

ETDE-MX--99749051

IIE Bulletin.
Selected articles from 1998 issues of 'boletin iie'

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

Imágenes generadas por ultrasonido

Valery Francisco Godínez y Miguel
Angel Marcial

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio realizado con la finalidad de establecer una técnica ultrasónica no destructiva para evaluar el estado de adherencia de interfaces sólido-sólido. Una aplicación importante de dicha técnica es la inspección no destructiva de las soldaduras de bastones de cobre de los embobinados del estator de un generador de una central hidroeléctrica. El desarrollo de la técnica de inspección requirió del análisis de imágenes ultrasónicas de las soldaduras de dos muestras de bastones; dichas imágenes se generaron mediante un barrido ultrasónico tipo C (*C-scan*) usando un sistema integrado en el Laboratorio de Pruebas No Destructivas de la Unidad de Sistemas de Combustión del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). El análisis permitió establecer la configuración adecuada del equipo a utilizar en la inspección en sitio, los procedimientos de calibración del mismo y los criterios de aceptación/rechazo de las soldaduras a inspeccionar. Asimismo, se presenta una correlación entre los valores de

El Laboratorio de Pruebas No Destructivas del Instituto de Investigaciones Eléctricas ha integrado un sistema de inspección ultrasónica que permite, entre otras cosas, la generación de imágenes.

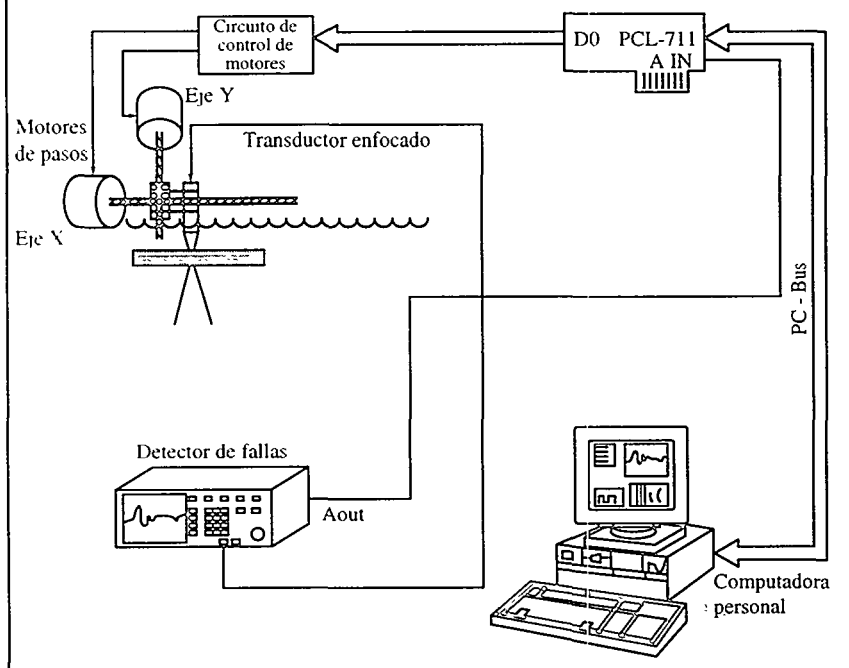
los coeficientes de reflexión ultrasónicos medidos en las soldaduras y los valores teóricos para la adherencia en la interfaz sólido-sólido predichos por un modelo simple de interfaz imperfecta. Estos resultados son un primer paso en la caracterización cuantitativa de uniones sólido-sólido, que aunado a futuros desarrollos tendría un impacto tecnológico inmediato en la determinación del estado de soldaduras por fricción, soldaduras con aporte de metal fundido y grado de adherencia de recubrimientos sobre estructuras expuestas a condiciones que inducen corrosión.

Introducción

El Laboratorio de Pruebas No Destructivas del Instituto de Investigaciones Eléctricas ha integrado un sistema de inspección ultrasónica que permite, entre otras cosas, la generación de imágenes [Marcial y Godínez, 1996]. Dicho sistema, mostrado esquemáticamente en la figura 1, consiste de un subsistema de posicionamiento controlado por una computadora personal, el cual puede realizar barridos automáticos en un plano con resolución de hasta 0.1 mm [Loera, 1995]. Asimismo, incluye un subsistema ultrasónico cuya función es excitar un transductor ultrasónico y recibir la señal procedente de la muestra; el número y tipo de transductores que se utilicen dependerá del material y del tipo de pruebas que se

FIGURA 1

Sistema de inspección ultrasónica y formación de imágenes con asignación de colores falsos desarrollado en el Laboratorio de Pruebas No Destructivas del Instituto de Investigaciones Eléctricas.



realicen. Para las aplicaciones que se describen en este trabajo se utilizó un detector de fallas marca Panametrics, modelo EPOCH IIB con salida analógica, lo que permite monitorear las señales con una computadora personal y almacenarlas en archivo de datos. El transductor ultrasónico utilizado es de frecuencia central de 5 MHz y banda ancha, enfocado a dos pulgadas en agua y se utilizó en el denominado modo pulso-eco; es decir, el transductor que emite la señal ultrasónica es también el que la recibe. Finalmente, el sistema ha sido complementado con el desarrollo de programas de cómputo tanto para el control del posicionamiento del transductor como para el análisis de los datos provenientes de la muestra y la visualización de los resultados. Para la aplicación que se describe más adelante se utilizó el barrido

denominado C (C-Scan), cuyo análisis consiste en la estimación del coeficiente de reflexión de alguna interfaz de la muestra; una vez realizada esta estimación, se asocia con las coordenadas del transductor. Si al coeficiente normalizado de reflexión se le asigna un color, por desplegarse en la pantalla de la computadora en la posición correspondiente al transductor, es posible formar imágenes de la muestra a medida que se realiza la inspección. Este tipo de imágenes son de uso común en el análisis ultrasónico de materiales, estructuras en fuselajes de aeronaves y detección de corrosión en tanques de almacenamiento.

