem combustible, será el de la diferencia entre el combustible que se requiere para obtener el vapor de proceso en la operación de expandirlo en la válvula de reducción y el requerido en la de extraerlo totalmente de la turbina, generándose la correspondiente energía eléctrica.

Analizaremos a continuación, como un caso particular, el costo de esta energía en la instalación que posee la Cía. Manufacturera de Papeles y Cartones en su fábrica en Puente Alto, cuyo circuito de vapor y agua y sus estados característicos se muestran esquemáticamente en el diagrama N.º 1.

1.º Combustible empleado: mezcla de 85% de carboncillo de mina (Lota o Schwager) y 15% de coke.

2.º Vaporización media en las calderas: 7 kgs. de vapor por kg. de combustible, o sea, 1 kg. de vapor de alta presión se genera con 0,143 kgs. de combustible.

3.º Rendimiento del combustible:

$$1 \text{ kg. de combustible} = (770 - 100) / 7 = 4690 \text{ calorías}$$

4.º Aumento de peso del vapor de alta presión al expandirse en la válvula de reducción, después de enfriado a la temperatura de proceso:

$$770 + 70x = (1+x) 670$$

de donde

$$x = 0,167$$

o sea que 1 ton. de vapor de alta presión se convierte en 1,167 ton/hora de vapor de proceso al expandirse en la válvula, después del enfriamiento correspondiente.

5.º Aumento de peso del vapor de alta presión al expandirse en la turbina, después del enfriamiento correspondiente:

