

Nuevos métodos de aprovechamiento más efectivo de fuentes energéticas^(*)

Por ENRIQUE PALLARES HUICI

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

La crisis energética ha obligado a un esfuerzo de racionalización y mejora de rendimiento de las tecnologías empleadas hasta su aparición, paralela a la búsqueda de nuevas fuentes de energía. A ello se dedica el siguiente artículo, que pasa revista a las nuevas técnicas de mejora de combustibles ordinarios, nuevas tecnologías para la combustión, lechos fluidificados, aprovechamiento térmico de plantas depuradoras de aguas residuales, etc.

Pronto hará quince años que la crisis energética comenzó a alcanzar la mayoría de los países industrializados. Bastantes esfuerzos imaginativos y muchos millones se han invertido desde entonces para lograr nuevos métodos de producción de energía y calor a partir de una larga serie de fuentes.

Desde el punto de vista español, tienen un interés especial las nuevas técnicas para la combustión tanto de combustibles sólidos nacionales como importados. Los tres problemas principales que se presentan en la combustión son las propiedades tan variables en los distintos combustibles, las exigencias cada vez más estrictas en cuanto al impacto ambiental, y la necesidad de obtener un buen rendimiento económico. Se puede intentar resolverlos de distintas maneras: Mediante el refinado o tratamientos previo del combustible, con nuevos procesos de combustión, y con diversos sistemas de control y regulación de dichos procesos. Partiendo de múltiples soluciones técnicas y sistemas específicos, se llega a una infinidad de combinaciones posibles que llevan a sistemas cada vez más complejos.

Otro campo de experimentación que se destaca como especialmente decisivo es la técnica de aprovechamiento del calor residual de bajo valor energético. Este calor residual se tiene por ejemplo en el aire de ventilación de edificios y en el agua de los desagües, así como en los gases de escape de los vehículos. Una utilización más efectiva de cambiadores y bombas de calor podría, en estos casos, dar soluciones

económicamente rentables. No obstante, las soluciones técnicas resultan ser más complejas de lo que se pensó inicialmente, y son factibles, en principio, sólo en aplicaciones a escala relativamente grande.

En la actualidad, la tarea más urgente en el campo de la Energética es la de intentar progresar en el desarrollo de las tecnologías llamadas «convencionales». Los sistemas se caracterizan por una creciente complejidad y por nuevas combinaciones técnicas que años atrás difícilmente podían vislumbrarse o, en cualquier caso, era juzgadas como impracticables. Un ejemplo concreto de nueva combinación técnica es una aplicación del motor de Stirling. Una versión modificada de aquel motor que inicialmente se desarrolló para vehículos, se utiliza actualmente como parte esencial de la generación de corriente eléctrica situado en el foco de espejos reflectores solares.

1. MEJORA DE LOS COMBUSTIBLES ORDINARIOS

Cualquier combustible sólido —carbón, turba, madera, desechos forestales, etc.— es siempre bastantes más difícil de quemar que el petróleo o el gas natural. El problema está ligado al contenido energético tan variable del combustible, su composición química, tamaño de las partículas y otras propiedades mecánicas, así como, con frecuencia, su elevado contenido de humedad. Esto último es especialmente importante en lignitos, turbas y combustibles forestales que inicialmente pueden contener hasta un 80 por 100 de agua. Un secado «in situ» o una

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la redacción de esta Revista hasta el 31 de marzo de 1986.

deshidratación reduce el contenido en agua hasta alrededor del 50 por 100, lo que normalmente puede resultar aceptable en el caso de una combustión de técnica convencional.

Tampoco el carbón, y concretamente la hulla, es un combustible homogéneo. Un contenido variable de azufre y cenizas implica distintas exigencias en cuanto a tratamientos previos, al tiempo que ocasiona diferentes problemas durante la combustión. En ciertas calidades de carbón se puede reducir este contenido en alrededor de sus dos tercios, y alcanzar de este modo unos niveles aceptables.

Un cierto número de procedimientos, más o menos experimentados, para las mezclas carbón-fluido ya han sido patentados (Nycol, Carbogel, etc.). Por otra parte, se han desarrollado con éxito técnicas de combustión de mezclas carbón-petróleo, y plantas piloto para carbón fluidificado están ya en funcionamiento desde hace algunos años en los Estados Unidos y en Europa (Alemania, Suecia, etc.). Sin embargo, todavía resta una labor de desarrollo y obtención de experiencia en la explotación práctica de estos procesos. Los aspectos económicos parecen, no obstante, ser el principal problema del método. No pueden, por el momento competir con nuevas instalaciones convencionales de carbón.

De cualquier modo, el carbón ya no se va a presentar en el futuro como un negro fantasma, sino como una alternativa realista. Además es el combustible que con mayor rapidez puede ser explotado. Las turbas, en cambio, no son tan fácilmente aprovechables como en un principio se pensaba en algunos países o regiones, y de la restante biomasa se dispone, en realidad, tan sólo de cantidades muy limitadas. Los intentos de cultivo de, por ejemplo, bosques o selvas «energéticos» siguen progresando pero todavía pueden preverse cantidades relativamente pequeñas de combustibles de tipo forestal durante el resto de esta década de los 80.

2. DE LAS TECNICAS DE QUEMADO EN PARRILLAS A LOS LECHOS DE BURBUJEO

Las diversas técnicas de quemado pueden considerarse como los eslabones en la cadena

del desarrollo desde la técnica de las parrillas y del quemado de sustancias pulverulentas, hasta los distintos tipos de lechos fluidificados. A esto se podría añadir el desarrollo de los equipos para las instalaciones de combustión como, por ejemplo, los filtros y equipos para la condensación de los gases de combustión.

La combustión sobre parrillas es, en general, adecuada para instalaciones pequeñas o medianas. Por ejemplo, el quemado de cortezas y residuos sobre parrillas fijas inclinadas se utiliza en la mayoría de las industrias de transformación forestal. También otras técnicas de combustión sobre parrillas pueden, conjuntamente con una moderna tecnología de filtros, funcionar satisfactoriamente y cumplir los actuales límites de contaminación ambiental.

La combustión de material pulverizado es la que domina totalmente para grandes calderas en la producción de energía eléctrica en la mayoría de países. También se ha demostrado la posibilidad de aplicar la combustión de material pulverizado, en pequeñas calderas, para la producción de calor utilizando menudos de carbón, molidos y purificados. Una buena economía de explotación, mediante esta técnica puede llegar a combinarse con una contaminación ambiental reducida, en este tipo de calderas adaptadas para la combustión de menudos pulverizados.

Especialmente en el ámbito de los lechos de combustión fluidificados existen actualmente interesantes proyectos en diversos países. El método, en resumen, consiste en un lecho con combustible, al que se ha añadido cal, arena, etc., y que se mantiene en suspensión mediante una potente corriente de aire durante la combustión. Esta técnica se ha estado desarrollando todavía durante estos últimos años en diversas direcciones, tanto en lo concerniente al propio lecho de combustión como en sus equipos auxiliares.