Aplicaciones

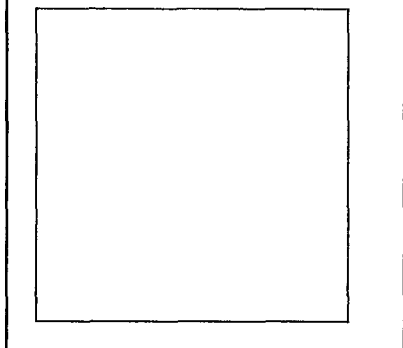
La figura 2 muestra la imagen ultrasónica de una moneda obtenida usando el sistema antes descrito y

Este tipo de imágenes son de uso común en el análisis ultrasónico de materiales, estructuras en fuselajes de aeronaves y detección de corrosión en tanques de almacenamiento.

utilizando como interfaz la cara de la moneda de frente al transductor. Sin embargo, podría seleccionarse también la cara posterior o alguna interfaz interna, si existiera, mediante el análisis de la porción de la señal reflejada, correspondiente a la interfaz seleccionada. Como ejemplo, en la figura 3 se presentan las imágenes de una muestra de cerámico fabricado a base de óxido de zirconia y alúmina obtenidas a diferentes frecuencias y en las cuales pueden observarse tanto las irregularidades de la superficie como algunas discontinuidades resultantes del proceso de fabricación.

Desde el punto de vista de inspección en campo, este sistema permitió el desarrollo de una metodología de inspección para la soldadura de los bastones de cobre de los embobinados del estator de un generador eléctrico. Para describir dicha metodología conviene señalar que los bastones de los embobinados del estator están soldados entre sí por medio de casquillos de cobre con una soldadura de alto contenido de plata, tal como se muestra en la figura 4. Dicha soldadura es calentada por medio de inducción y cuando alcanza el punto de fusión penetra en los intersticios que hay entre los componentes a soldar; si la penetración y adherencia no son adecuadas, entonces es posible que los valores requeridos para las propiedades eléctricas no se alcancen y se generen los denominados "puntos calientes", los cuales son indeseables para la operación

Figura 2. Imagen de una moneda obtenida con ultrasonido a una frecuencia de 25 MHz.



confiable del generador.

La determinación de las propiedades de interfaces sólido-sólido, utilizando ultrasonido, es uno de los problemas más importantes que se encuentran en evaluación no destructiva. Se ha demostrado que el coeficiente de reflexión de este tipo de interfaces depende fuertemente de las condiciones existentes en las mismas, por un lado, debido al cambio de microestructura en los medios de propagación y, por otro, debido a las posibles imperfecciones que puedan encontrarse en la interfaz entre los mismos. Algunas de estas imperfecciones se presentan como falta de fusión, soldaduras en frío o presencia de discontinuidades a lo largo de la interfaz misma [Nagy y Adler, 1991]. Una solución al problema de caracterización de discontinuidades en interfaces tendría un alto impacto tecnológico, ya que el desarrollo de un método para evaluar su estado encontraría aplicaciones inmediatas en problemas tales como la determinación del estado de soldaduras por fricción, soldaduras con aporte de material fundido, grado de adherencia de recubrimientos sobre tuberías, álabes y demás equipos expuestos a

Figura 3. Imágenes de una muestra de cerámico obtenidas a frecuencias de 10, 15 y 25 MHz.

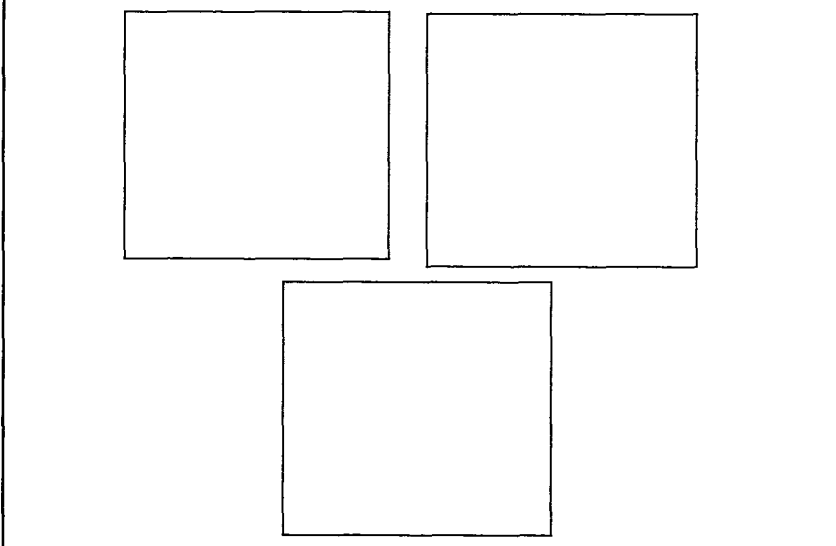
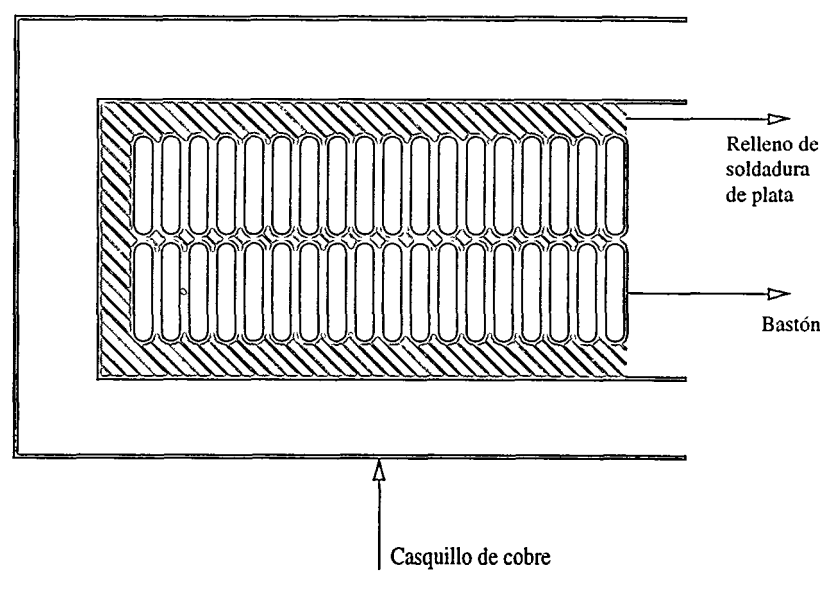


FIGURA 4

Diagrama esquemático del arreglo utilizado para las soldaduras de los bastones del estator del generador eléctrico.



condiciones que inducen corrosión, etcétera.

