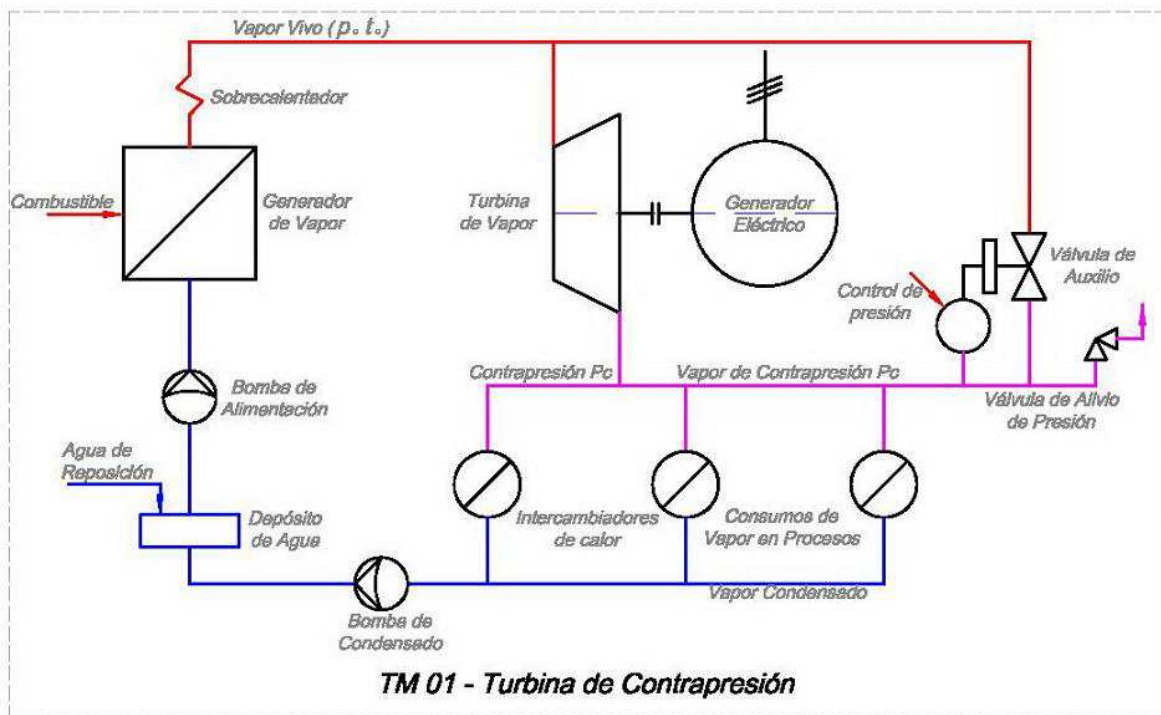


## TURBINAS INDUSTRIALES PARA COGENERACIÓN DE FUERZA MOTRIZ Y VAPOR PARA PROCESOS DE CALEFACCIÓN

Se llama Cogeneración, a la generación simultánea de Fuerza Motriz (o Energía Eléctrica) y vapor para procesos de calefacción y/o cocción. Se emplean Turbinas de Vapor de contrapresión o de extracción con cuerpo de condensación, para el accionamiento de generadores eléctricos, molinos, bombas centrífugas, ventiladores, compresores, etc. El vapor de escape o de extracción se usa en intercambiadores de calor: calentadores, evaporadores, columnas destiladoras, digestores, cocimiento, etc.



El esquema **TM 01**, muestra una instalación simple de un sistema de cogeneración: generador de vapor, turbina de vapor de contrapresión para el accionamiento de un generador eléctrico y vapor de escape para los intercambiadores de calor, bomba de condensado, depósito de agua, bomba de alimentación y válvulas de vapor de auxilio y de alivio. Se supone que la energía eléctrica generada, es la necesaria para los accionamientos electro-mecánicos e iluminación de la fábrica.