La idea de utilizar lechos fluidificados de burbujeo para la combustión, tras un largo período de introducción, experimentación y desarrollo, se ha convertido finalmente en una realidad. Las instalaciones cuya implantación domina actualmente el mercado funcionan a la presión normal (Atmospheric fluidized bed combustion, AFBC). El motivo es que permiten una cierta

flexibilidad en la elección del combustible, producen una emisiones aceptables y serán capaces de cumplir unas más restrictivas normas de contaminación por SO_2 en el futuro. Además, han demostrado tener una buena economía de explotación. En la actualidad existen bastantes AFBC en funcionamiento comercial o en fase de instalación, y la técnica se puede considerar hoy en día como bien establecida y especialmente apropiada para combustibles relativamente homogéneos.

El desarrollo de los lechos fluidificados rápidos (Fast fluidized bed combustion, FFBC) se ha estado llevando a cabo a gran escala en algunos países nórdicos (Suecia y Finlandia). Los FFBC tiene ventajas adicionales con respecto a los AFBC en lo que respecta a la contaminación ambiental, flexibilidad de combustibles y posibilidades de regulación. Las primeras instalaciones piloto ya llevan un cierto tiempo en fase de

explotación comercial. Esta técnica parece capaz de satisfacer todas las exigencias de contaminación ambiental con un coste económico atractivo, y puede en breve llegar a ser la dominante, sobre todo porque facilitará el cambio entre diferentes combustibles.

El lecho presurizado fluidificado (Presurized fluidized bed combustion, PFBC) es adecuado tanto para la producción de electricidad como para la cogeneración de energía eléctrica y calor. Se trata de una técnica compleja y para grandes instalaciones, por lo que parece razonable suponer que requeriría un período de introducción algo más largo. Actualmente este proceso se prueba en grandes plantas piloto. El PFBC reúne buenas condiciones para sustituir en gran parte la tecnología convencional, es decir, la combustión de menudos de carbón, con posterior purificación de humos. La desulfuración del combustible en el propio lecho, una

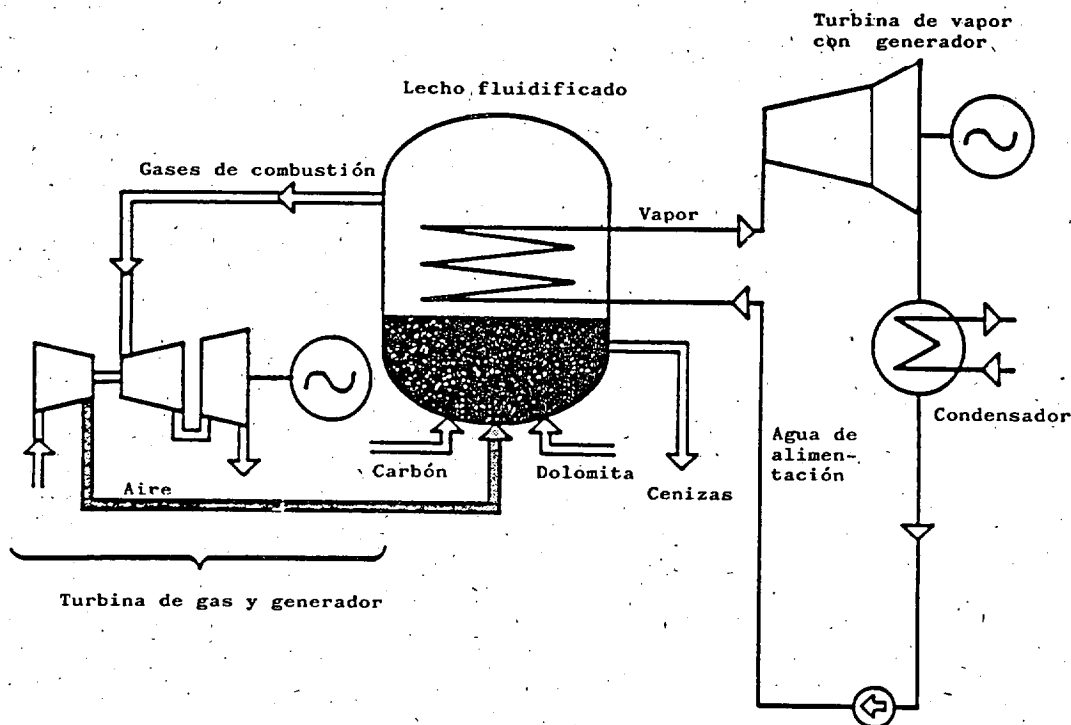


Figura 1.—Diagrama de instalación de lecho presurizado-fluidificado. (La figura describe esquemáticamente la técnica utilizada en los PFBC. En el fondo de la vasija se encuentra una plataforma perforada con gran número de boquillas. Sobre ella se coloca el lecho de material finamente molido, que fundamentalmente está constituido por cenizas. El carbón y el absorbente del azufre —dolómита— se introducen por el fondo de la vasija. El contenido de combustible en el lecho es bajo —para el caso de carbón, alrededor de un 1 por 100—. A través de las boquillas se insufla el aire para la combustión, con lo que el material del lecho se comporta, en régimen fuertemente turbulento, como un líquido en ebullición violenta. Submergidos en el lecho se hallan los haces de tubos de refrigeración en cuyo interior se forma vapor de agua. El lecho turbulento se puede, de este modo, integrar de varias formas en un ciclo combinado de turbina de gas-turbina de vapor. Una de las ventajas esenciales de la técnica PFBC es la de permitir la desulfuración en el mismo proceso de combustión, con lo que se elimina la necesidad de una instalación separada para desulfurar el combustible.)