A la fecha no existe un método confiable para determinar el estado de interfaces sólido-sólido. Sin embargo, se tiene una serie de trabajos que reportan estudios tanto teóricos como experimentales en la

materia. Existen estudios de dispersión de ultrasonido por interfaces imperfectas rugosas sólido-sólido [Pecorari, 1992], estudios de las propiedades interfaciales en estructuras recubrimiento sustrato [Ko, R., 1993], así como estudios generales

Los resultados obtenidos utilizando el modelo de rigidez finita son de gran utilidad para el desarrollo de un método cualitativo de evaluación no destructiva para las soldaduras de los bastones del estator de un generador eléctrico.

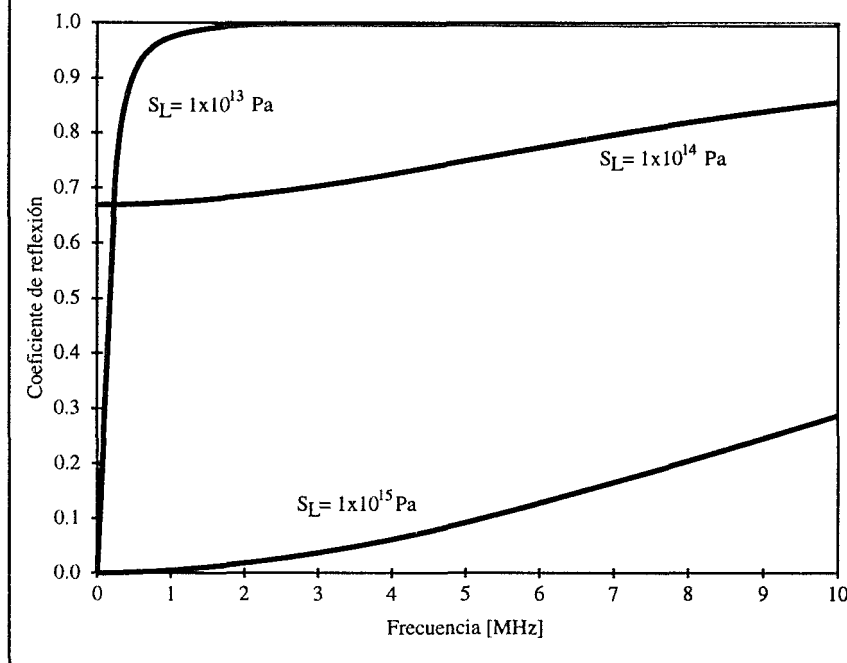
de propagación de ondas acústicas a lo largo de interfaces [Brekhovskiy, L.M., 1980; Farnell, G. y Adler, L., 1972]. Desde el punto de vista de aplicaciones tecnológicas, se han publicado trabajos en los cuales se reporta la evaluación ultrasónica de soldaduras de estado sólido (soldaduras por difusión, inercia y soldaduras por ultrasonido) [Nagy, P.B. y Adler, L. 1988; Adler, L. *et al.*, 1988; Thompson R.B. *et al.*, 1989; Adler, L. *et al.*, 1990] y de la adherencia en interfaces entre bases metálicas y recubrimientos anticorrosivos por medio de ondas de Rayleigh [Godínez, V.F. *et al.*, 1997].

El modelo más sencillo que intenta describir la interacción de ondas ultrasónicas con interfaces imperfectas es el llamado Modelo de Rigidez Finita [Baik, J.M. y Thompson, R.B., 1989]. En este modelo se supone la interfaz imperfecta entre dos medios como una región de espesor pequeño, comparado con la longitud de onda ultrasónica, caracterizada por las constantes de restitución S_L y S_T , de dos resortes orientados en las direcciones normal y paralela a la misma y que definen la rigidez de la interfaz.

Las condiciones de frontera entre los dos sólidos establecen que los esfuerzos tanto normales como tangenciales sean continuos en ambos lados de la interfaz, mientras existe una discontinuidad local en los componentes de los desplazamientos. El salto resultante en dichos desplazamientos es proporcional a

FIGURA 5

Coefficiente de reflexión de una interfaz cobre-cobre como función de la frecuencia para diferentes valores de rigidez interfacial.



las componentes de los esfuerzos correspondientes.

Los coeficientes de reflexión y transmisión se pueden calcular a partir de las ecuaciones resultantes de las condiciones de frontera para cualquier combinación de ondas acústicas longitudinales y transversales y para ángulos de incidencia arbitrarios. En el caso más simple, es decir, incidencia normal sobre una interfaz entre dos materiales similares, los coeficientes de reflexión, $R_{L,T}$, y transmisión, $T_{L,T}$, pueden expresarse como:

$$R_{L,T} = -\frac{i\omega}{\Omega_{L,T}} \quad [1]$$

$$T_{L,T} = \frac{1}{1 + \frac{i\omega}{\Omega_{L,T}}} \quad [2]$$

en donde los subíndices L y T corresponden al caso de ondas

longitudinales y transversales, respectivamente; i denota el número imaginario, $\sqrt{-1}$ ω la frecuencia angular de las mismas, y $\Omega_{L,T}$ es una frecuencia característica donde la interfaz cambia de aparentemente perfecta a una aparentemente delaminada y está relacionada con la rigidez de la misma, a través de:

$$\Omega_{L,T} = \frac{2S_{L,T}}{C_{L,T} \rho} \quad [3]$$

con $C_{L,T}$ las velocidades de propagación de la onda correspondiente y ρ la densidad del material.

Aplicando dicho modelo a una unión cobre-cobre que ha sido soldada con capa fina de soldadura con alto contenido de plata, se obtienen los valores del coeficiente de reflexión como función de la frecuencia para tres diferentes valores de rigidez de la interfaz (figura 5).