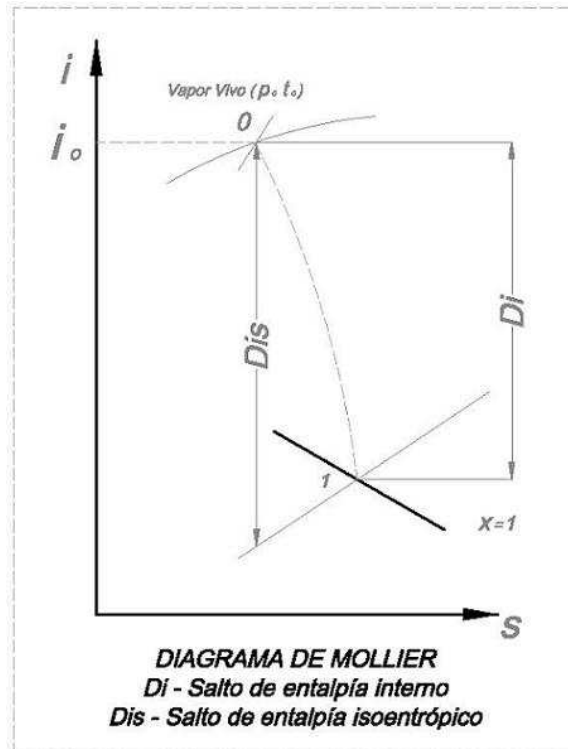
En caso de emplear otras TV para accionamientos mecánicos, se instalan en paralelo con la del esquema. La selección de las TV debe ser hecha de manera que se cumplan los balances energéticos y de masas; o sea que el consumo de vapor (kg/h) de las TV debe ser el necesario para la generación de la potencia (kW) y el vapor de escape satisfaga las necesidades de los procesos de calefacción. La potencia interna de la TV y el caudal de vapor están relacionados por la siguiente expresión:

$$N_i = G_v \cdot \Delta i / 860 \quad (\text{kW})$$

Potencia interna  $N_i = N_{efectiva} / \eta_e$

Caudal de vapor  $G_v$  en kg/h y Salto interno de entalpías  $\Delta i$  en kcal/kg

O sea que con  $G_v$  y  $N_i$  definidos, resulta el salto de entalpía necesario para la TV y con las condiciones del vapor (saturado seco) en el escape, se determinan presión y temperatura del vapor vivo (**Ver esquema del diagrama  $i - s$** )