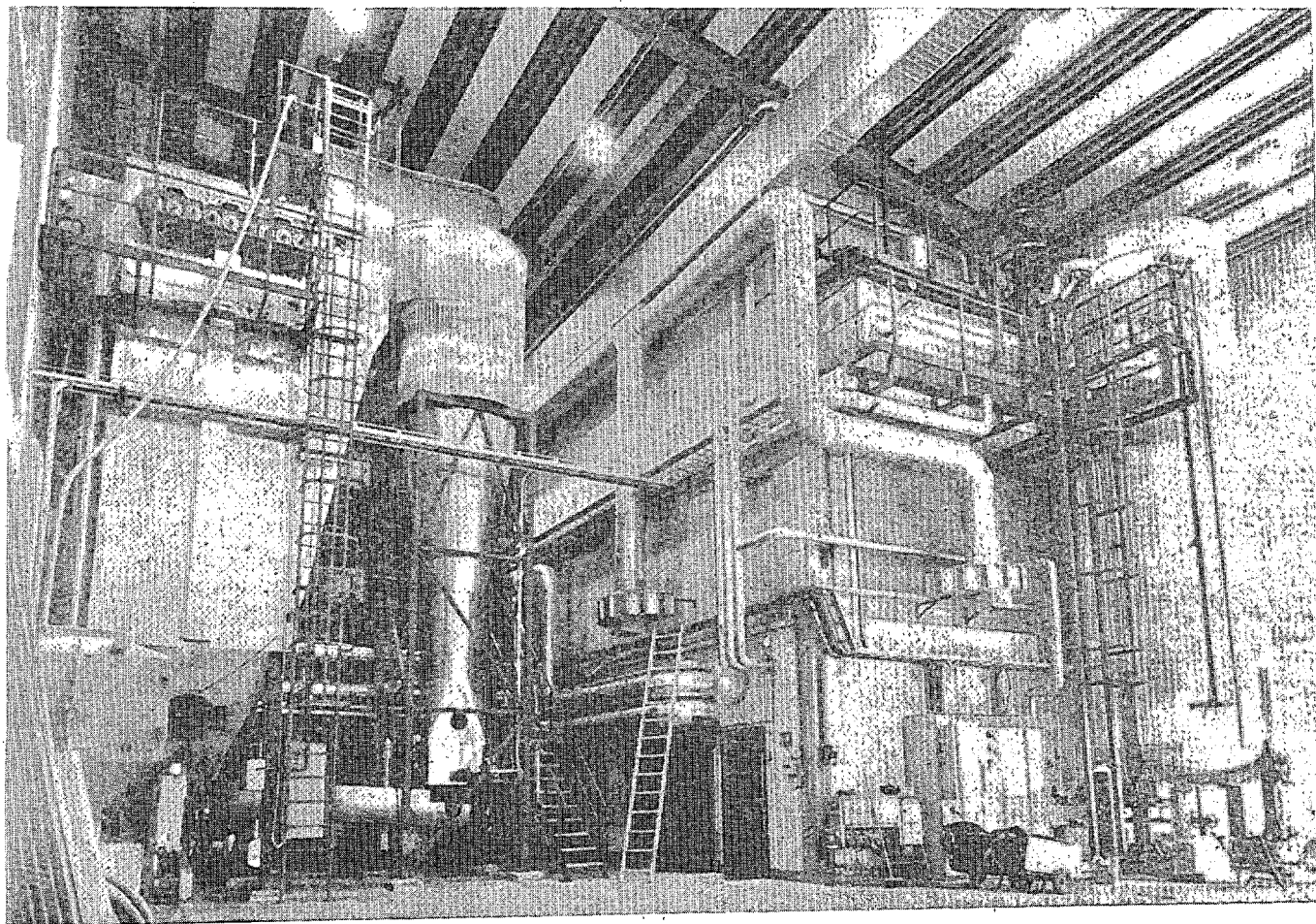


Figura 2.— Los lechos fluidificados de combustión se hallan ya en explotación en numerosas centrales térmicas.

gran tolerancia frente a variaciones en la calidad de carbón y un buen rendimiento avalan esta atractiva técnica.

La tendencia principal en el campo de la combustión es, por consiguiente, la de continuar el desarrollo en diferentes direcciones de la técnica de los lechos fluidificados, y que la combustión de carbón pulverizado encuentre su aplicación en el caso de pequeñas calderas de 10 a 20 MW. El gran número de combinaciones en cuanto a tamaño de caldera, tipo de combustible, y campo de aplicación, da lugar a múltiples soluciones de características específicas. Asimismo, se abren interesantes perspectivas para combinar plantas de combustión con instalaciones de recuperación de calor y utilización del calor residual.

3. LECHOS FLUIDIFICADOS

Un lecho fluidificado es un lecho de partículas a través del cual se hace circular, desde abajo, una corriente de un gas. En el caso de la combustión, este gas es, por supuesto, aire. Las partículas son normalmente pequeñas (menores de 6 mm) y sólidas.

El lecho se comporta como un líquido en ebullición, que «hierva» tanto más, cuanto mayor sea el flujo de gas que lo atraviesa. Se crea un mayor número de «burbujas» y el lecho se puede inclinar permaneciendo su superficie horizontal. Un objeto puede flotar en su seno y este lecho puede también llegar a «rebasar» por sus bordes. Dos lechos que se ponen en contacto se comportan como el contenido de vasos comunicantes.

Los lechos fluidificados de burbujeo pueden

utilizarse como dispositivos de mezclado para sustancias pulverulentas, como en instalaciones de combustión (calderas), o en numerosos procesos de la industria química.

La fluidificación con burbujeo se obtiene para la mayoría de las sustancias mediante un gas. Esto es también cierto para algunos líquidos cuando las partículas tienen una densidad adecuada.

El fenómeno es conocido desde hace bastantes años y se ha utilizado en la práctica en diversas aplicaciones, por ejemplo en hornos de tostado de piritas desde la década de los 50. Para aplicaciones de combustión, el interés se despertó a finales de la década de los 60 y se propagó con la crisis del petróleo de 1973-74.

Si contemplamos un lecho fluidificado, las burbujas forman verdaderamente una «niebla» o nube de gas siempre que el tamaño de las partículas sea pequeño, y la temperatura y la velocidad del gas sean bajas. Si las partículas son algo mayores y la temperatura y la velocidad más elevadas, las burbujas se deforman y pueden aparecer de cualquier manera. Se forman y colapsan en cualquier punto. Entonces el lecho se denomina turbulento. Un lecho con velocidad del gas de 2 m/s y con tamaño de partículas de 0,5 mm, pasa a comportarse como

lecho turbulento cuando la temperatura supera unos 700° C.

La superficie de un lecho turbulento parece más en calma que la de un lecho de burbujeo, pese a que la velocidad del gas es superior. El fenómeno está todavía mal estudiado y las causas de este comportamiento anómalo son aún desconocidas. La mayoría de los lechos de combustión de mayores dimensiones se hacen, sin embargo, funcionar en régimen turbulento. Sobre el mecanismo de intercambio gaseoso entre la fase compacta y la fase de burbujas tampoco resulta todavía posible más que hacer conjeturas.

Tanto los lechos de burbujeo como los turbulentos se denominan lechos estacionarios. Estos lechos permanecen en un recinto independientemente de la velocidad del gas. No obstante, algunas partículas son siempre arrastradas por la corriente de gas si su velocidad de caída libre es inferior a la velocidad de fluidificación. Lechos marcadamente turbulentos, por su mayor velocidad, pierden continuamente partículas con el gas. Aunque la velocidad del gas siga incrementándose, de modo que llegue a alcanzar la velocidad de caída libre para la totalidad de las partículas, éstas no se desprenden de inmediato. Para ello es necesario sobrepasar

