

# CONFIGURACIONES Y SIMULACION DEL DISEÑO Y OPERACION DE PLANTAS DE COGENERACION

---

M<sup>º</sup> JESUS ARRAIZA ARMENDARIZ, Ingeniero Industrial y  
MIGUEL SOLE GRA, Gerente. Recuperación de Energía, S.A.  
y H. D. BINDER  
Ingeniero industrial, de Fichtner.

---

## 1. INTRODUCCION

Es de conocimiento general que la producción de electricidad en planta en el modo cogeneración (producción conjunta de energía térmica y eléctrica) ofrece ventajas económicas para muchas plantas industriales, ya que la generación de electricidad y calor de proceso a partir del mismo combustible a un elevado rendimiento puede ser una opción mucho más efectiva en cuanto a coste.

Hasta hace relativamente pocos años, la electricidad en las plantas industriales de energía se producía, prácticamente en su totalidad, por medio de turbinas de vapor de ciclo sencillo en operación a contrapresión y extracción-condensación.

El conocimiento de que, en vista del aumento de la demanda de energía y de las reservas limitadas de las fuentes de energía primarias, se deberá proceder a un ahorro de la energía y a un aprovechamiento más eficaz de la misma, ha conducido, en los últimos años, también en los sectores industriales, a una reducción del consumo de energía

térmica; si bien, como regla general, estas medidas de racionamiento han dado lugar a un aumento en el consumo de energía eléctrica.

Como resultado, en muchas plantas industriales, la relación vapor a energía ha derivado desfavorablemente para la generación de energía en planta en el modo de operación convencional y muchos usuarios de plantas de energía industrial ahora se encuentran ante el dilema de si su concepto en planta de energía existente es aún una proposición económica viable o si se puede mejorar.

Los esfuerzos por conseguir que la generación de electricidad dependan menos de la producción de vapor y esté en línea con los requerimientos energéticos de la planta, así como por lograr un alto rendimiento en la energía eléctrica a pesar de la demanda en declive de energía térmica, han conseguido que la aplicación de turbinas de gas resulte una opción más atractiva dentro de los sectores industriales. Un factor contribuyente ha sido que los combustibles adecuados para turbinas de gas, tales como aceite

refinado y gas natural, actualmente están disponibles a precios muy favorables y dependiendo del tipo de industria que se trate, son auto-generados dentro de la misma.

## 2. INSTALACIONES COMBINADAS DE TURBINAS DE VAPOR Y GAS PARA LA INDUSTRIA

Las figuras 1 a 5 muestran diversas configuraciones para procesos de cogeneración de interés para la industria en las aplicaciones antes mencionadas.

La selección de un proceso combinado con gas y vapor depende de la relación potencia a energía térmica, la cual viene dictada por la naturaleza y consumo de las instalaciones de producción de las industrias. La relación de potencia a calor se conoce como el índice de cogeneración del proceso.

La tarea del ingeniero de proyecto es encontrar el proceso para el cual la relación de electricidad generada a calor útil, definida como la rela-

Fig.1. Planta generadora de energía, con turbina de vapor a contrapresión.