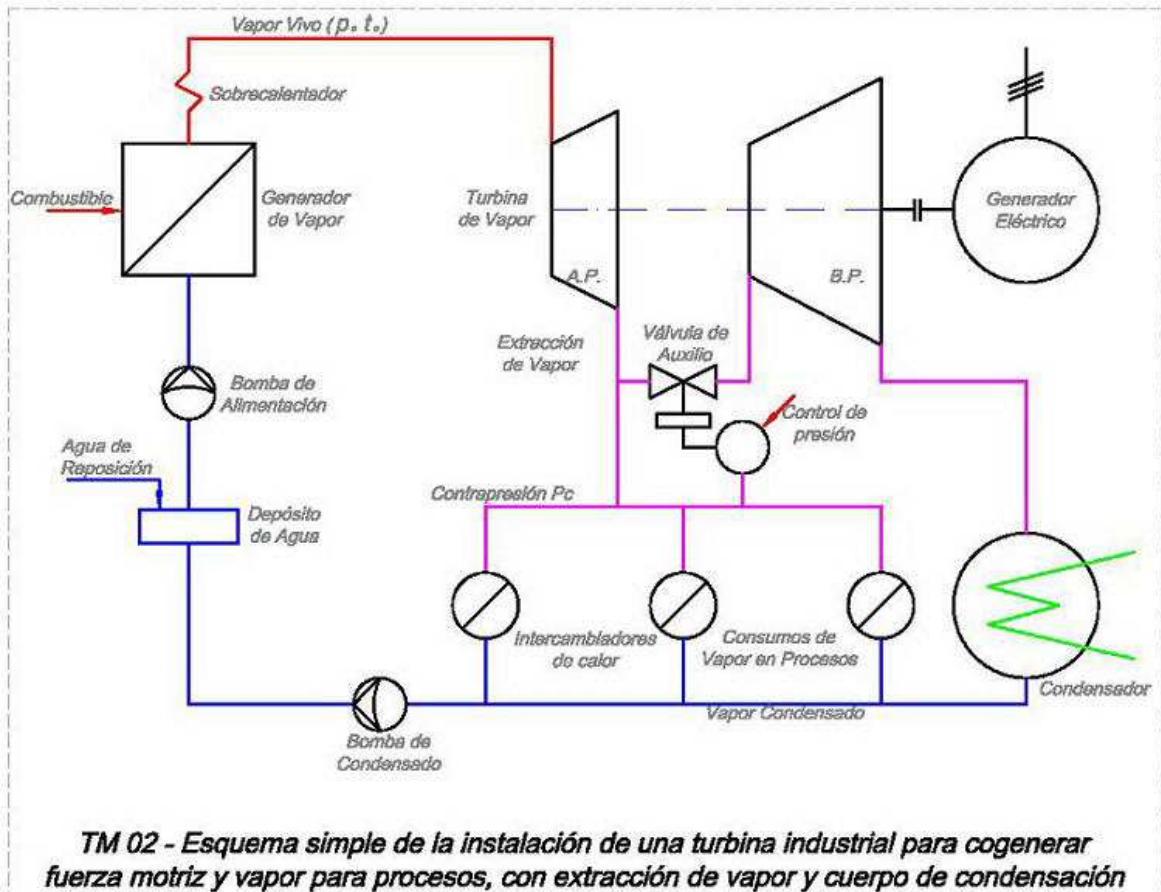


La eficiencia termodinámica de este proceso es máxima, cuando se cumplen plenamente las condiciones de diseño de la instalación, o sea que las válvulas de auxilio y alivio permanecen cerradas. Esta condición es muy difícil de obtener, debido a las intermitencias de los procesos y se procura por medio de controles automáticos mantener constantes las presiones de vapor vivo y de escape.

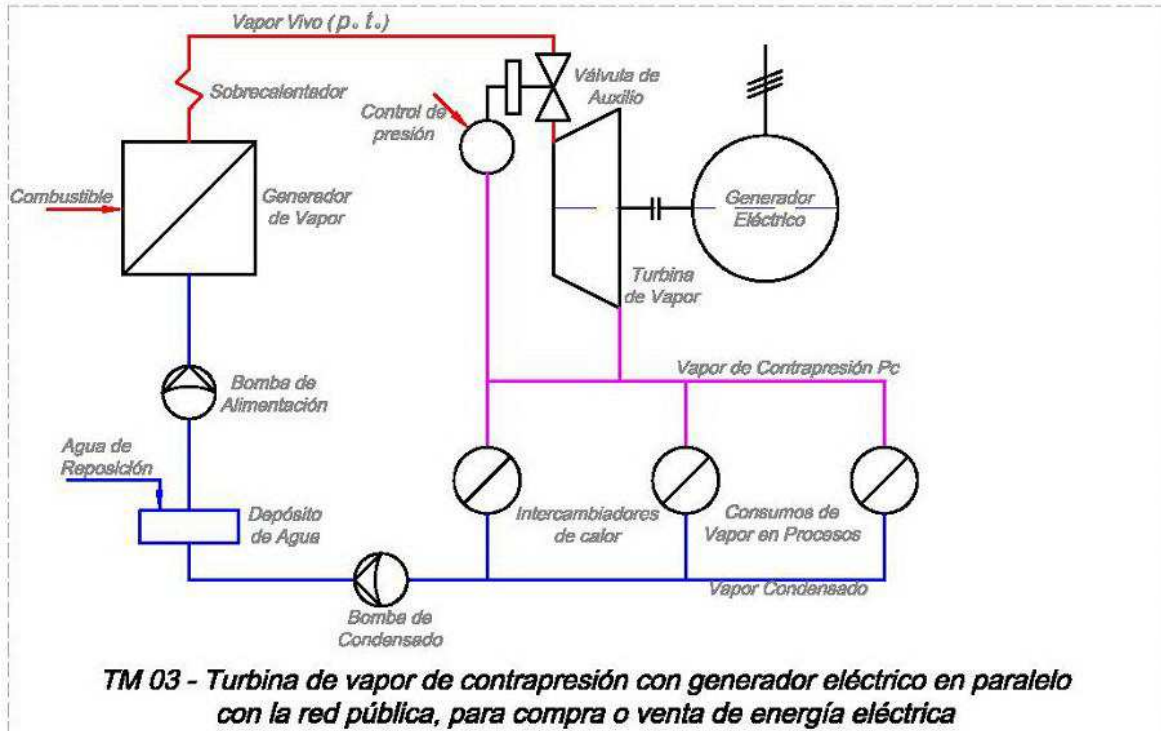
Si los procesos de calefacción necesitan mayor cantidad de vapor que el escape de la TV, el controlador de presión hace abrir la válvula de auxilio. La laminación del vapor con aumento de entropía, es una pérdida de exergía. En caso contrario, si sobra vapor de escape, para evitar la suba de la presión, abre la válvula de alivio para soplar vapor a la atmósfera. Se pierde la exergía del vapor y es necesario reponer agua fría y tratada químicamente para alimentar la caldera.