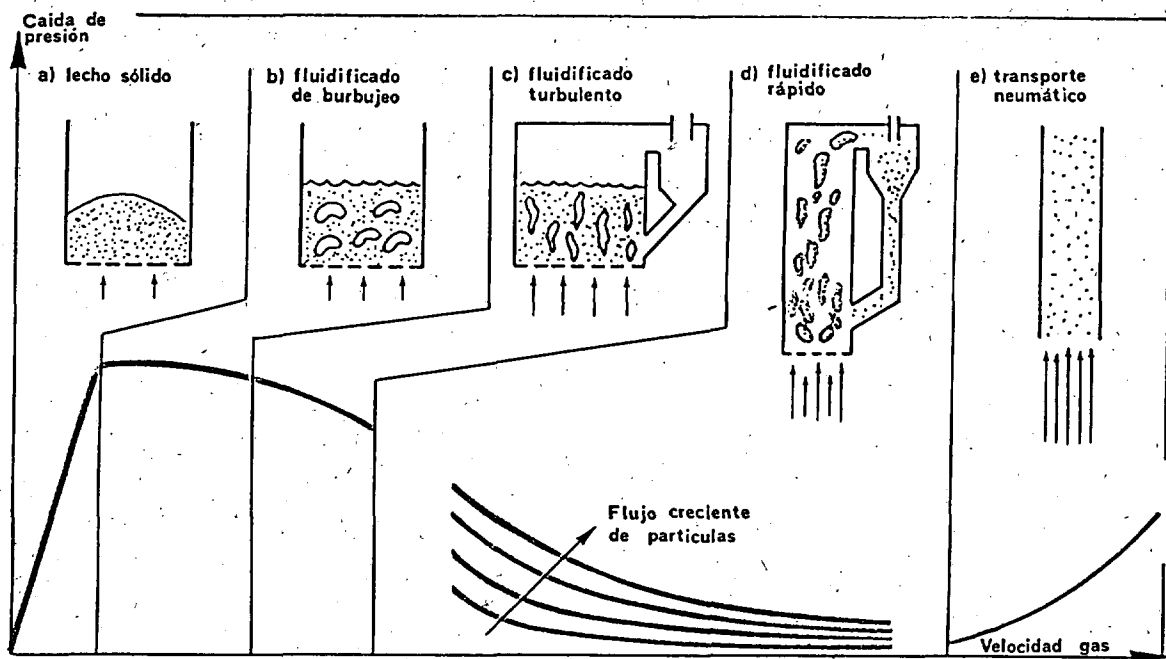


Figura 3.—Un lecho de partículas atravesado por una corriente de gas puede comportarse de cinco maneras distintas, como se muestra en la figura.

sar lo que se denomina velocidad mínima de transporte a la que todas las partículas abandonan el lecho en un intervalo relativamente breve de tiempo.

Si estas partículas arrastradas se devuelven a la parte inferior del lecho, se origina un lecho circulante. En él tiene lugar lo que se denomina una fluidificación rápida para velocidades que rebasan dicha velocidad mínima de transporte. Un *Lecho fluidificado rápido* se caracteriza porque las partículas se agrupan de forma aleatoria dando lugar a nubes que se forman y se deshacen rápidamente. Si estas nubes tienen una velocidad de caída libre mayor o menor que la velocidad del flujo de gas, caen hacia la parte inferior o son transportadas hacia arriba. En un lecho fluidificado rápido se encuentra, por lo tanto, todo el volumen del recinto lleno de nubes de partículas que se desplazan al azar en todas direcciones. Entonces, la velocidad media de una partícula puede ser de un 5 a un 25 por 100 de la velocidad del gas. El grado de mezclado que se alcanza es muy bueno.

La concentración de partículas en el lecho (o en la vasija de un reactor químico) se controla en cierta medida por la velocidad del gas pero, sobre todo, por la cantidad de partículas recirculadas. Si la velocidad es alta y el flujo de partículas muy bajo, puede aparecer el transporte neumático, lo que hace que todo el combustible abandone totalmente el lecho en poco tiempo. En los lechos de combustión, es obvio que se intente evitar esto, dado que implicaría un tiempo de combustión demasiado corto. Para solucionar este problema en los lechos rápidos se hace, por lo tanto, retornar al combustible que no está totalmente quemado, en un proceso de realimentación.

4. LECHOS PRESURIZADOS FLUIDIFICADOS

Un lecho fluidificado puede presurizarse. Con ello, el proceso básico de fluidificación no se modifica, pero varían sus características, sobre todo desde el punto de vista químico. Al comprimirse puede pasar una mayor masa de gas a través de una misma unidad de superficie.

Además, se modifica la velocidad y el tamaño de las burbujas.

Haciendo que un lecho fluidificado trabaje a una presión superior a la atmosférica, se logran varias ventajas. Por una parte se mejora la combustión, lo que eleva el rendimiento térmico, y por otra se reduce el volumen de la caldera. La caldera resulta por tanto más barata que una de lecho atmosférico para la misma potencia.

STAL-LAVAL en Suecia, y otras compañías en otros países han desarrollado lechos presurizados integrados en un ciclo de turbina de gas. El lecho presurizado (a 1,6 MPa) se proyecta primordialmente para carbón —que se quema mezclado con cal a fin de fijar de forma efectiva el azufre— pero puede también adaptarse a otros combustibles sólidos como, por ejemplo, turba. Un lecho fluidificado combinado con una turbina de gas puede proyectarse para lograr un óptimo en la generación de electricidad, o en la cogeneración de calor y electricidad.

La mayor parte de la energía aprovechable se extrae del generador de vapor del lecho, y este vapor mueve una turbina de vapor y un generador eléctrico. El propio lecho se presuriza mediante un turbo compresor que es arrastrado por la turbina de gas que, a su vez, es movida por los gases calientes de combustión procedentes del lecho. Esta turbina mueve, además, un generador. Finalmente se extrae el calor residual

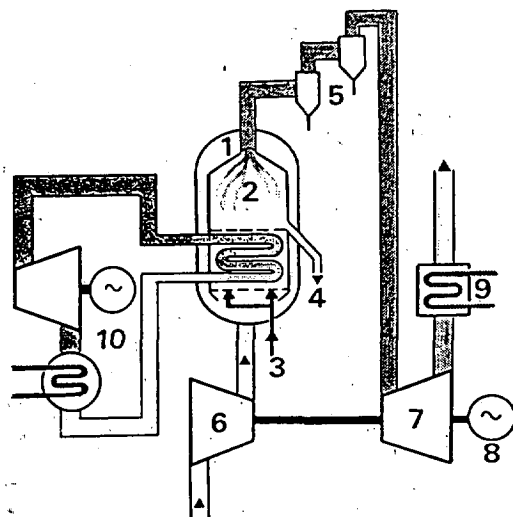


Figura 4. — 1 Vasija de presión; 2 Lecho turbulento; 3 Combustible; 4 Cenizas; 5 Separador de polvo; 6 Turbocompresor; 7 Turbina de gas; 8 Generador; 9 Cambiador de calor de los gases de escape; 10 Turbina y condensador de vapor, y generador.

de los gases de escape mediante un cambiador de calor, que se emplea para precalentar el agua de alimentación del generador de vapor, lográndose así una mejora adicional en el rendimiento del ciclo.

Una de las instalaciones piloto de este género se encuentra en Malmö, Suecia, y desarrolla 15 MW. Fué desarrollada conjuntamente por Deutsche Babcock, Stal-Laval, Asea-Atom, y la empresa eléctrica Sydkraft. Con esta planta piloto se ensayaron componentes y sistemas destinados a plantas a escala comercial, a fin de poder desarrollar una unidad standard de central eléctrica de 345 MW, en la que la turbina de vapor desarrolla 270 MW y la turbina de gas 75 MW. Este tipo de central alcanza un rendimiento térmico global que supera el 40 por 100.

5. BIO-TURBO-CALDERA PARA COMBUSTIBLES CON ELEVADO GRADO DE HUMEDAD

Una aplicación, en la que se combina un lecho fluidificado con turbinas y cambiadores de calor, se tiene en la bio-turbo-caldera.