En el caso de $S_L = 1 \times 10^{13}$ Pa, el coeficiente de reflexión a frecuencias relativamente bajas, menores a 1 MHz, adquiere valores entre 0 y 0.8 y por encima de ese valor se aproxima rápidamente a 1.0. Es decir, el valor de S_L representa una interfaz que aunque presente contacto físico no tiene rigidez desde el punto de vista acústico. Bajo estas circunstancias, la respuesta de la interfaz a una onda acústica será una reflexión casi total, siempre y cuando se trate de frecuencias por arriba de los 2 MHz. Una interfaz que presenta este tipo de comportamiento puede clasificarse como una interfaz "sin adherencia". Cuando $S_L = 1 \times 10^{14}$ Pa, el valor del coeficiente de reflexión va de 0.68 hasta aproximadamente 0.80, dentro del intervalo de frecuencias escogido. Este comportamiento puede clasificarse como el de una interfaz con "adherencia aceptable". Finalmente, cuando $S_L = 1 \times 10^{15}$ Pa, el coeficiente de reflexión varía entre 0 y 0.25, lo cual indica que existe una buena transmisión de la onda acústica a través de la interfaz, por lo que puede ser clasificada como una interfaz con "excelente adherencia".

Desarrollo experimental

Los resultados obtenidos utilizando el modelo de rigidez finita son de gran utilidad para el desarrollo de un método cualitativo de evaluación no destructiva para las soldaduras de los bastones del estator de un generador eléctrico, ya que permite el establecimiento de un procedimiento de inspección en sitio, con lo cual es posible incrementar la confiabilidad y disminuir el tiempo de la reparación o rehabilitación [Robles *et al.*, 1997]. Si se escoge una frecuencia de inspección de 5 MHz, el cual es un valor cercano al de la

Aunque el modelo de rigidez finita representa de forma correcta el comportamiento cualitativo de la interfaz formada por la soldadura, es necesario desarrollar un modelo que tome en cuenta las dimensiones y características elásticas de la soldadura a fin de calificar cuantitativamente la interfaz.

frecuencia de transición Ω_L , se puede calcular el coeficiente de reflexión como función de la rigidez de la interfaz (figura 6).

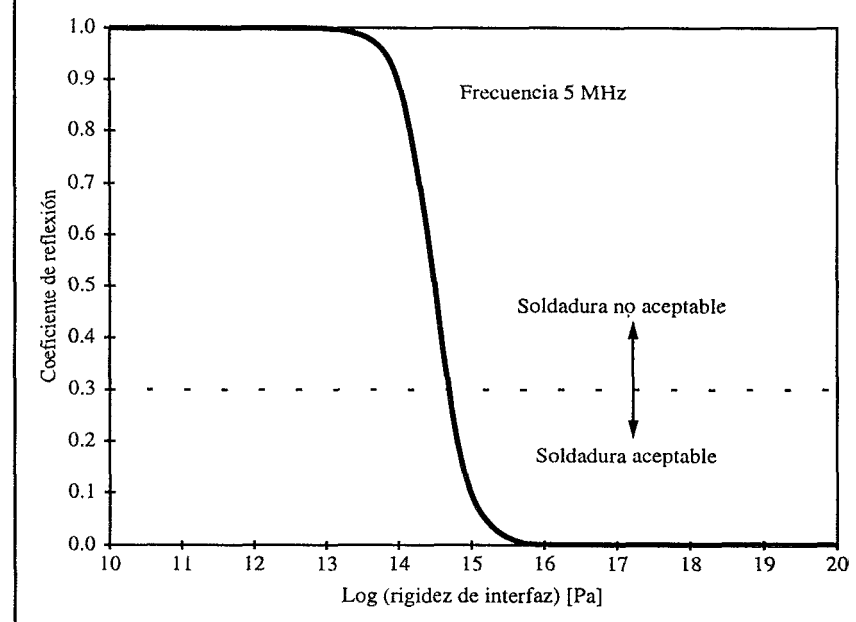
Para una interfaz con un valor teórico de rigidez por debajo de 1×10^{13} Pa, el coeficiente de reflexión tiene un valor de 1, es decir la energía de la onda ultrasónica es reflejada totalmente por la interfaz y la misma aparece como desoldada. Para valores teóricos de rigidez entre 1×10^{13} Pa y 1×10^{15} Pa, parte de la energía de la onda es reflejada y parte es transmitida a través de la

interfaz por lo que ésta aparece parcialmente soldada. Si el valor teórico de la rigidez de la interfaz está por encima de los 1×10^{15} Pa, la totalidad de la energía de la onda ultrasónica es transmitida a través de la interfaz y no hay reflexión alguna; es decir, la interfaz aparece como perfectamente soldada. En consecuencia, el procedimiento de evaluación de las soldaduras puede consistir simplemente en medir el coeficiente de reflexión en distintos puntos de la soldadura y de esta manera asignarle una "calidad". Si se mide el coeficiente de reflexión en la totalidad del área de la soldadura se obtiene la distribución de adherencias de la soldadura y es posible generar una imagen que represente el "mapa" de adherencias de la misma.

El trabajo experimental consistió en la obtención de imágenes con asignación de colores falsos de dos

FIGURA 6

Coeficiente de reflexión de una interfaz cobre-cobre como función de la rigidez interfacial para una onda acústica de frecuencia 5 MHz.



Desde el punto de vista de inspección en campo, este sistema permitió el desarrollo de una metodología de inspección para la soldadura de los bastones de cobre de los embobinados del estator de un generador eléctrico.

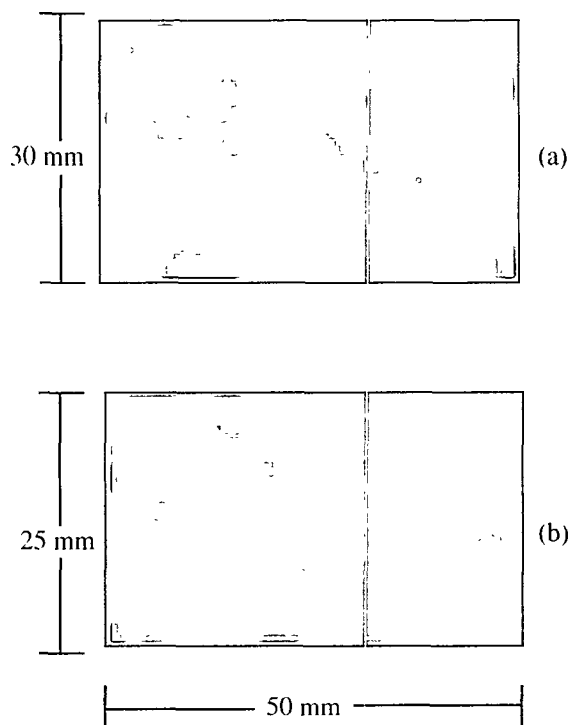
muestras de soldaduras caracterizadas eléctricamente con anticipación, a fin de conocer las diferencias en resistencia de contacto para correlacionarlas con la distribución de adherencias en las soldaduras.