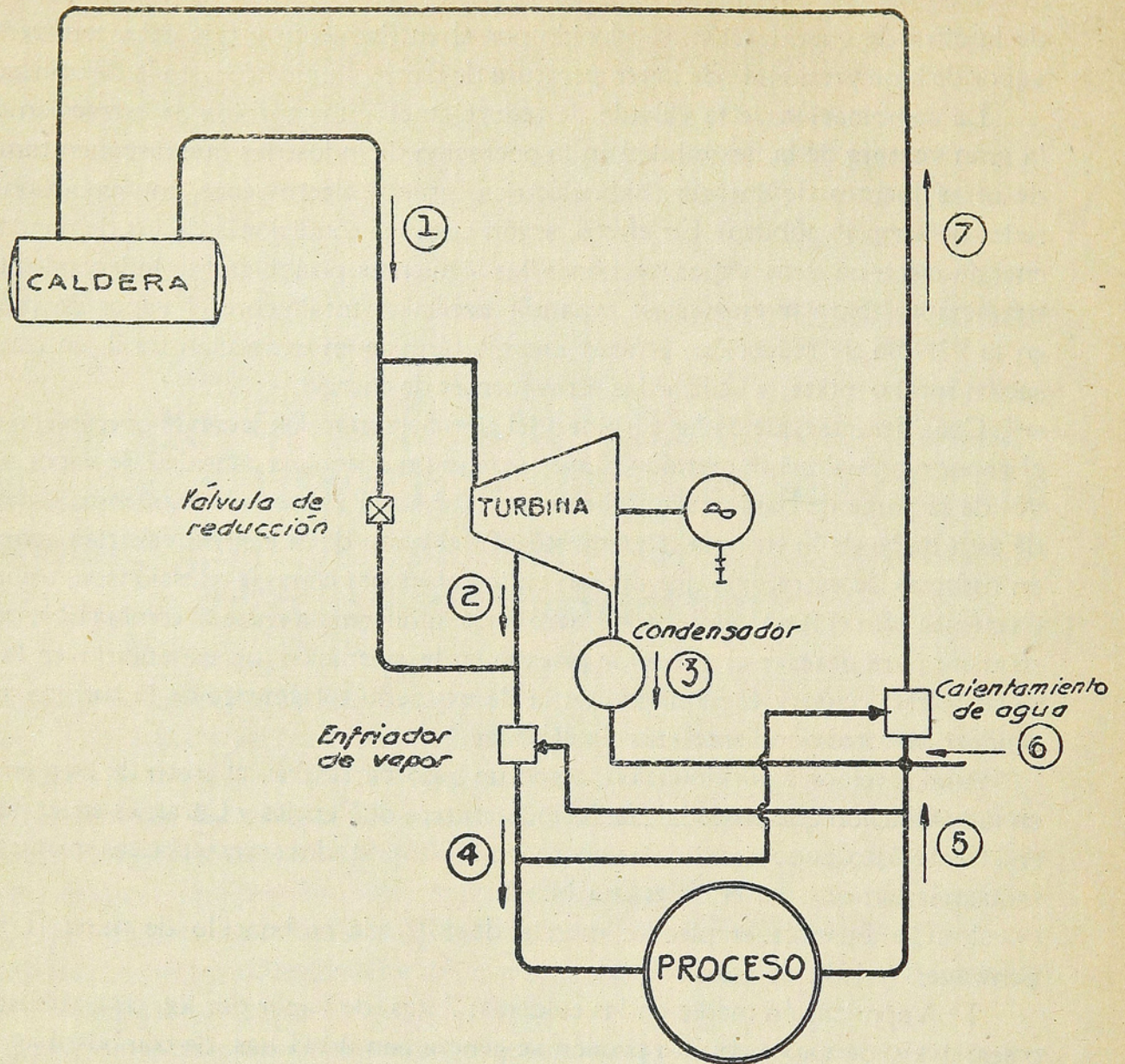
$$695 + 70 x = (1+x) 670$$

de donde

$$x = 0,042$$

o sea que una ton. de vapor de alta presión se convierte en 1,042 ton. de vapor de proceso.

# Diagrama N° 1



## LEYENDA

### 1.- VAPOR DE CALDERA

Presión absol. 50 atm.  
Temperatura 400°C.  
Entalpia 770 cal./kg.

### 2.- VAPOR DE SANGRIA

Presión absol. 3,5 atm.  
Temperatura 230°C.  
Entalpia 695 cal./kg.

### 3.- VAPOR A. CONDENSACION

Presión absol. 0.02 atm.  
Temperatura 18°C.  
Entalpia 603 cal./kg.

### 4.- VAPOR ENFRIADO AL PROCESO

Presión absol. 3.5 atm.  
Temperatura 180°C.  
Entalpia 670 cal./kg.

### 5.- AGUA CONDENSADA DEL PROCESO

La cantidad devuelta a la temperatura de 70°C., es aproximadamente, un 70% del vapor respectivo generado para el consumo de Proceso

### 6.- AGUA FRESCA DE ALIMENTACION

La cantidad aproximada inyectada, con una temperatura media de 12°C., es un 30% del vapor para el consumo del Proceso.

### 7.- AGUA DE ALIMENTACION DE CALDERAS

Temperatura 100°C.

6.º Costo del combustible: \$ 220 por ton. de mezcla.

7.º Características del Turboalternador:

Turbina de extracción y condensación Siemens-Röder

Temperatura del vapor de admisión: 375°C

Presión de admisión: 29 atm.

Presión de extracción: 3,5 atm.

Potencia: 5,200 KW.      3,000 r. p. m.

Las curvas del gráfico N.º 2 indican las características de funcionamiento de la turbina:

Curva ABCDE: Funcionamiento en extracción total con dos ton/hora de vapor a condensación.

Puntos B, C, D y E: Vapor de extracción para diferentes consumos de vapor de proceso.

Curvas BB', CC', DD' y EE': Funcionamiento en extracción y condensación (mixto).

En el cuadro N.º 1 se han calculado los respectivos consumos de combustible y el costo resultante de la energía eléctrica, para diferentes consumos de vapor de proceso. Con los resultados obtenidos se ha trazado la curva ABCDE del gráfico N.º 3, o sea, esta curva representa la función costo de energía eléctrica generada en la turbina trabajando ésta totalmente en extracción.