Cuando se queman combustibles húmedos, los gases de combustión adquieren una buena parte del contenido energético en forma de vapor de agua. En el caso de la turba, el secado constituye el problema esencial.

Se suele considerar infactible el quemar turbas con un contenido en humedad superior al 50 por 100. En general, se desea tener contenidos en humedad más bajos para tener una potencia calorífica aceptable. En la obtención de la turba molida, que hoy día es el principal método de explotación, se seca la turba sobre el propio terreno pantanoso. Ello trae consigo, en muchas regiones donde la extracción queda reducida por el clima a unos 40 ó 50 días al año, elevados costes, así como problemas de organización de la explotación. Por ello se tiende a una deshumectación mecánica, que permita una extracción de la turba durante un período mayor al año.

En la bioturbocaldera se ha desarrollado un método para enfriar de forma efectiva los gases de combustión, de forma que su vapor de agua condense, aprovechándose su calor laten-

te de vaporización. Una bioturbocaldera puede llegar a utilizar turbas con hasta el 80 por 100 de humedad, dando un rendimiento calorífico entre un 25 y un 30 por 100 superior al de la combustión de la turba molida en calderas convencionales.

El sistema incluye dos turbocompresores (un turbo de baja presión y otro de alta presión), una cámara de combustión y un refrigerador. El aire necesario para la combustión se presuriza mediante ambos compresores. En la combustión se obtienen gases calientes que mueven en primer lugar la turbina de alta presión. En el refrigerador de condensación se enfría el gas de combustión hasta la temperatura de retorno del agua caliente. Finalmente, en la turbina de baja presión se reduce la presión hasta alcanzar la presión atmosférica y la temperatura de los gases desciende muy por debajo de la temperatura de retorno del circuito de agua caliente.

Este proceso extrae la energía en dos etapas. En el refrigerador de condensación se extrae la gran parte de la energía al enfriar los humos de combustión. Gracias a la sobrepresión condensa prácticamente la totalidad del vapor de agua contenido en los gases de combustión y su calor latente se transmite también al circuito de agua caliente. En la última turbina se extrae la energía a una temperatura más baja que la del retorno del agua caliente y se utiliza para presurizar el aire en la admisión.

Lo más interesante desde el punto de vista de la técnica energética es la disposición de todo un sistema alrededor del refrigerador de condensación, que trabaja en sobrepresión. Hasta el momento, el principal esfuerzo en el desarrollo de este tipo de calderas para combustibles con elevado grado de humedad, se ha centrado en la propia condensación de los humos de combustión.

6. AHORRO ENERGETICO MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO TERMICO EN LAS PLANTAS DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Otro ejemplo de integración de diversas técnicas es el de un nuevo tipo de aprovechamien-

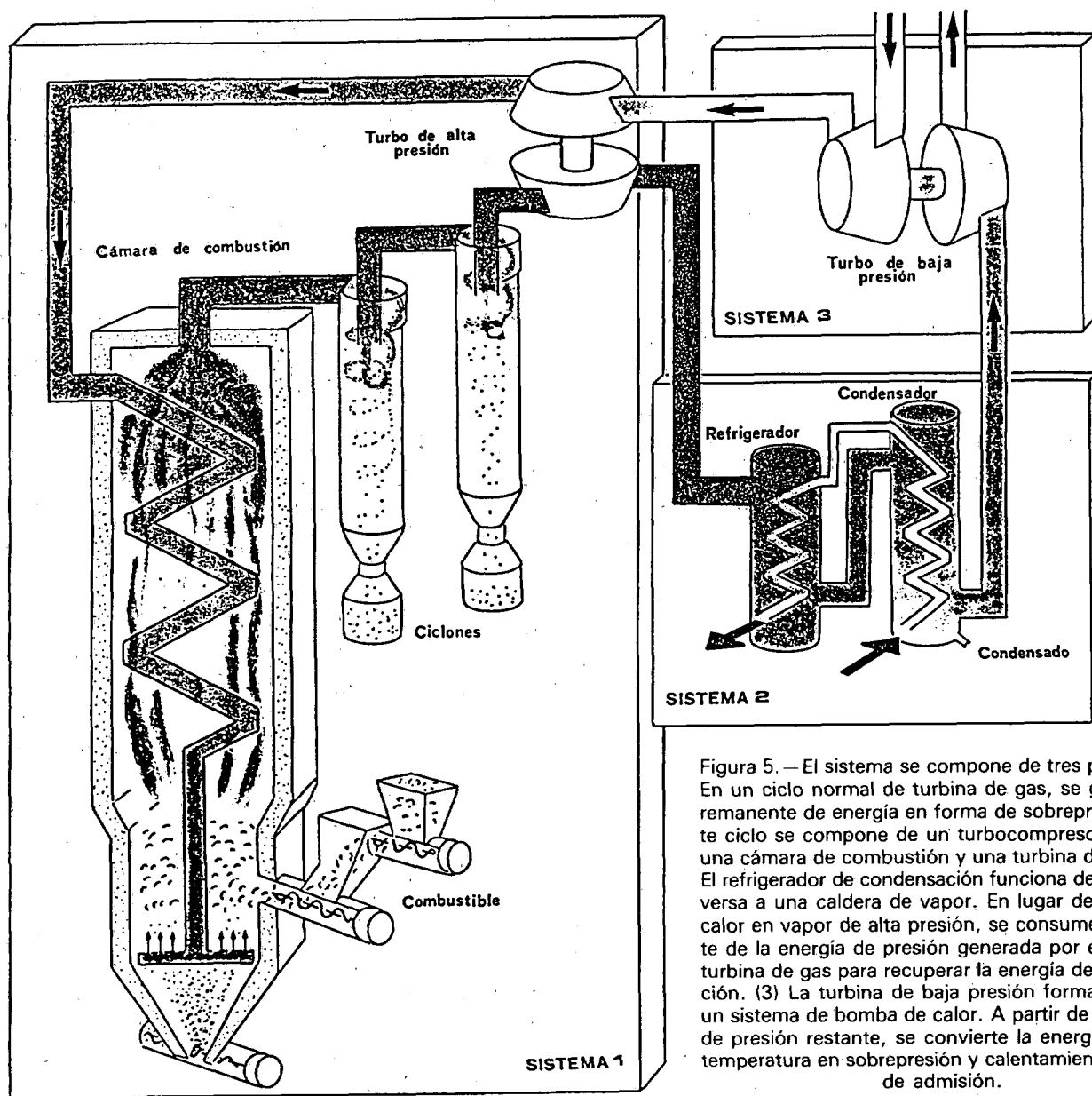


Figura 5. — El sistema se compone de tres partes: (1) En un ciclo normal de turbina de gas, se genera un remanente de energía en forma de sobrepresión. Este ciclo se compone de un turbocompresor de alta, una cámara de combustión y una turbina de alta. (2) El refrigerador de condensación funciona de forma inversa a una caldera de vapor. En lugar de convertir calor en vapor de alta presión, se consume una parte de la energía de presión generada por el ciclo de turbina de gas para recuperar la energía de vaporización. (3) La turbina de baja presión forma parte de un sistema de bomba de calor. A partir de la energía de presión restante, se convierte la energía de baja temperatura en sobrepresión y calentamiento del aire de admisión.

to térmico para estaciones depuradoras de agua. El sistema se basa en el hecho de aprovechar en tres etapas el calor generado en dichas plantas depuradoras de agua residuales.