Resultados y discusión

Las imágenes obtenidas en la inspección de las soldaduras caracterizadas eléctricamente se presentan en la figura 7. En ellas las zonas de tonos claros (e.g. gris claro y blancos) corresponden a zonas con baja adherencia entre el casquillo y el bastón, mientras que las zonas de tonos oscuros (negro y gris oscuro) corresponden a zonas con buena adherencia.

En la figura 7(a) se presenta la imagen de una soldadura con aproximadamente 40% de área con un coeficiente de reflexión menor a 0.3, mientras que en la figura 7(b) se muestra la imagen de una soldadura con aproximadamente 80% de área con un coeficiente de reflexión menor a 0.3. De acuerdo con mediciones de resistencia eléctrica de contacto realizadas en dichas soldaduras, se encuentra que el mayor porcentaje de área de contacto presenta también la menor resistencia eléctrica y viceversa. Dichos resultados permiten establecer un método de inspección ultrasónica, así como el criterio de aceptación o rechazo de soldaduras. El método de inspección propuesto consiste en llevar a cabo un rastreo discreto de la superficie de las

Figura 7. Barridos tipo C de dos soldaduras. (a) Soldadura con aproximadamente 40% de área de contacto. (b) Soldadura con aproximadamente 80% de área de contacto.



soldadura, dividiéndola en nueve secciones iguales de área, ligeramente mayores al área del transductor utilizado, que en este caso es un transductor de contacto con acoplamiento de vaselina o aceite mineral. El criterio de aceptación para las soldaduras establece que el valor máximo permitido para el coeficiente de reflexión es 0.3 y el área de la soldadura que debe presentar como máximo dicho valor es de 80% del área total. Mediante la aplicación de este criterio en la inspección ultrasónica de este tipo de soldaduras se asegura que la resistencia eléctrica de contacto será lo suficientemente pequeña para evitar la formación de puntos calientes en los devanados de un estator [Marcial *et al.*, 1996].

Conclusión

Este trabajo muestra la factibilidad de utilizar modelos matemáticos y técnicas de laboratorio para establecer métodos de inspección y criterios de aceptación para aplicaciones en campo. Es importante mencionar que aunque el modelo de rigidez finita representa de forma correcta el comportamiento cualitativo de la interfaz formada por la soldadura, es necesario desarrollar un modelo que tome en cuenta las dimensiones y características elásticas de la soldadura a fin de calificar cuantitativamente la interfaz. Por otro lado, la aplicación de técnicas como la de barrido C y la formación de imágenes en laboratorio sugiere que es posible transportar dichas técnicas a

aplicaciones en campo, siempre y cuando sea posible el desarrollo de posicionadores automáticos o semiautomáticos portátiles.

Referencias

Adler, L., P.B. Nagy y S. Rokhlin, *Nondestructive evaluation of solids state weld quality*, research report MR8807, Edison Welding Institute, 1988.

Adler, L., M. de Billy, G. Quentin, M. Talmant y P.B. Nagy, "Evaluation of friction welded aluminum-steel bonds using dispersing guided modes of a layer substrate", *J. Of Appl. Phys.*, 68 (12), pp. 6072-6076, 1990.

Baik, J.M. y R.B. Thompson, "The elastic compliance of imperfect interfaces: review and relationship to ultrasonic scattering", *J. Nondestr. Eval.* 4, pp. 177-196, 1989.

Brekhusvskikh, L.M., *Waves in layer media*, Academic Press, Nueva York, 1980.

Farnell, G.W. y E.L. Adler, "Elastic wave propagation in thin layers", en *Physical Acoustics*, vol. IX, pp. 35-127, Academic Press, Nueva York, 1972.

Godínez Azcuaga, V.F., M. A. Marcial Amaro, J. Porcayo-Calderón y O. Mayorga Martín, "Ultrasonic characterization of nickel-chromium-base anticorrosive coatings", para publicarse en *Review of Progress in QNDE*, vol. 17, 1997.

Ko, R., *Ultrasonic evaluation of interfacial properties in imperfect anisotropic layer-substrate*, tesis doctoral, The Ohio State University, 1993.

Loera, G., *Detección y caracterización de discontinuidades en materiales metálicos utilizando ultrasonido*, tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Celaya, 1995.

Marcial Amaro, M.A., V.F. Godínez Azcuaga, S.R. Salazar Cruz, A. Aguilar Soto, A. Martínez Aguilar, E. Brito Figueroa y M.R. Nava Alaniz, *Inspección no destructiva de componentes del estator de la U-2 de la C.H. Carlos Ramírez Ulloa, "El Caracol", Guerrero*, reporte interno IIE/12/10027/SER/96, 1996.

Marcial, M.A. y V.F. Godínez, "A low cost C-scan system", *Review Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*,

vol. 16, Plenum Press, Nueva York, 1996.

Nagy, P.B. y L. Adler, "Ultrasonic NDE of solid-state bonds: inertia and friction welds", *J. of Nondestructive Evaluation*, vol. 7, núm. 3/4, 1988.

Nagy, P.B. y L. Adler, "Reflection of ultrasonic waves at imperfect boundaries", *Review of Progress, en QNDE*, vol. 10, pp. 177-184, 1991.

Pecorari, C., *Scattering of ultrasonic waves from rough imperfect solid-solid interfaces*, tesis doctoral, The Ohio State University, 1992.

Robles Pimentel, E. y J. García Hernández, "Rehabilitación del generador de la unidad 2 de la central hidroeléctrica Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa", en *Boletín IIE*, vol. 21, pp. 236-243, 1997.

Thompson, R.B., O. Buck, D.K. Rebhein, F.J. Margetan y T.A. Gray, *Ultrasonic nondestructive evaluation of solid-solid bonds*, IEEE, 1989 Ultrasonic Symposium, pp. 1117-1123, 1989.