Una instalación más eficiente, evitando la laminación de vapor y el soplado a la atmósfera es con TV con extracción regulada de vapor para procesos de calefacción y un cuerpo de condensación; ver el esquema **TM 02** y el diagrama de consumos de vapor y extracciones para procesos en función de la carga de la TV. Cuando la fábrica requiere más vapor para procesos, el controlador de presión hace cerrar parcialmente la válvula de vapor al cuerpo de BP, aumenta la extracción y el sistema de regulación de las rotaciones abre más la válvula de

admisión para compensar la mayor extracción y mantener la carga de la TV. Ante un aumento de la extracción, el incremento del consumo de vapor vivo es menor. **(Ver apuntes de clases)**. La válvula intermedia no debe cerrar totalmente el paso de vapor hacia el cuerpo de baja presión; siempre debe pasar un caudal de vapor suficiente para mantenerlo caliente y evitar condensaciones excesivas en las últimas etapas.



Otra posibilidad es la instalación que muestra el esquema **TM 03**. Turbina con generador eléctrico acoplado a la red pública, con la posibilidad de vender o comprar energía eléctrica conforme a las necesidades de la fábrica. El consumo de vapor de la turbina se regula con la válvula de admisión en función de la presión de escape que depende de las necesidades de vapor en el proceso de fabricación. La velocidad del turbogenerador se sincroniza con la frecuencia de la red. La generación de Energía Eléctrica es condicionada por la necesidad de vapor en los procesos de calefacción.



Con los esquemas **TM 01** y **TM 02** aumenta el vapor para procesos con una mayor demanda de energía eléctrica y con el esquema **TM 03** disminuye.

En complejos industriales compuestos de fábricas de azúcar, de alcohol o de papel, la relación entre los consumos de vapor para procesos y de energía es muy diferente, como por ejemplo:

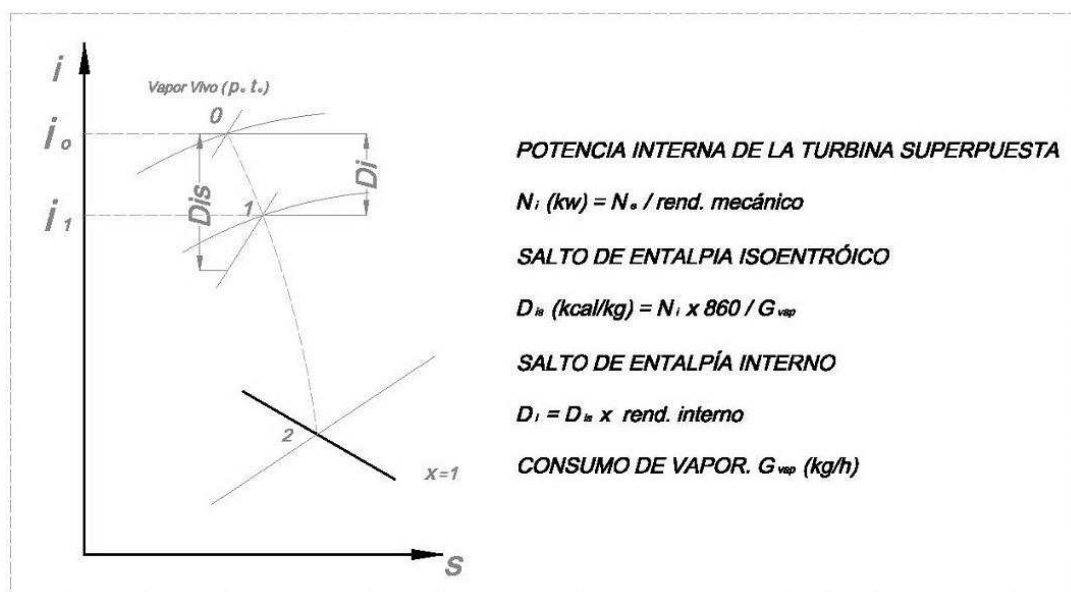
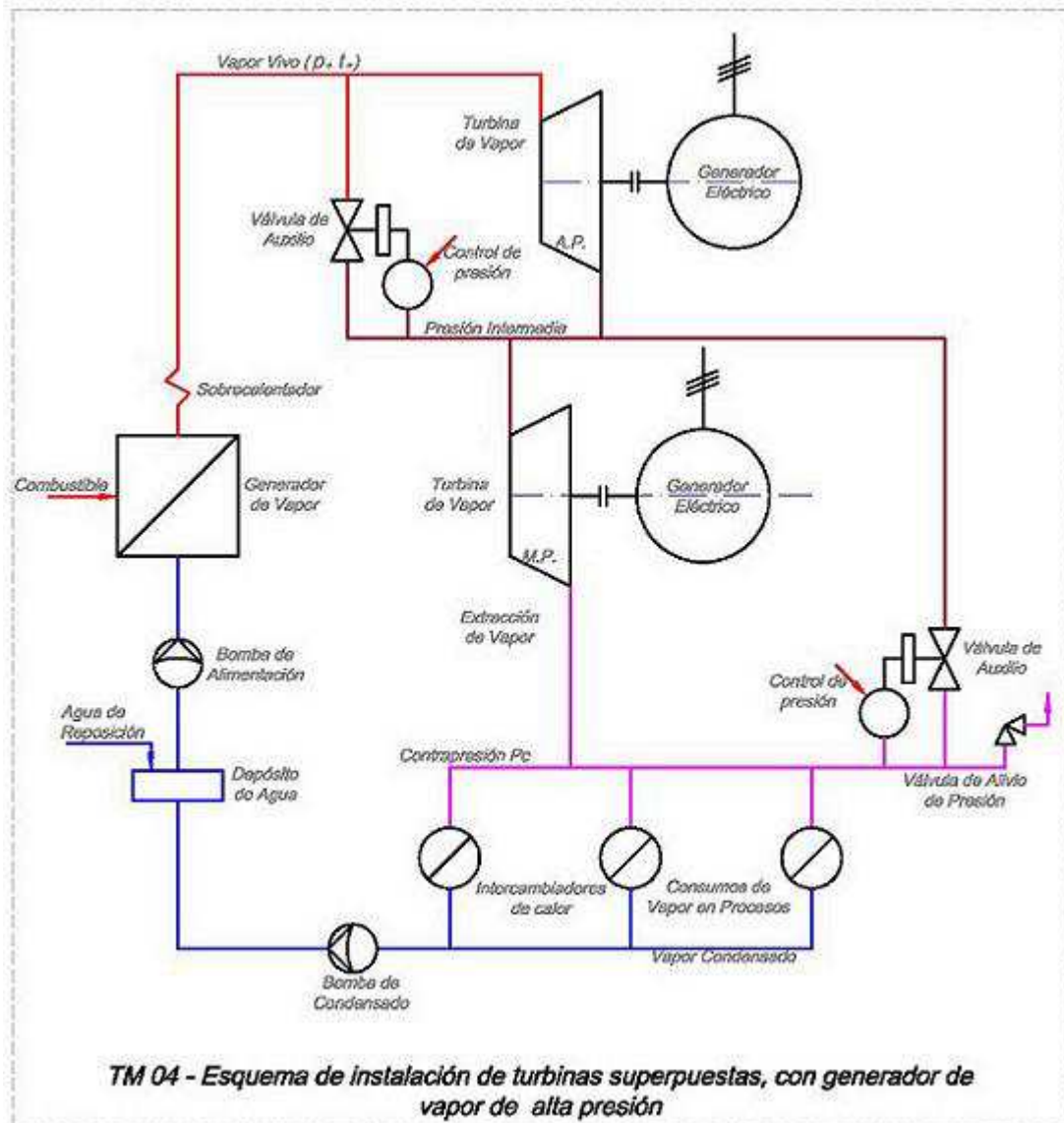
- 20 kg/kwh en la fábrica de azúcar
- 160 kg/kwh en una destilería de alcohol
- 6 kg/kwh en una fábrica de papel con planta electrolítica y elaboración de productos químicos