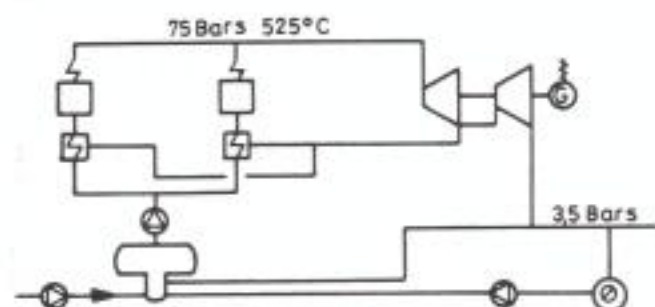
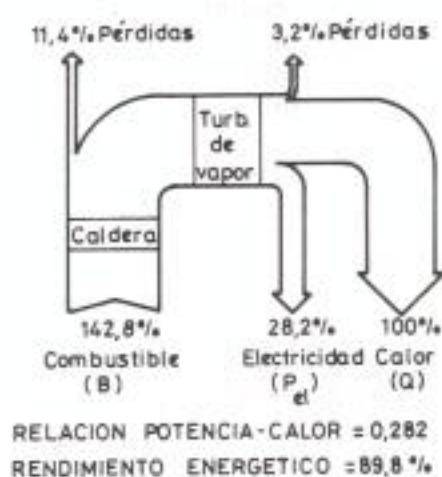
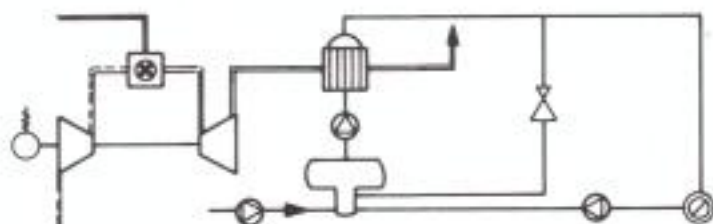
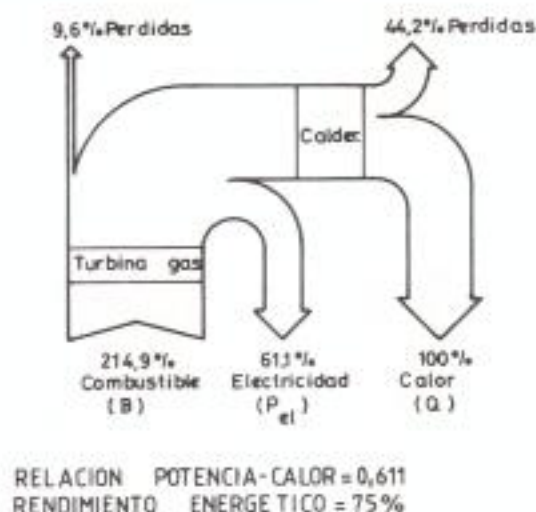


Fig.2. Turbina de gas con caldera de recuperación de calor sin combustible auxiliar.



ción potencia a calor de la planta de cogeneración (índice de cogeneración de la planta), sea lo más cercana posible a la relación potencia a calor del proceso. Así, la relación potencia a calor de planta representa, hasta cierto límite, una medida de la calidad de la configuración térmica del proceso de cogeneración. Por supuesto, los precios de la electricidad, los parámetros financieros y los costes de inversión son decisivos también para la selección del proceso combinado gas-vapor.

La figura 1 muestra el proceso de ciclo sencillo constituido por una turbina de vapor a contrapresión. En dicho proceso, se utiliza el vapor de la instalación industrial para generar electricidad en la turbina a contrapresión.

En este caso, el rendimiento eléctrico alcanza el 28,2 por 100 del calor útil, lo cual significa que la relación potencia a calor de planta es relativamente baja (0,28); sin embargo, el rendimiento en el aprovechamiento del contenido energético del combustible (rendimiento energético) es alrededor del 90 por 100. El ciclo sencillo con

Fig.3. Turbina de gas con caldera de recuperación de calor con combustible auxiliar.

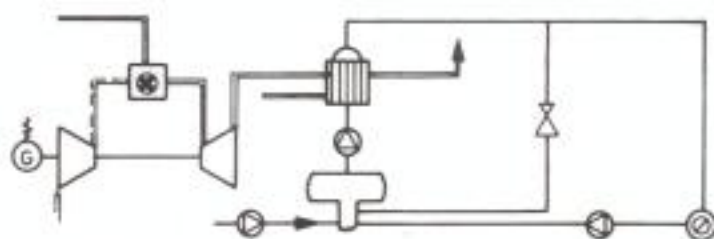
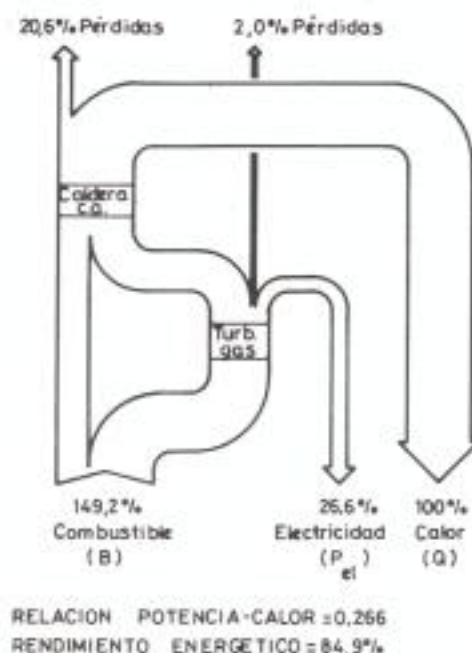


Fig.4. Turbina de gas con caldera de recuperación de calor con combustible auxiliar.