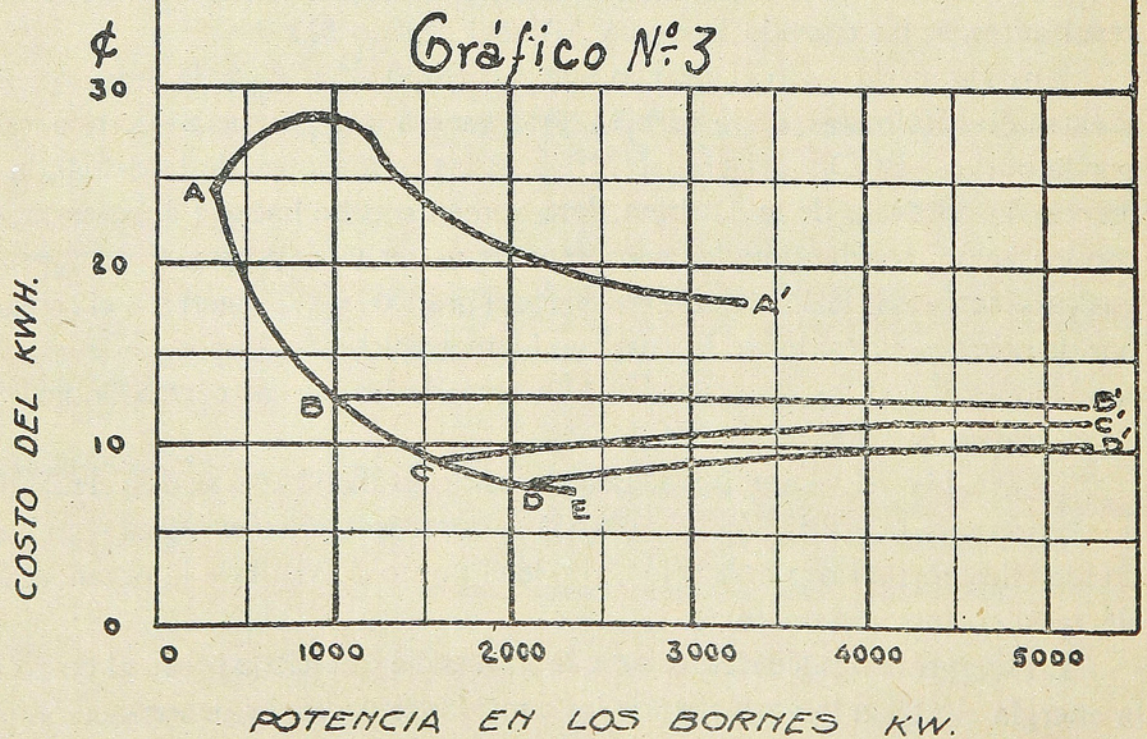
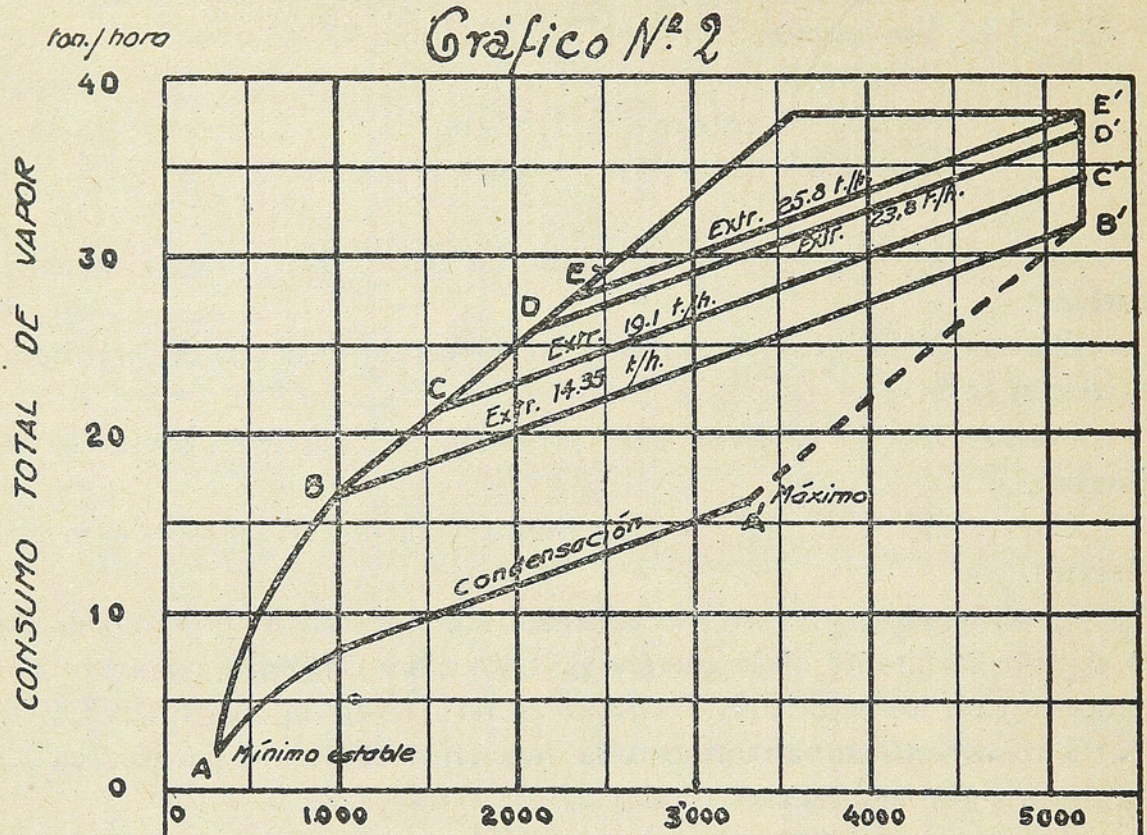
*Energía de Condensación.*—La potencia mínima estable de la turbina es de 300 KW., con la que su consumo es de 2 ton/hora de vapor a condensación. La característica de consumo de vapor está dada por la curva AA' del gráfico N.º 2. La potencia máxima en condensación, limitada por la capacidad del condensador es de 3,300 KW. En el cuadro N.º 2 se han calculado los costos de la energía generada en condensación, deducidos de los respectivos consumos de vapor y combustible. Con los costos resultantes se ha trazado la curva AA' del gráfico N.º 3.