Esto define el tipo de turbina que sería más conveniente según el consumo de vapor:

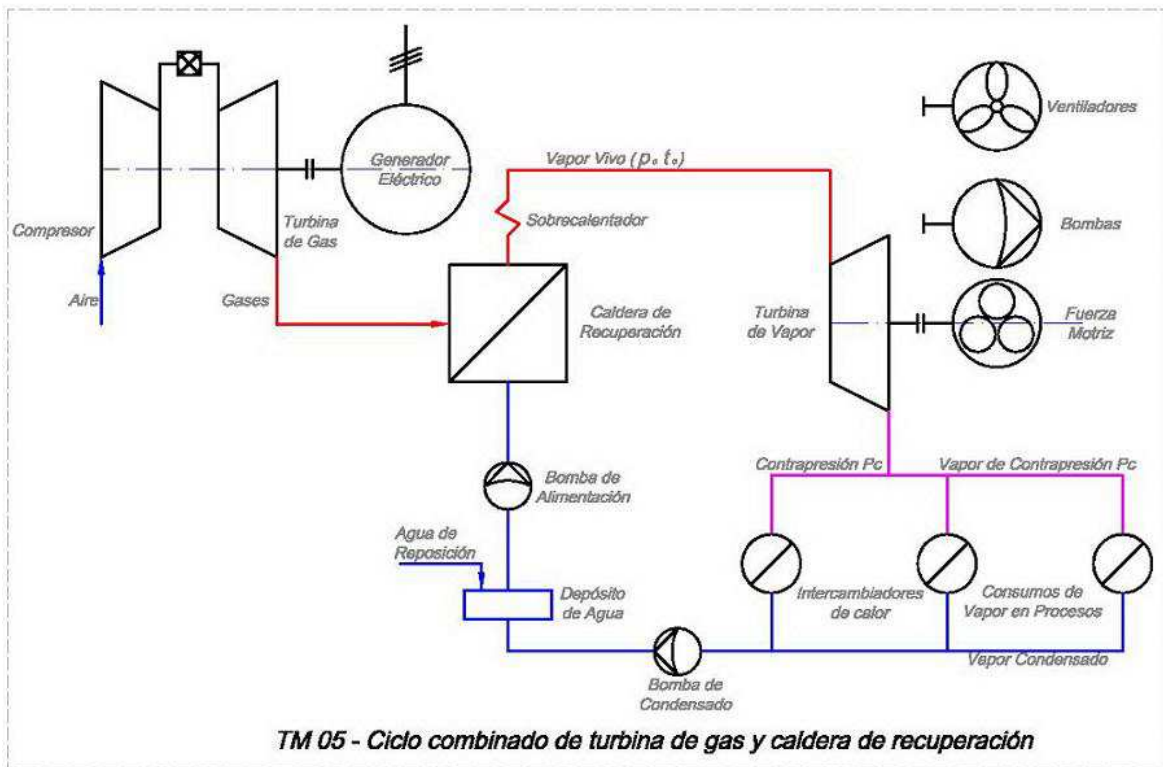
- hasta 6 kg/kwh con turbinas de condensación con extracción de vapor reducida
- 6 a 8 kg/kwh con turbinas de extracción con condensación reducida
- 8 a 20 kg/kwh con turbinas de contrapresión y rendimientos medios
- 20 a 50 kg/kwh con turbinas de contrapresión (bajos rendimientos) y venta de energía eléctrica excedente.

Es obvio que la generación de energía eléctrica, combinada con vapor para procesos, mediante turbinas de contrapresión, es más económica y que las fábricas con grandes consumos de energía eléctrica y vapor para procesos, deben asociarse para reducir en lo posible el uso de la condensación y la laminación de vapor en válvulas reductoras de presión.