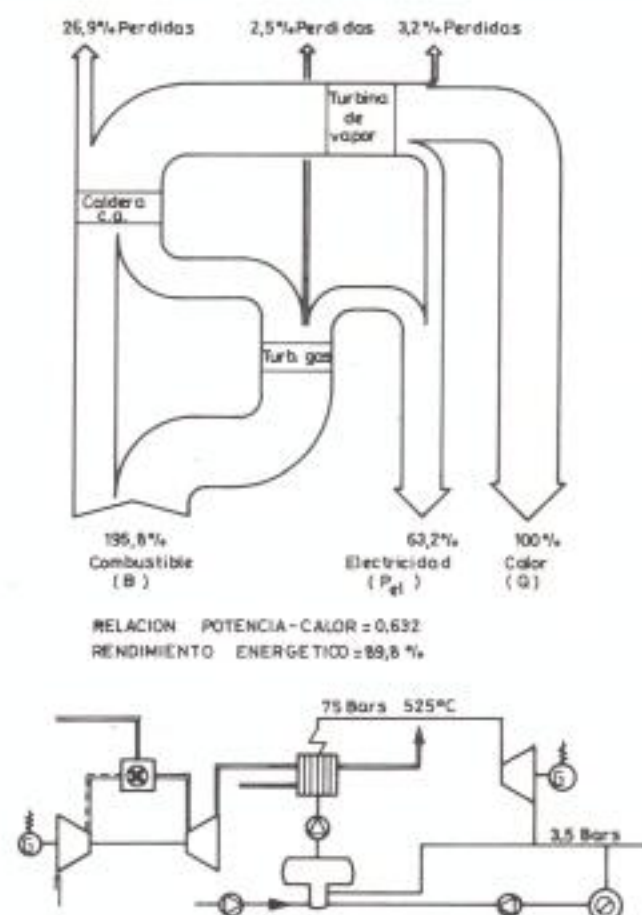
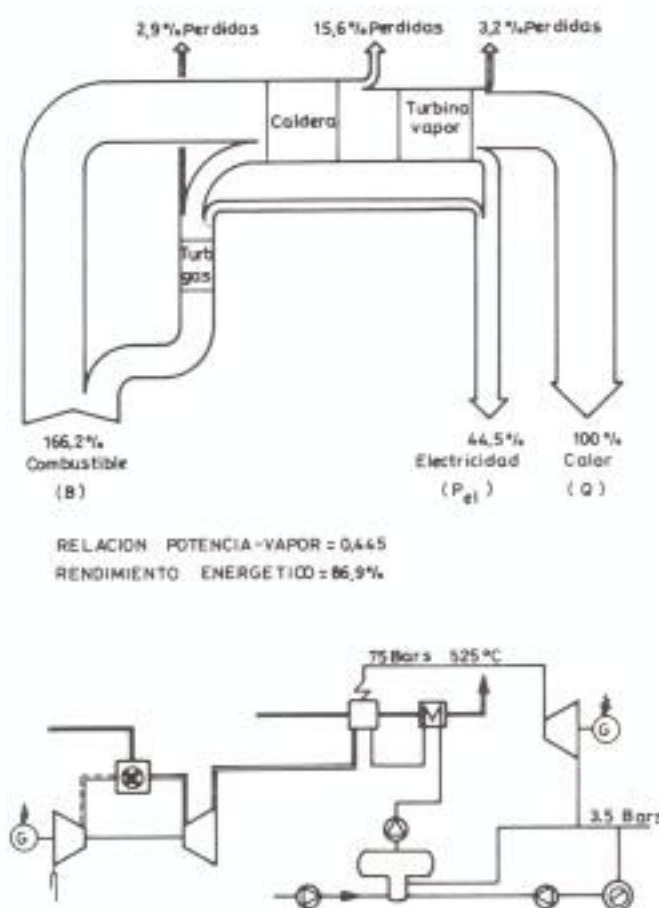