VALERY FRANCISCO GODÍNEZ AZCUAGA



Físico por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (1987); maestro (1993) y doctor (1995) en evaluación no destructiva por The Ohio State University, Estados Unidos, ingresó en 1987 al IIE a la Unidad de Sistemas de Combustión. Sus áreas de especialidad versan sobre la evaluación no destructiva, la propagación de ondas mecánicas en sólidos y el análisis de señales digitales. En 1988 obtuvo el primer lugar en el Certamen Nacional de Tesis en fenómenos de transporte.

Ha tenido estancias técnicas en la Compañía de Electricidad de Francia (EDF) en el área de evaluación no destructiva en centrales nucleares y ha tomado cursos del Programa Regional de Ensayos No Destructivos para América Latina y el Caribe, patrocinado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Desde 1996 pertenece al Sistema Nacional de Investigadores.

MIGUEL ANGEL MARCIAL AMARO



Ingeniero en comunicaciones y electrónica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) (1991). Ese mismo año ingresó al IIE a la Unidad de Sistemas de Combustión, en donde ha trabajado en la evaluación no destructiva de componentes de centrales de generación y refinería de Petróleos Mexicanos. Durante 1991 tuvo una estancia técnica en la compañía acerera Dofasco, Inc., en Ontario, Canadá, proyecto que auspiciaron el Instituto Canadiense de Ensayos No Destructivos y la ONU. También tomó parte en cursos de capacitación en México y en el extranjero, como en el Programa Regional de Ensayos No Destructivos para América Latina y el Caribe, patrocinado por la ONU.

Necesidad de la determinación de la alcalinidad en la caracterización de la lluvia

Mahendra Pal Verma

Resumen

En este trabajo se presenta la medición de la alcalinidad y la determinación de las especies carbónicas en las aguas de lluvia por el método de la titulación de Gran. Los valores de alcalinidad obtenidos por este método en las aguas de baja conductividad eléctrica son bastante confiables. Asimismo, se discuten los estudios existentes sobre la caracterización de la lluvia ácida en la república mexicana.

Los problemas ambientales son más severos cada día y requieren mayor atención para entenderlos y controlarlos, con el objetivo de mantener la vida sobre el planeta Tierra.

Introducción

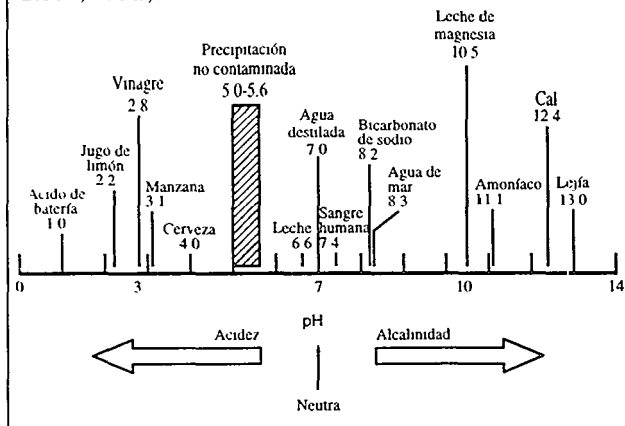
Los problemas ambientales son más severos cada día y requieren mayor atención para entenderlos y controlarlos, con el objetivo de mantener la vida sobre el planeta Tierra. Uno de ellos es la lluvia ácida que afecta de diversa manera la flora terrestre, la agricultura, los cuerpos de agua, la flora y fauna acuática, los suelos, los mantos de aguas subterráneas, las estructuras, los edificios y los monumentos históricos [Páramo *et al.*, 1987].

La lluvia que se forma en una atmósfera limpia generalmente tiene cierta acidez causada por la disolución de CO_2 atmosférico. Este proceso ocasiona que el pH del agua de lluvia tenga valores dentro de un rango entre 5 y 5.6 (figura 1). Esta ligera acidez que se produce a causa del bióxido de carbono presente en la atmósfera en forma de ácido carbónico no se ha considerado como el fenómeno de la lluvia ácida.

La industrialización ha provocado la emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera. Entre las más importantes se encuentran los hidrocarburos, el monóxido de carbono, el bióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, compuestos con elementos metálicos, el clorofluorocarbono, el ozono, etcétera. Algunos de estos contaminantes, en particular los óxidos de azufre y de nitrógeno, en presencia de humedad atmosférica dan lugar a reacciones químicas que producen ácidos, principalmente sulfúrico (H_2SO_4) y nítrico (HNO_3), originando así, la lluvia ácida, uno de los problemas

FIGURA 1

Los valores de pH para sustancias comunes (tomado de Elson, 1992).



ambientales de las grandes urbes. Este proceso origina un decremento del pH hasta valores que fluctúan entre 5 y 3, y que incluso en algunos casos pueden ser menores.

Los daños ocasionados al medio ambiente han sido una preocupación constante en el mundo entero, por lo que se han dedicado enormes esfuerzos para conocer las causas sobre la formación de las lluvias ácidas y los mecanismos para reducirlas.

Como se mencionó anteriormente, la acidez en la lluvia la provocan fundamentalmente dos especies (SO_4^{2-} y NO_3^-), los cuales pueden producirse por proceso de óxido-reducción del H_2S y SO_2 (para formar SO_4^{2-}) y NO_x (para dar NO_3^-). La acidez de lluvia referida como exceso del catión hidrógeno (H^+) es normalmente balanceada por los aniones mayores de sulfato, nitrato, bicarbonato y cloruro. La distribución espacial y temporal de las concentraciones químicas e isotópicas puede usarse para definir la fuente de acidez en las lluvias (Verma, 1995).

En el monitoreo químico de las lluvias se contempla la determinación de los componentes químicos como los aniones, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^- ; los cationes mayores, NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; y el pH tanto en sitio como en laboratorio. El análisis de Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- se efectúa por cromatografía líquida, mientras que el Na^+ , el K^+ , el Ca^{2+} y el Mg^{2+} se analizan por absorción atómica. La determinación del NH_4^+ se realiza por medio del electrodo de ion selectivo.