Otra posibilidad de aumentar la generación de energía eléctrica, con el mismo consumo de vapor, es la TV superpuesta como se ve en el esquema **TM 04**.



Otra posibilidad es una instalación con ciclo combinado de Turbinas de Gas y Vapor como muestra el esquema **TM 05**.



## TURBINAS INDUSTRIALES: PRORRATEO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE AL PRODUCIR ENERGÍA ELÉCTRICA Y VAPOR PARA PROCESOS FABRILES

Ref. Artículo de igual nombre publicado en la Revista "Mecanica klan" 1983, por el Dr. Ing. Carlos José Haug

Cuando en un complejo industrial se elaboran diferentes productos con una relación muy diferente entre la demanda de vapor y el consumo de energía eléctrica se presenta el problema de prorratear el consumo de combustible y su costo entre los productos elaborados. Aun cuando se elabore un solo producto resulta difícil y hasta imposible contestar la clásica pregunta que dirige anualmente la Secretaría de Energía a las industrias con fines de estadística, sobre el consumo de combustible para producir un kWh, cuando el vapor que pasó por turbinas de contrapresión es usado para procesos en la fábrica.

Los esquemas de la hoja que sigue ilustran mejor el problema.

- El **esquema (A)** se refiere a la producción de energía eléctrica con una turbina de condensación sin aprovechamiento de su vapor de escape que tiene solamente una temperatura de 30 a 40 °C.
- El **esquema (B) (ver TM 02)** son extraídas de una etapa intermedia de la turbina 12 tn/h de vapor de 3,5 ata, pero el consumo de vapor de la turbina aumentó en sólo 6 tn/h para mantener la misma potencia eléctrica de 10.000 kW. Esto no debe sorprender, pues con 6 t/h más de vapor que trabaja en los cuerpos  $C_1$  y  $C_2$  se compensa la disminución del trabajo por las 6 tn/h menos en el cuerpo  $C_3$  de la turbina.

Es evidente que con el esquema (B) se ha logrado un mejor aprovechamiento del combustible, que llega a su valor máximo cuando todo el vapor que trabajó en la turbina es usado después en procesos fabriles según el **esquema (C) (ver TM 01)**. En este caso la turbina es netamente de contrapresión. El diagrama i-s (entalpía-entropía) indica el cambio de estado del vapor durante su expansión en las turbinas y permite calcular el consumo de combustible para los diferentes casos. Para gas natural de 8600 kcal/m<sup>3</sup>n y un rendimiento de caldera de 90% obtenemos los siguientes consumos diarios de gas:

a) Producción combinada de 10.000 kw y 90.000 kg vapor/h: 188.930 Nm<sup>3</sup> / día

$$90000 \times (777 - 100) / 8.600 \times 0,90 = 188930 \text{ Nm}^3 / \text{día}$$

$$\text{Consumo específico de vapor: } 90.000 / 10.000 = 9 \text{ kg/kwh}$$

b) Producción separada de 10.000 kw (con el esquema "A"): 91.390 Nm<sup>3</sup> / día

$$40.000 \times (777 - 40) \times 24 / 8.600 \times 0,90 = 91.400 \text{ Nm}^3 / \text{día}$$

$$\text{Consumo específico de vapor: } 40.000 / 10.000 = 4 \text{ kg/kwh}$$

c) Producción separada de 90.000 kg de vapor/h de 3,5 ata, saturado: 161.860 Nm<sup>3</sup> / día

$$90.000 \times (680 - 100) \times 24 / 8.600 \times 0,90 = 161.860 \text{ Nm}^3 / \text{día}$$

La suma de los consumos de los casos b y c es:  $253.250 \text{ Nm}^3/\text{día}$ , o sea que con la producción combinada de energía eléctrica y vapor para procesos fabriles (caso a), resulta una economía en el consumo de gas natural de  $64.320 \text{ Nm}^3/\text{día}$ . Se debe establecer un método para prorratear esta economía entre la producción de energía eléctrica y fuerza motriz y la producción de vapor para procesos de calefacción.