Fig.5. Turbina de gas que suministra comburente a caldera de vapor existente.



turbina de vapor a contrapresión tiene el mayor rendimiento energético. El inconveniente es que el rendimiento eléctrico está totalmente fijado por el consumo de calor. Aunque es posible alcanzar relaciones potencia a calor mayores, llevando las condiciones del vapor vivo hasta 115 bar, 535 °C y reduciendo la contrapresión, en general, no se sobrepasarán valores de alrededor del 0,5. Debe hacerse notar que para cada caso expuesto, las pérdidas de energía, el consumo de combustible y el rendimiento eléctrico se entienden como porcentajes de calor útil.

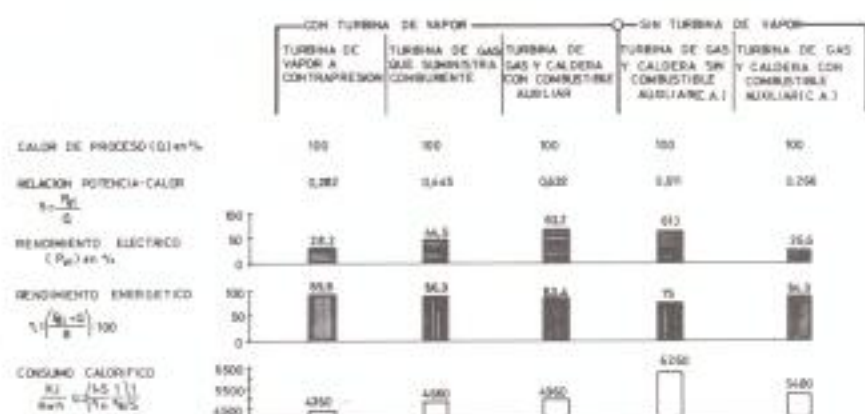
Los siguientes esquemas muestran cómo la relación potencia a calor y, por ende, el rendimiento eléctrico pueden aumentarse para una demanda de calor constante, empleando turbinas de gas.

La figura 2 muestra la configuración para el caso de una turbina de gas con caldera de calor residual sin combustible auxiliar, que es usada para alcanzar la demanda de calor requerida. La relación potencia a calor de proceso es 0,61 y por ello, marcadamente mayor con respecto al proceso de ciclo sencillo con turbina de vapor a contrapresión (relación 0,28); sin embargo, el rendimiento energético es algo menor, un 75 por 100. Este proceso de ciclo combinado es idóneo para aplicaciones en las que se prevean condiciones de carga constantes, ya que la turbina de gas regula la producción de vapor.

La figura 3 muestra el mismo proceso anterior, pero con combustible auxiliar en la caldera de calor residual. El contenido en oxígeno del escape de turbina es utilizado como comburente en la caldera hasta reducirlo a un contenido residual del 11 por 100. Esto significa que puede seleccionarse un rating menor para la turbina de gas, puesto que parte del calor para la caldera es suministrado de forma auxiliar. Por termodinámica, esto resulta en una relación menor de potencia a calor (del 0,26), a pesar de que el rendimiento energético del combustible es del 85 por 100 y, por tanto, considerablemente mejor que el anterior.

Este tipo de proceso es aplicable en plantas con un gran consumo de calor, por ejemplo, en la industria textil, refinerías y petroquímicas. El

Fig.6. Comparación de parámetros de proceso.



equipo de comburente auxiliar permite la variación de la relación potencia a calor en un rango amplio.

La figura 4 muestra una configuración en la cual se instala un turbogenerador a contrapresión precedido de una turbina de gas, para aumentar la cantidad de energía eléctrica generada. Consecuentemente, la relación potencia a calor aumenta a 0,63, alcanzando un rendimiento energético de combustible del 83,4 por 100. En este caso, también es posible alcanzar relaciones potencia a calor mayores, aumentando las condiciones del vapor vivo y reduciendo la contrapresión.

Este proceso se aplica en plantas intensivas en electricidad, tales como papeleras o químicas.