*Energía mixta.*—En el caso en que el consumo de vapor de proceso sea constante y extraído totalmente de la turbina, ésta genera una potencia eléctrica condicionada por la curva ABCDE del gráfico N.º 2; si las condiciones de la demanda exigen aumentar la potencia de la Turbina, éste aumento debe hacerse a expensas de vapor a condensación, regulándose los consumos de vapor y las potencias conforme a las curvas características BB', CC' DD' o EE' del gráfico N.º 2, según sea el consumo de vapor de proceso extraído de la turbina. Hemos calculado los costos de energía en estas condiciones y con los resultados se han trazado las curvas correspondientes de costo en el gráfico N.º 3.

*Conclusión.*—Del análisis de las curvas del gráfico N.º 3 se desprende la economía que representa la utilización de turbinas de contrapresión o extracción en las industrias donde ellas encuentran aplicación, desde el punto de vista de la obtención de energía eléctrica en forma económica.

En ese gráfico puede apreciarse la influencia que tiene sobre el costo unitario de la energía eléctrica la variación de las cantidades de vapor de extracción y condensación. En efecto, supongamos que la demanda de potencia es de 3,300 KW., o sea, la potencia máxima que es capaz de suministrar el Turbo trabajando sólo en condensa-

# CARACTERISTICAS DE LA TURBINA Y COSTOS DEL KWH.



Observ. - En este costo solo se considera el ítem combustible.

ción. Si esta potencia es generada totalmente en condensación, se tiene un costo de 17,6 centavos por KWH. Ahora bien, si esta misma potencia es generada extrayendo de la máquina cantidades crecientes de vapor, equivalentes a consumos de vapor de proceso de 15, 20 y 25 ton/hora, el costo disminuye a 12,5, 11 y 9,5 centavos por KWH respectivamente. Por otra parte, puede observarse que para una cantidad de extracción determinada, 19,1 ton/hora por ejemplo (equivalentes a un consumo de vapor de proceso de 20 ton/hora), el costo disminuye al disminuir la potencia eléctrica exigida al Turbo, de 11 centavos por KWH. para 3,300 KW. a 8,6 centavos por KWH. para 1,550 KW., lo que se debe a que al disminuir el vapor a condensación aumenta el porcentaje del vapor total absorbido por la Turbina que se extrae en sangría y que se aprovecha en el proceso. De esto se deduce que hay una compensación favorable entre el descenso del rendimiento del Turboalternador al disminuir la carga y el hecho del mejor aprovechamiento del vapor en el sistema Turbina-Proceso.

Por último, se ve que al trabajar la Turbina entre 4,000 KW. y su potencia máxima, el costo del KWH. se mantiene prácticamente constante en el valor correspondiente según sea la cantidad de vapor extraída, es decir, en 12,5 cent. para 15 ton/hora de consumo, 11,5 cent. para 20 ton/hora y 10 cent. para 25 ton/hora. Esto se explica por el hecho de que para 4,000 KW. de potencia y para 20 ton/hora de vapor de consumo por ejemplo, la Turbina absorbe 30 ton/hora de vapor total, de los cuales 10,9 ton/hora van a condensación, o sea, un 36% del vapor total; al aumentar la potencia a 5,200 KW. este porcentaje sube a 44%, lo que debería incrementar el costo, pero que se compensa con el mejoramiento del rendimiento del Turboalternador al aumentar su potencia.