En el agua residual de una depuradora, existe un contenido calorífico que excede ampliamente el consumo energético del acondicionamiento de aire (calefacción) de la planta. La temperatura del agua se encuentra, en general, sólo algunos grados por debajo del nivel de temperatura que se desea mantener en el local. Las necesidades de renovación de aire son, sin embargo, muy elevadas, de 4 a 6 veces por hora,

por lo que el principal coste de la calefacción está en el calentamiento del aire exterior en invierno, hasta la temperatura interior. La forma más adecuada de suministrar este calor al local es, por lo tanto, a través del aire de ventilación.

Con este nuevo sistema se aprovecha el calor residual del agua a depurar, de modo que el consumo primario de energía puede reducirse desde unos 880 kWh/m² de superficie del local y año (que se tiene en ciertos países de clima frío en los que se ha experimentado el sistema), hasta sólo unos 70 kWh/año de ener-

gía eléctrica para mover las bombas y ventiladores necesarios, es decir, lográndose un ahorro superior al 90 por 100.

Este proceso, que consiste en ceder todo el calor al aire de ventilación entrante, se halla ilustrado en la figura 6.

En invierno, el aire frío exterior a -20°C , se precalienta primero hasta -6°C , mediante el intercambio directo de calor con el agua residual. Este agua residual se encuentra a una temperatura de unos $+10^{\circ}\text{C}$, lo que permite obtener una efectiva superficie de intercambio de calor.

El paso siguiente es el intercambio de calor entre el aire entrante y saliente en un doble cambiador de calor de tipo plano y flujo cruzado, totalmente construido en plástico. Gracias al precalentamiento de la primera etapa y al dimensionamiento del cambiador de calor aire/aire, nunca podrá la temperatura del aire descender por debajo de los 0°C , con lo que la instalación queda a salvo de posibles roturas por congelación. Sin embargo, el descenso de temperatura en el aire saliente es lo suficientemente acusado para que se produzca la condensación de su humedad, lo que aumenta el rendimiento.

En la tercera etapa se utiliza el agua residual a $+10^{\circ}\text{C}$ para elevar la temperatura del aire

entrante desde alrededor de $+8^{\circ}\text{C}$ hasta cerca de $+25^{\circ}\text{C}$ con la ayuda de una bomba de calor.

Todas estas temperaturas citadas se refieren a una temperatura ambiente exterior de proyecto, que se toma igual a la del período más frío del año. Para un flujo de ventilación típico como son unos $22.000\text{ m}^3/\text{h}$ (equivalentes a un local con volumen de aire de unos 4.000 a 5.000 m^3), se transfiere al aire entrante en la primera etapa una potencia calorífica de alrededor de 130 kW con ayuda de sólo 2 kW de potencia de bombeo. En la segunda etapa se toman unos 60 kW del aire de ventilación saliente empleando para ello una potencia despreciable. Los ventiladores, no obstante, son siempre necesarios y la mayor parte de su potencia se requiere al tener que vencer una caída de presión necesaria para obtener una distribución del aire entrante y saliente.

La bomba de calor transfiere al aire, en la tercera etapa unos 125 kW , de los cuales alrededor de 100 kW se extraen del agua residual, mientras que los 25 kW restantes se consumen en forma de corriente eléctrica. Esto se hace posible gracias a que el sistema de baja temperatura elegido requiere un incremento relativamente pequeño en la bomba de calor, desde unos $+5^{\circ}\text{C}$ hasta unos $+30^{\circ}\text{C}$. Con ello el factor térmico alcanzado es de 5.

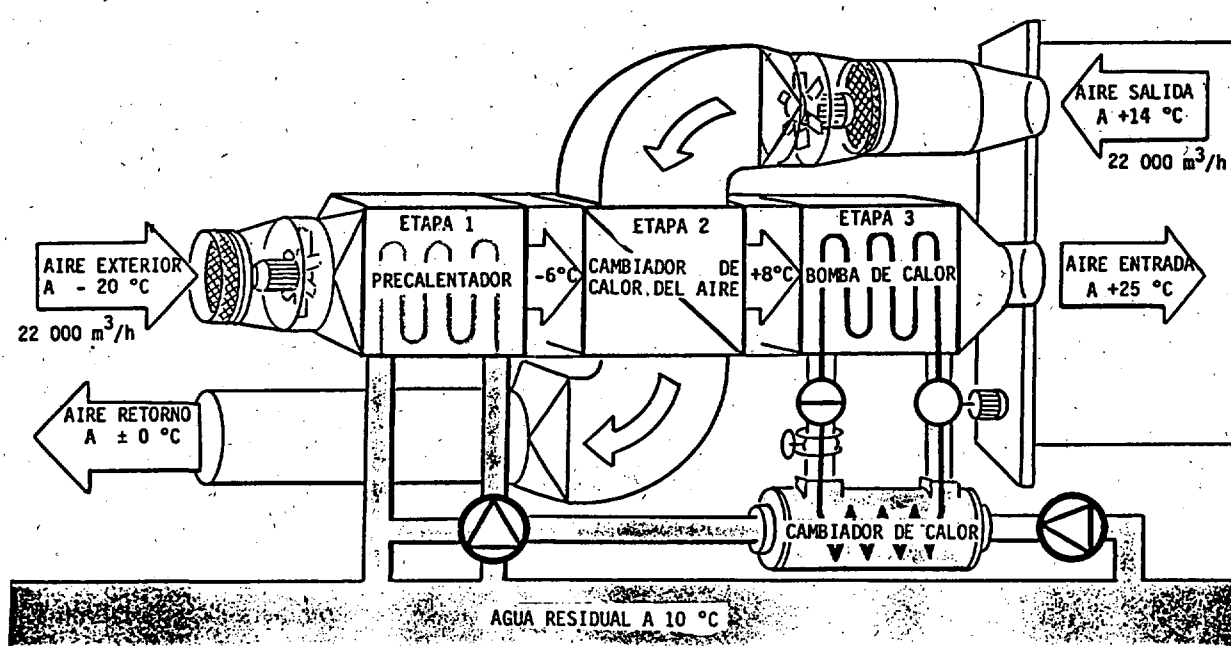


Figura 6. — Aprovechamiento del calor residual en una planta depuradora de agua.

En total se suministran a la planta depuradora cerca de 315 kW de los que solamente 27 kW lo son en forma de potencia eléctrica. El «factor térmico» global de toda la instalación supera en consecuencia el valor de 11. El sistema es posible montarlo en taller, lográndose una instalación sencilla y de fácil montaje en la depuradora.

7. PRODUCCION DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE LA ENERGIA SOLAR CON UN MOTOR DE STIRLING

En el desierto de Mojave de California se halla una central eléctrica solar constituida por un concentrador de rayos solares, un motor de Stirling y un generador eléctrico. El sistema ha mostrado tan buenos resultados de funcionamiento que parece razonable suponer que su implantación a escala comercial se abrirá final-

mente camino en los próximos años. Con un rendimiento del 29 % de energía eléctrica generada a partir de la energía de radiación solar captada, esta central energética supera en la actualidad rotundamente a otros tipos de convertidores termosolares de energía.