En la figura 5, el escape de la turbina (rico en oxígeno y con un importante contenido calórico) es usado como comburente auxiliar en una caldera existente. De la interrelación de la turbina de gas con la caldera existente u hornos de proceso, se deriva un aumento de la relación potencia a calor en conjunción con la utilización de la capacidad de la caldera existente y todo ello para una inversión de capital relativamente baja. El rendimiento energético del combustible es un 87 por 100, debido a la mejora en el aprovechamiento de energía de los gases de escape. El rendimiento eléctrico alcanza el 44 por 100 del calor útil.

En la figura 6, se hace una comparación de los parámetros básicos (ratio alcanzable potencia a calor, rendimiento energético del com-

bustible y consumo calorífico), correspondientes a las configuraciones expuestas en este artículo.

De la comparación se deduce que:

a) El proceso de cogeneración de ciclo sencillo con turbina de vapor a contrapresión, muestra el mejor rendimiento energético y el consumo calorífico más favorable para la generación de un kWh; sin embargo, como la generación de electricidad está directamente relacionada con la cantidad de calor extraído, el rendimiento eléctrico de 28,2 por 100 es relativamente modesto.

b) Es posible aumentar sustancialmente el rendimiento eléctrico a la vez que alcanzar unos elevados rendimientos energéticos del com-

Fig.7. Organigrama para el cálculo de proceso del ciclo.