**Cuadro No. 1.—Consumos de combustible y costo resultante del K. W. H.**

Caso I.—Expansión del vapor de proceso en la válvula de reducción.		Caso II.—Expansión del vapor de proceso en la Turbina. (Se genera la correspondiente energía eléctrica).		Costo Energía Eléctrica	
	Consumo de vapor de proceso kgs/hora				
A	Vapor de caldera para producir el vapor de proceso $\frac{A}{1,167}$ kgs/hora	G	Vapor de caldera para producir el vapor de proceso $\frac{A}{1,042}$ kgs/hora	P	Combustible con cargo a energía eléctrica O—F kgs/hora
B	Combustible para producir el vapor de caldera $0,143 \times B$ kgs/hora	H	Vapor de condensación en la Turbina (1) kgs/hora	Q	Idem por K. W. H. $\frac{P}{J}$ kgs.
C	Idem para elevar la temp. de 70 a 100°C del agua condensada de vuelta por el proceso $\frac{0,7B(100-70)}{4690}$ Kgs/hora	I	Vapor total generado en calderas G+H kgs/hora	R	Costo del K. W. H. $0,22Q$ \$
D	Idem para elevar la temp. de 12 a 100°C del agua fresca agregada $\frac{0,3B(100-12)}{4690}$ kgs./hora	J	Potencia en el alternador para los consumos del item I K.W.		
E	Consumo total de combustible C+D+E kgs/hora	K	Combustible para generar el vapor de caldera $0,143 I$ kgs/hora		
F	Vapor de caldera para producir el vapor de proceso $\frac{A}{1,042}$ kgs/hora	L	Idem para elevar la temp. de 70 a 100°C del agua condensada de vuelta por el proceso $\frac{0,7G(100-70)}{4690}$ kgs/hora		
G	Vapor de condensación en la Turbina (1) kgs/hora	M	Idem para elevar la temp. de 12 a 100°C del agua fresca agregada $\frac{0,3G(100-12)}{4690}$ kgs/hota		
H	Vapor total generado en calderas G+H kgs/hora	N	Idem para elevar la temperatura de 18 a 100°C de agua condensada proveniente del condensador $\frac{H. (100-18)}{4690}$ kgs/hora		
I	Potencia en el alternador para los consumos del item I K.W.	O	Consumo total de combustible K+L+M+N kgs/hora		
J	Combustible para generar el vapor de caldera $0,143 I$ kgs/hora	P	Combustible con cargo a energía eléctrica O—F kgs/hora		
K	Idem para elevar la temp. de 70 a 100°C del agua condensada de vuelta por el proceso $\frac{0,7G(100-70)}{4690}$ kgs/hora	Q	Idem por K. W. H. $\frac{P}{J}$ kgs.		
L	Idem para elevar la temp. de 12 a 100°C del agua fresca agregada $\frac{0,3G(100-12)}{4690}$ kgs/hota	R	Costo del K. W. H. $0,22Q$ \$		
M	Idem para elevar la temperatura de 18 a 100°C de agua condensada proveniente del condensador $\frac{H. (100-18)}{4690}$ kgs/hora				
N	Consumo total de combustible K+L+M+N kgs/hora				
O	Combustible con cargo a energía eléctrica O—F kgs/hora				
P	Idem por K. W. H. $\frac{P}{J}$ kgs.				
Q	Costo del K. W. H. $0,22Q$ \$				

(1) Vapor de enfriamiento de la baja presión de la Turbina.

**Cuadro No. 2.—Costo de energía de condensación]**

A	B	C	D	E	F	G
Potencia en los bornes del turbo alternador K. W.	Consumo de vapor de caldera kgs/hora	Combustible requerido para generar el vapor de calderas: 0,143 B kgs/hora	Idem para elevar la temperatura de 18° a 100°C del agua condensada del condensador: B (100-18) 4690 kgs/hora	Consumo total de combustible C+D kgs/hora	Consumo de combustible por K. W. H. $\frac{E}{A}$ kgs.	Costo del K. W. H. 0.22F \$
300 (mínima)	2.000	286	35	321	1.070	0.236
1.000	8.000	1.140	140	1.280	1.280	0.282
1.550	10.000	1.430	175	1.605	1.035	0.227
2.080	12.000	1.720	208	1.928	0.930	0.205
2.300	12.750	1.820	221	2.041	0.888	0.196
3.000	15.250	2.180	265	2.445	0.816	0.180
3.300 (máxima)	16.250	2.330	288	2.618	0.800	0.176