El pH de la lluvia se ha considerado como un parámetro fundamental para la caracterización de la lluvia ácida, pero cabe señalar que la medición del pH por medio de un potenciómetro en las aguas de lluvia no representa valores muy confiables [Galster, 1991]; asimismo, el pH también depende del contenido del CO_2 disuelto; por otra parte, la disminución del pH por aumento de la concentración del CO_2 no se considera como consecuencia de la formación de la lluvia ácida. De esta manera, la determinación del pH no es suficiente para la caracterización de la lluvia; se requiere determinar la alcalinidad (o acidez) respecto al punto equivalente de CO_2 para la caracterización de la lluvia.

Química de sistema carbónico

Como se mencionó anteriormente, el efecto de alteración del contenido de los componentes menores de la atmósfera ha modificado las condiciones climatológicas enormemente. El ciclo de CO_2 se ha alterado por

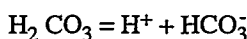
El pH de la lluvia se ha considerado como un parámetro fundamental para la caracterización de la lluvia ácida, pero cabe señalar que la medición del pH por medio de un potenciómetro en las aguas de lluvia no representa valores muy confiables.

actividades humanas como combustión de combustibles fósiles y la deforestación. La consecuencia de esto ha sido un aumento notable de la concentración de CO_2 en la atmósfera. La química del sistema carbónico está documentada ampliamente en los libros de texto [Stumm y Morgan, 1981; Pankow,

1994]. En este trabajo se presenta un resumen relevante sobre tales conceptos.

El CO_2 disuelto en el agua existe en forma $\text{CO}_{2(\text{ac})}$ y H_2CO_3 . El CO_2 mismo no es ácido o base, pero cuando el ácido carbónico H_2CO_3 disocia, el CO_2 se convierte en ácido carbónico. De este modo, en las reacciones de ácido-base la suma de CO_2 y H_2CO_3 se considera como ácido no disociado y se representa con una especie hipotética H_2CO_3^* . Así, una solución acuosa de CO_2 contiene cinco especies: H^+ , OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} y H_2CO_3^* . Para definir el sistema completamente se requiere de cinco ecuaciones.

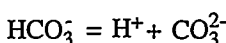
El ácido H_2CO_3 se disocia en los iones bicarbonato e hidronio como lo muestran las reacciones siguientes:



La constante de equilibrio es la siguiente:

$$K_1 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \quad [1]$$

El ion bicarbonato se disocia formando ion carbonato:



$$K_2 = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad [2]$$

En todas las soluciones acuosas existe la disociación de agua:



El balance de masa para las especies carbónicas:

$$C_T = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad [4]$$

El balance de protones para la solución de ácido carbónico:

$$[\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] \quad [5]$$

Se puede obtener la ecuación para el ion hidronio por

las ecuaciones 1 a 5:

$$[H^+]^4 + K_1[H^+]^3 + (K_1K_2 - C_TK_1 - K_w)[H^+]^2 - (K_1K_w + 2C_TK_1K_2)[H^+] - K_1K_2K_w = 0 \quad [6]$$

Para una concentración C_T dada, esta ecuación se puede resolver para el ion hidronio (o pH) por el método numérico de errores y pruebas. Substituyendo el valor de $[H^+]$ en las ecuaciones 1 a 5 se puede calcular la concentración de todas las especies, H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} y OH^- . La figura 2(a) muestra la variación de la concentración de las especies en función del pH para una solución carbónica. La figura 2(b) presenta una curva característica de titulación para este sistema.

La variación del pH por disolución de varios ácidos como HCl , HNO_3 , H_2SO_4 y H_2CO_3 (o CO_2 disuelto) en agua se observa en la figura 3. Se ve claramente entonces que la disolución de CO_2 afecta el pH de la lluvia. Posteriormente se discutirá que la disolución de CO_2 altera la alcalinidad con respecto al punto equivalente del

FIGURA 2a
Sistema carbónico. Especiación como función de pH a 25°C y 1 atm para $C_T=10^{-3}$ M.

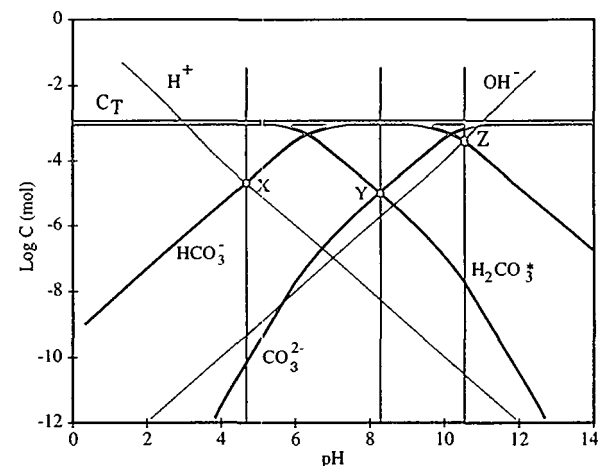
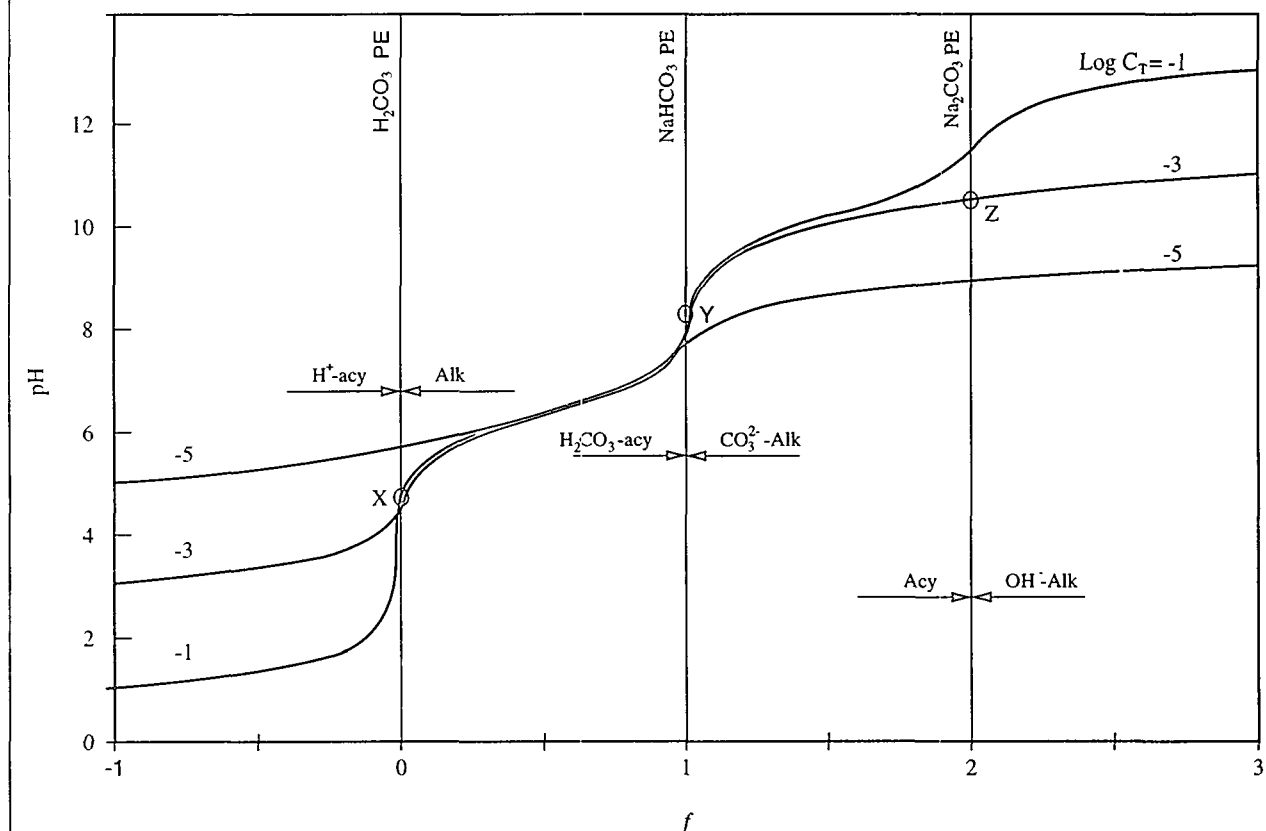