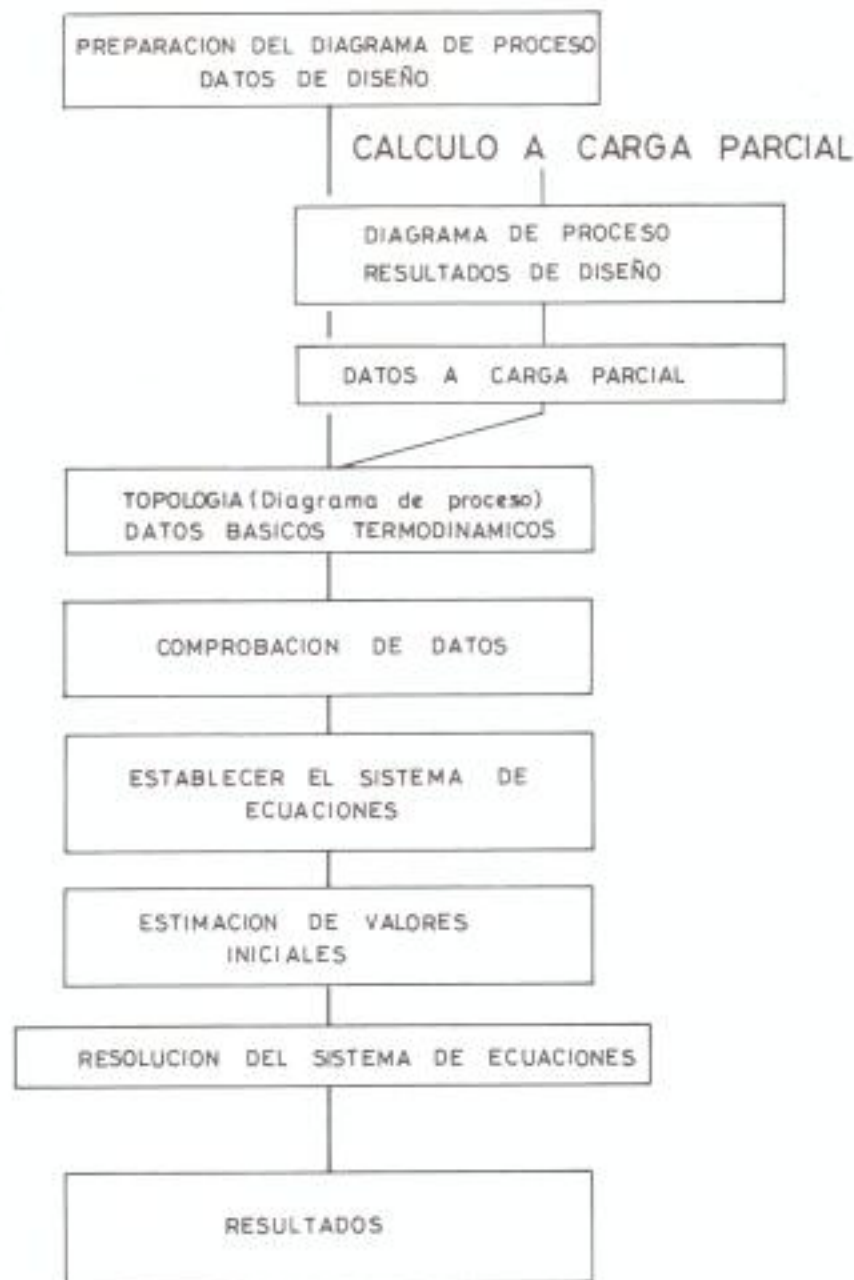
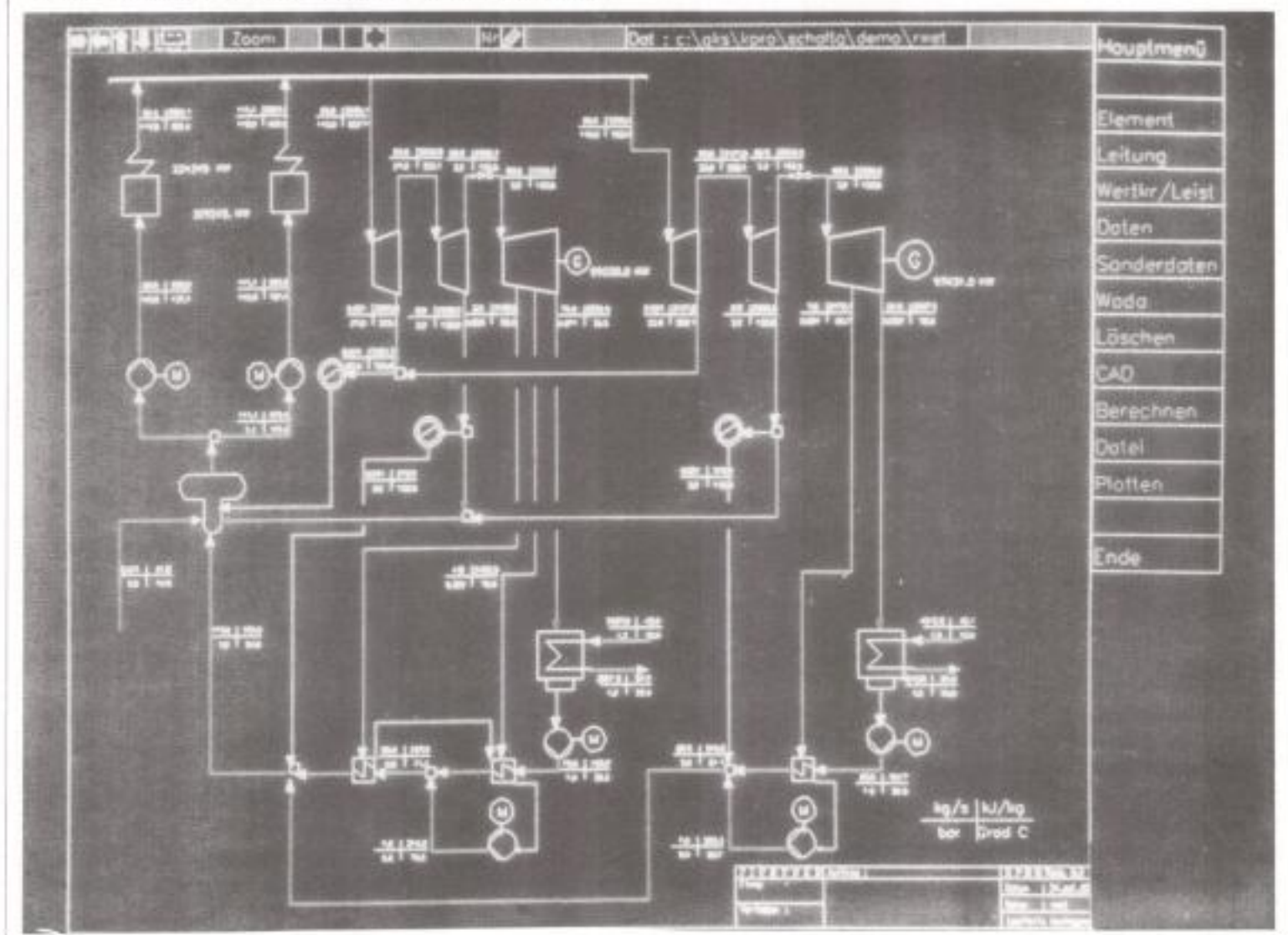


Fig.8. Presentación gráfica de una planta de cogeneración.



bustible si se instalan turbinas de gas interrelacionadas con plantas de vapor. Obviamente, el consumo calorífico por kWh generado es algo mejor para las opciones con turbina de gas.