El motor de Stirling de la instalación, cuyo rendimiento resulta decisivo para la competitividad económica del sistema fue desarrollado y modificado para adaptarlo al funcionamiento con energía solar en el laboratorio de United Stirling AB en Malmö, Suecia, tras más de 14 años de experimentación.

Un motor de Stirling, cuyo funcionamiento se basa en una cesión de calor externo a un sistema cerrado de un gas de trabajo, puede de hecho funcionar con cualquier fuente de energía, supuesto que el calor le sea transmitido a una temperatura suficientemente elevada. En la búsqueda de fuentes alternativas de energía, el De-

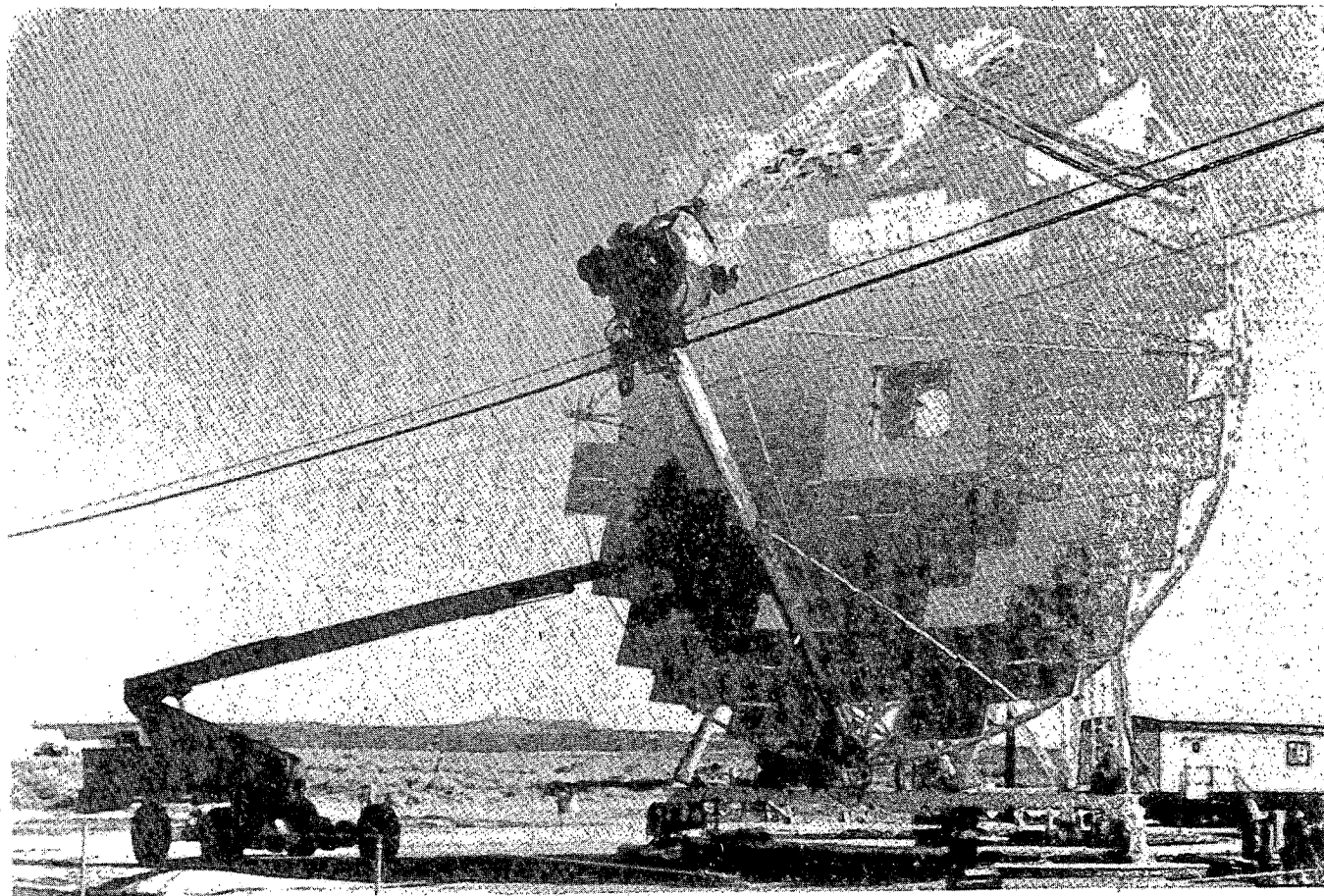


Figura 7.— Con ayuda de un espejo, un generador y un motor de Stirling, se comenzó en 1981 a generar diariamente 250 kWh en una Central Solar en el Desierto de Mojave de California.

partamento de Energía de los Estados Unidos comenzó a mostrarse, ya a fines de la década de los 70, interesado por el proyecto basado en el motor de Stirling. Ello condujo a la construcción, en el verano de 1981, de la primera instalación Stirling-solar en el campo de experiencias que el Jet Propulsion Laboratory (JPL) tiene en la Base Aérea Edwards del Desierto de Mojave.

Un espejo parabólico, orientable sobre su pedestal, va siguiendo la trayectoria del sol y concentra sus rayos hacia el motor de Stirling situado en su foco. Este motor de Stirling a su vez mueve un generador eléctrico.

El motor de Stirling, inicialmente pensado para la tracción en automóviles, se transformó en un motor solar completándose con:

- Un sistema modificado de captación y calentamiento para la energía solar.
- Una adaptación de su sistema de lubricación que le permite una movilidad de 180°.
- Un sistema de regulación para su funcionamiento con energía solar.

Como se ha señalado, los resultados obtenidos de los ensayos realizados por el JPL son sumamente positivos.

Con un diámetro del espejo de 11 m, y un generador trifásico dicho motor logró generar en un día 250 kWh, con una potencia máxima de 23,5 KW eléctricos. Este rendimiento medido en el sistema que fue del 29 %, hay que compararlo con su más próximo competidor, los paneles o células solares que tienen del 10 al 12 %.

La introducción comercial de pequeñas y relativamente baratas centrales solares en regiones con elevada insolación anual, podría convertirse en una realidad dentro de algunos años.

Integrado en una construcción modular de unos 100 o más módulos, podría este sistema proporcionar una buena parte del suministro eléctrico en zonas rurales con abundante radiación solar.