Este prorrateo se podría hacer sobre la base de calorías con el siguiente razonamiento erróneo: en el caso a, los 9 kg de vapor trabajan en la turbina para producir 1 kwh cediendo solamente:

$$(777 - 680) \times 9 = 873 \text{ kcal /kwh}$$

y entregando a procesos fabriles :  $9 \times 680 = 6120 \text{ kcal/kwh}$

O sea que con este método se obtendría un kwh muy barato puesto que el rendimiento térmico sería muy elevado:

$$860 / 873 = 0,985!!!$$

El vapor para procesos sería muy caro.

Otro método prorratea los consumos de combustibles a base de la exergía del vapor, lo que en vez de abaratar el kwh, lo hace muy costoso. Debe tomarse en cuenta que el vapor destinado a procesos fabriles no es usado para producir energía eléctrica ni fuerza motriz, sino para transmitir calor en procesos de calentamiento o de evaporación de líquidos donde también se precisa la anergía.

Descartando ambos métodos de prorrateo se puede aplicar un método más lógico. Con referencia a la economía citada de  $64.320 \text{ m}^3/\text{día}$  de gas natural, se debe hacer participar ambos, el vapor para procesos y los kwh, en la disminución del consumo de gas. Para la producción individual de vapor se consumen:

$$1.000 \times (680 - 100) / 860 \times 0,90 = 75 \text{ nm}^3 \text{ de gas} / 1000 \text{ kg de vapor}$$

y para la producción individual de un kwh según el esquema (A) con condensación:

$$4 \times (777-40) / 8.000 \times 0,90 = 0,38 \text{ nm}^3/\text{kwh}$$

Por haberse reducido el consumo de gas de  $253.250$  a  $188.930 \text{ m}^3/\text{día}$  debido a la producción combinada, puede reducirse el consumo de gas por tonelada de vapor para procesos y por kwh en la relación:

$$188.930 / 253.250 = 0,746$$

resultando un consumo de:  $75 \times 0,746 = 56 \text{ Nm}^3 / \text{tn}_\text{de vapor}$  y,

$0,38 \times 0,746 = 0,28 \text{ Nm}^3/\text{kwh}$ , o sea con un rendimiento térmico de  $860 / 0,28 \times 8600 = 0,351$  que supera el rendimiento exergético de muchas centrales de vapor.



**NOTAS:** Este método de prorrateo del combustible consumido, no es apropiado para determinar el precio del kWh generado en un sistema de cogeneración, con eventual venta de la energía eléctrica excedente; dicho precio depende de otros factores como ser amortización de equipos, tipo y origen de los combustibles empleados, personal, mantenimiento, requerimientos y valores de mercado, etc. El método propuesto es solamente apropiado para la asignación de gastos de los sectores de la planta industrial y responder las encuestas mencionadas (Secretaría de Energía).

Este análisis de economía de combustible presupone un régimen uniforme de consumos de vapor y de energía eléctrica junto con fuerza motriz que no puede ser mantenido en muchas industrias y especialmente en la industria azucarera. Debe haber un equilibrio entre el consumo de vapor de las turbinas y el consumo de vapor para procesos. El consumo de vapor de las turbinas de contrapresión, que es la cantidad de vapor disponible para procesos, depende del estado del vapor vivo (presión y temperatura), de la contrapresión, de la potencia y del rendimiento interno.

O sea que si se trabaja con vapor vivo de alta presión y temperatura y baja contrapresión y con turbinas grandes de múltiples etapas (rendimientos elevados), el consumo de vapor disminuye y por lo tanto disminuye también la cantidad de vapor para procesos, referida a los kWh necesarios. Si el proceso necesita más vapor, se debe recurrir a instalaciones de auxilio con válvulas reductoras de presión o laminación del vapor vivo al escape. En caso de disponer de muchas turbinas de potencia reducida y baja presión de vapor vivo, con bajos rendimientos, puede ocurrir que el elevado consumo de vapor, supere las necesidades del proceso y el excedente de vapor de escape deba ser soplado a la atmósfera por medio de válvulas de alivio. En este caso también se pierde agua condensada para la alimentación de la caldera, que se debe reponer con agua fría y tratada químicamente.