### 3. INFORMATIZACION DEL DISEÑO Y OPERACION DE LAS PLANTAS DE COGENERACION

La realización del cálculo de la configuración óptima en la etapa de diseño, así como el modo de operación que permita unos costes óptimos con el suministro energético requerido, no son posible sin la ayuda de un soporte informático, que cubra la multiplicidad de condiciones de operación, simule las diversas estrategias y estructuras, refleje las tecnologías posibles de cogeneración y sus diferentes características técnicas y económicas, permita una evolución con los costes anuales y el período de

amortización y plantee soluciones viables *quasi*-instantáneamente a la detección de las perturbaciones en la planta de cogeneración. Esta tarea en concreto, sin la ayuda del ordenador, requiere un tiempo de dedicación importante, incluso entre operadores entrenados e ingenieros expertos en planificación.

#### 3.1. CONVERGENCIA A UNA SOLUCION

Se trata de simular los procesos termodinámicos de la planta de cogeneración, lo que denominamos "cálculo del proceso de ciclo", tanto para el ciclo sencillo como para el ciclo combinado.

Ejecutando el programa *offline*, se hallan los resultados termodinámicos y su correspondiente impacto en los costes, independientemente de los datos instantáneos propios de la operación de la planta en ese momento. El empleo de una pantalla gráfica como interfase favorece el que los ingenieros no familiari-

zados con los cálculos de procesos de ciclo o con actividades computarizadas puedan ejecutar con éxito simulaciones de este tipo.

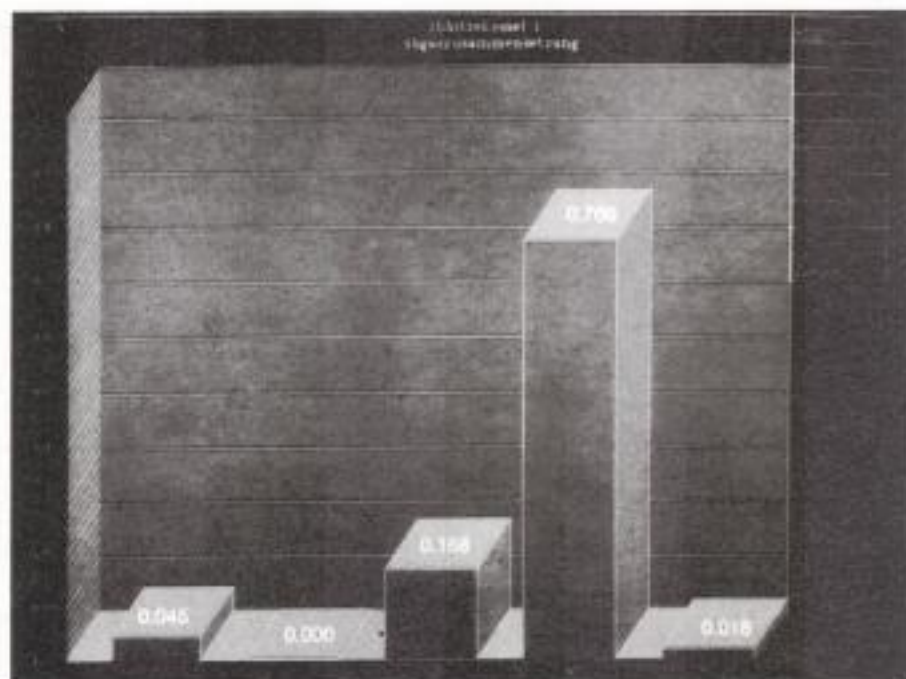
Dada la potencia de los actuales ordenadores personales, es posible resolver los balances energéticos de materia de la planta de cogeneración a la vez que gestionar la operación día a día de la misma.