Instalaciones de menor tamaño, en cambio, tendrían aplicación para cubrir las necesidades de corriente eléctrica en núcleos de población en zonas áridas o desérticas y/o utilizarse para

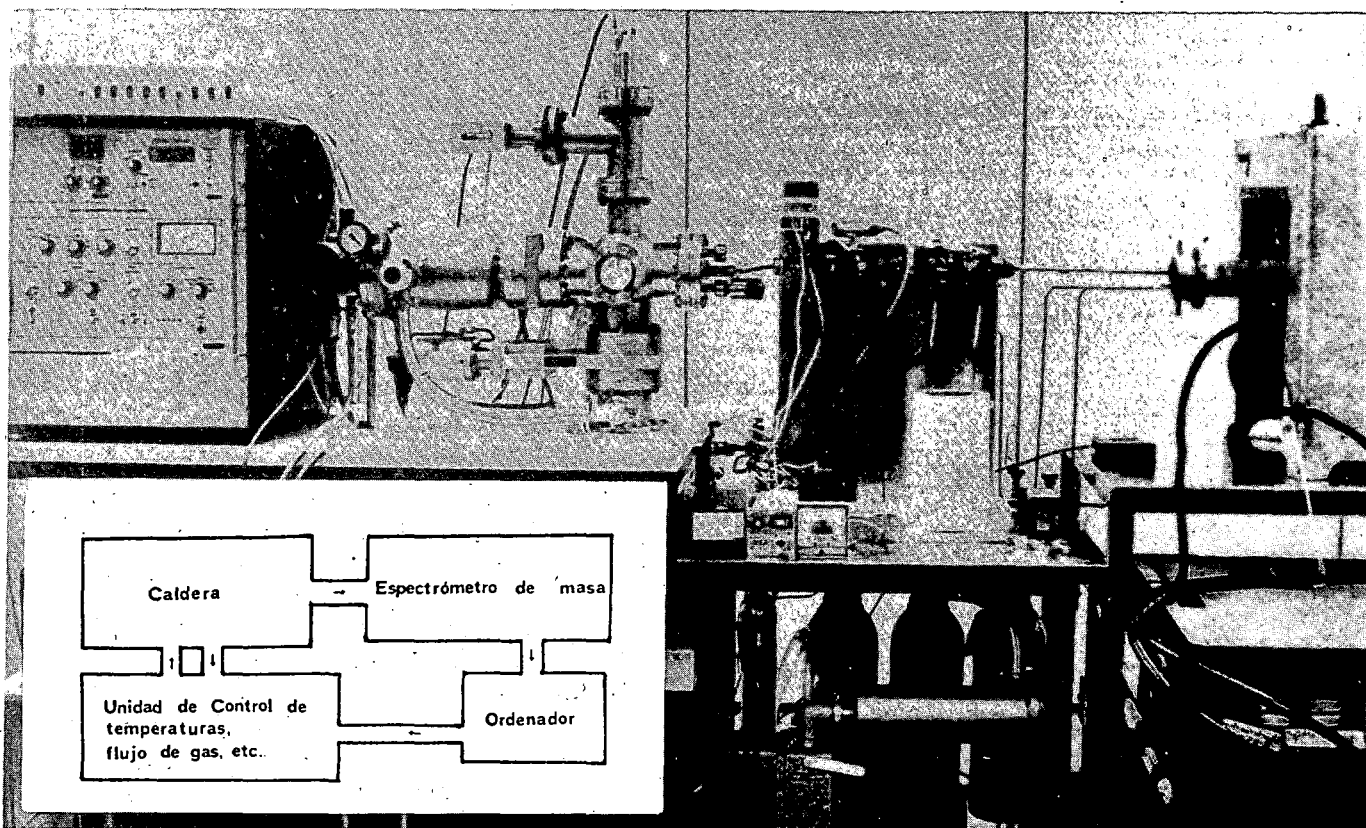


Figura 8.—Instalación del espectrómetro de masa para el control del medio gaseoso.

instalaciones de bombeo de agua en planes de puesta en regadio de tierras.

8. CONTROL DE UN MEDIO GASEOSO MEDIANTE UN ESPECTROMETRO DE MASA

En diversos tipos de tratamiento térmico de metales como son por ejemplo, los procesos de sinterización, así como en las reacciones de combustión de muy diversas sustancias, la efectividad del proceso está directamente influida por los gases que se encuentra en el medio ambiente. El control más perfecto de esta atmósfera gaseosa permite, pues, en unos casos obtener una considerable mejora en los productos tratados, y en otros casos, como son los de las calderas y generadores de vapor de las centrales térmicas de combustible fósil, un considerable ahorro de combustible.

¿Cómo puede pues controlarse y modificarse dicho medio gaseoso? La utilización de la espectrometría de masa constituye un camino, seguido con éxito en el Departamento de Física de Superficies de la Escuela Técnica Superior Chalmers de Gotemburgo, Suecia. Ello se debe a que un espectrómetro de masa es capaz de identificar cantidades muy pequeñas de gas, tales como vapor de agua, o monóxido de carbono, en una superficie del hogar de la caldera o alrededor de una llama.

El tratamiento térmico de metales está sometido a muy diversas condiciones. Los gases alrededor del metal que se trata son en parte productos de reacciones químicas entre partículas de la superficie del metal, o de sustancias ligantes, etc., que hayan podido haber sido añadidas deliberadamente a dichos gases.

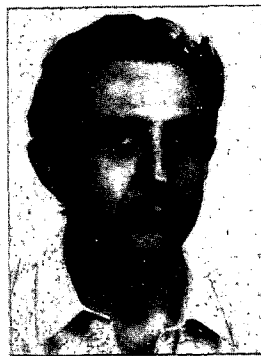
Frecuentemente bastará controlar la concentración de uno o unos pocos gases para que el proceso se verifique de la forma más efectiva posible. Mediante el almacenamiento de información suficiente acerca de la composición gaseosa más adecuada en la memoria de un ordenador y luego realizar una toma continua de

muestras con el espectrómetro de masa, se llega entonces a controlar totalmente el proceso.

Este sistema ha comenzado actualmente a utilizarse para el control de la combustión en calderas que queman diversos combustibles como fuel-oil, carbón o turba.

Incluso compuestos que existen tan solo durante períodos muy cortos de tiempo durante la combustión, denominados radicales, influyen en la efectividad del proceso. Para estudiar su influencia, sobre todo en motores de combustión interna, han desarrollado algunos constructores, como AB Volvo, un tipo especial de espectrómetro de masa. Este se distingue de los convencionales en el que su boquilla para la toma de muestras está diseñada de modo que disperse mejor las moléculas, minimizando las colisiones con dichos radicales muy reactivos. Asimismo, se ha desarrollado un dispositivo de control que permite la entrada en el espectrómetro de las moléculas radicales a intervalos prefijados de tiempo, es decir, realizando una modulación del análisis. De este modo se consigue una relación señal-ruido considerablemente más favorable.

Domingo-Enrique Pallarés Huici



Obtiene el título de Ingeniero de Caminos en 1973 y el de doctor Ingeniero en 1980, ambos en la Escuela de Madrid. Tras trabajar como Ingeniero de E.A.S.A. en el proyecto de la obra civil de las centrales Nucleares de Cofrentes y Valdecaballeros, y desempeñar tareas docentes e investigadoras en el Departamento de Cálculo Numérico y Matemática Aplicada de la E.T.S. de

Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Valencia, y en el Departamento de Estructuras de la Universidad Técnica Chalmers de Gotemburgo, Suecia, formó parte del Departamento Mecánico de la Empresa AB ASEA ATOM de Västerås, Suecia, hasta 1983, como ingeniero de la Sección de Cálculo de Componentes Internos del Reactor. Actualmente es Catedrático Numerario de la Universidad Politécnica de Valencia, donde imparte clases de Sistemas Energéticos e Ingeniería Civil de Centrales en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.