#### 3.2. POSIBILIDADES DE APLICACION

Las aplicaciones básicas de este tipo de programas son:

- Simulación de los modos de operación de las plantas de cogeneración para distintos niveles de carga.
- Determinación del modo de operación óptimo.
- Ayuda en la toma de decisiones relativas a la continuidad de funcionamiento de la planta en el caso de que surjan problemas en el sistema.
- Cálculo de los efectos derivados de ampliar el alcance de la planta

Fig.9. Composición del gas de escape de la turbina de gas.



de cogeneración.

- Entrenamiento del personal responsable de la planta de cogeneración vía modo de funcionamiento "simulador".

### 3.3. ESTRUCTURA MODULAR

El programa contiene todos los equipos considerados como estándar en las plantas de cogeneración: calderas, turbinas, condensadores, estaciones de válvulas reductoras de presión de *bypass*, bombas de agua de alimentación, intercambiadores, etc., siendo posible añadir equipos siempre que el industrial así lo desee.

Para simular con mayor precisión el proceso del ciclo, el programa deberá tener en cuenta tanto las pérdidas térmicas, como las de carga, en todas las secciones de tuberías y en los equipos. Como ejemplo, se puede mencionar que para el caso de la turbina de vapor, dichas pérdidas se calculan mediante el modelo Stodola del camino de expansión (en un diagrama de Mollier) y mediante la especificación de las curvas de rendimiento (Fig. 7).

El proceso de ciclo se define, desde el punto de vista matemático, por un sistema de ecuaciones no lineales, en el cual las variables son los caudales másicos, la presión y la entalpía. Ello permite, dentro del ámbito del alcance de los equipos

instalados, cualquier configuración para la planta de cogeneración y cualquiera condición de estado que físicamente sea pausable y pueda ejecutarse por medio de controles a fijar. Esta es la gran ventaja del *software* así concebido, frente a los procesos secuenciales, que tuvieron, en un principio, un amplio campo de aplicación.

El cálculo del proceso del ciclo tiene lugar en dos etapas:

a) Establecer el sistema de ecuaciones a partir de los datos de entrada tomados del diagrama de proceso (puntos nodales del circuito y datos clave termodinámicos). Con ello, algunas ecuaciones pueden ser resueltas de antemano y así establecer sistemas con menor número de ecuaciones.

b) Resolver el sistema de ecuaciones no lineales para hallar los caudales másicos, presiones y entalpías en las líneas de conexión entre equipos del proceso.

### 3.4. CALCULO DEL PROCESO

El procedimiento seguido para dicho cálculo es el siguiente:

- *Entrada del circuito de la planta de cogeneración.*

El diagrama de proceso asociado a la planta de cogeneración se dibuja

en pantalla (VDU) con ayuda de un sistema periférico gráfico que permite incorporar los equipos que configuran la misma (calderas, turbinas, intercambiadores...) y las tuberías de la conexión. Los equipos existentes y la conexión entre los mismos - la topología del proceso - se derivan automáticamente a partir del diagrama del proceso y, cuando este último se modifica, el programa rectifica el modelo para ajustarse a la modificación introducida.

- *Entrada de los datos básicos*

Los datos termodinámicos clave (por ejemplo, condiciones del vapor vivo) o de los parámetros de los equipos individuales (por ejemplo, diferencias de temperaturas en los extremos del intercambiador de calor) se introducen directamente en el diagrama vía teclado.

- *Comienzo de la ejecución del cálculo*

a) Establecer el sistema de ecuaciones.

b) Introducir los valores iniciales: para resolver el sistema de ecuaciones, se requieren valores iniciales, los cuales se introducen interactivamente como respuesta a los requerimientos del programa.

c) Resolver el sistema de ecuaciones: para ello se aplica el método de Newton modificado.

- *Resultados*

Los resultados del cálculo del proceso se visualizan en pantalla a través de ventanas y dentro del diagrama de proceso, de forma que sean fácilmente interpretables.

- *Presentación de datos y resultados*

En el diagrama del circuito (Fig. 8), todos los datos de entrada y resultados más importantes (presión, temperatura, entalpía, caudales y potencia, y una relación lista de los mismos pueden ser representados de forma gráfica e impresos, respectivamente. Además, siempre existe la opción de imprimir resultados adicionales, por ejemplo (Fig. 9), la composición de los gases de escape de la turbina de gas en la caldera puede presentarse en forma de diagrama de barras.