FIGURA 2b
Sistema carbónico. Curva de titulación y definición de la alcalinidad (o acidez) en cuanto a puntos equivalentes de H_2CO_3 , HCO_3^- y CO_3^{2-} . La variable f representa la alcalinidad al punto equivalente del CO_2 normalizada con la concentración total de carbono (C_T) en la solución.



CO₂. De este modo, la determinación de alcalinidad es fundamental para la caracterización de lluvias.

Determinación de la alcalinidad por titulación de Gran

La alcalinidad de una solución es una medida de su capacidad para neutralizar un ácido. Analíticamente, la alcalinidad es la cantidad (en eq/l) de ácido fuerte requerida para la titulación de la solución con respecto al punto equivalente correspondiente. En la figura 2(b) se explica la definición de la alcalinidad en el caso del sistema carbónico. La alcalinidad de una solución depende del punto de referencia y la acidez de la solución es negativa de la alcalinidad respectiva.

En la figura 2(b) también se muestran las definiciones de la acidez y alcalinidad en cuanto a los puntos equivalentes de H₂CO₃, HCO₃⁻ y CO₃²⁻. En el caso del punto equivalente del CO₂ (H₂CO₃) se representa la alcalinidad como alk. No es posible la titulación de la alcalinidad y las especies carbónicas por el método estándar debido a que las muestras de lluvia contienen muy bajo contenido de CO₂ disuelto (ver figura 2b). No existen los puntos de inflexión en los puntos equivalentes para la curva de concentración de CO₂ de 10⁻⁵M, por ello, se utiliza el método de "titulación de Gran" para determinar la alcalinidad en un sistema que contiene baja concentración de ácido-base, como en el caso de la lluvia. En estos casos no se observa ningún cambio prominente en el pH; de igual forma, no ocurre el punto de inflexión (PI) en la curva de titulación circundante al punto equivalente de interés [Pankow, 1994].

En este método se usan los datos de titulación pH contra volumen de titulante para definir la localización del punto equivalente (PE). Un análisis químico-matemático de las expresiones como H⁺-acy, alk revelan que los datos adyacentes, pero no inmediatos de un punto equivalente PE, pueden usarse para localizar el PE. En una solución ácido-base pueden existir tres posibilidades iniciales que contiene la solución:

- Un ácido débil y un poco de ácido fuerte (inicial $f < 0$).
- Solamente un ácido débil (inicial $f = 0$).
- Un ácido débil con un poco de base fuerte (inicial $f > 0$).

La medición del pH de solución no da ninguna información acerca del estado inicial de la solución. Debido a eso se agrega un volumen (V_a) de un ácido fuerte de la concentración conocida (C_a) en un volumen

En particular los óxidos de azufre y de nitrógeno en presencia de humedad atmosférica dan lugar a reacciones químicas que producen ácidos, principalmente sulfúrico y nítrico.

(V_0) de solución titulada (muestra de lluvia) para asegurar que el estado inicial sea $f < 0$; después se titulan con un titulante (base) de concentración conocida (C_b) para todo el rango del pH.

La ecuación de balance de protón (EBP) para una solución H₂CO₃ es:

$$[H^+] = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] \quad [7]$$

Así, la acidez H⁺-acy será:

$$[H^+] - \text{Acy} = [H^+] - [HCO_3^-] - 2[CO_3^{2-}] - [OH^-] \quad [8]$$

Para cualquier punto de titulación, el producto de H⁺-acy y el volumen total de la solución debe ser igual al producto de C_b y el volumen del titulante requerido para la neutralización de H⁺-acy.

$$(V_0 + V_a + V_t)(H^+ - \text{Acy}) = (V_s - V_t)C_b \quad [9]$$

donde V_t es el volumen de titulante agregado y V_s es el volumen de titulante agregado para llegar al PE de H₂CO₃.

Para $f < 0$

$$[H^+] - \text{Acy} = [H^+] - [HCO_3^-] - 2[CO_3^{2-}] - [OH^-] \equiv [H^+] \quad [10]$$

Así:

$$(V_0 + V_a + V_t)[H^+] \equiv (V_s - V_t)C_b \quad [11]$$

Si definimos:

$$F_1 = (V_0 + V_a + V_t) 10^{-\text{pH}} \equiv (V_s - V_t)C_b \quad [12]$$

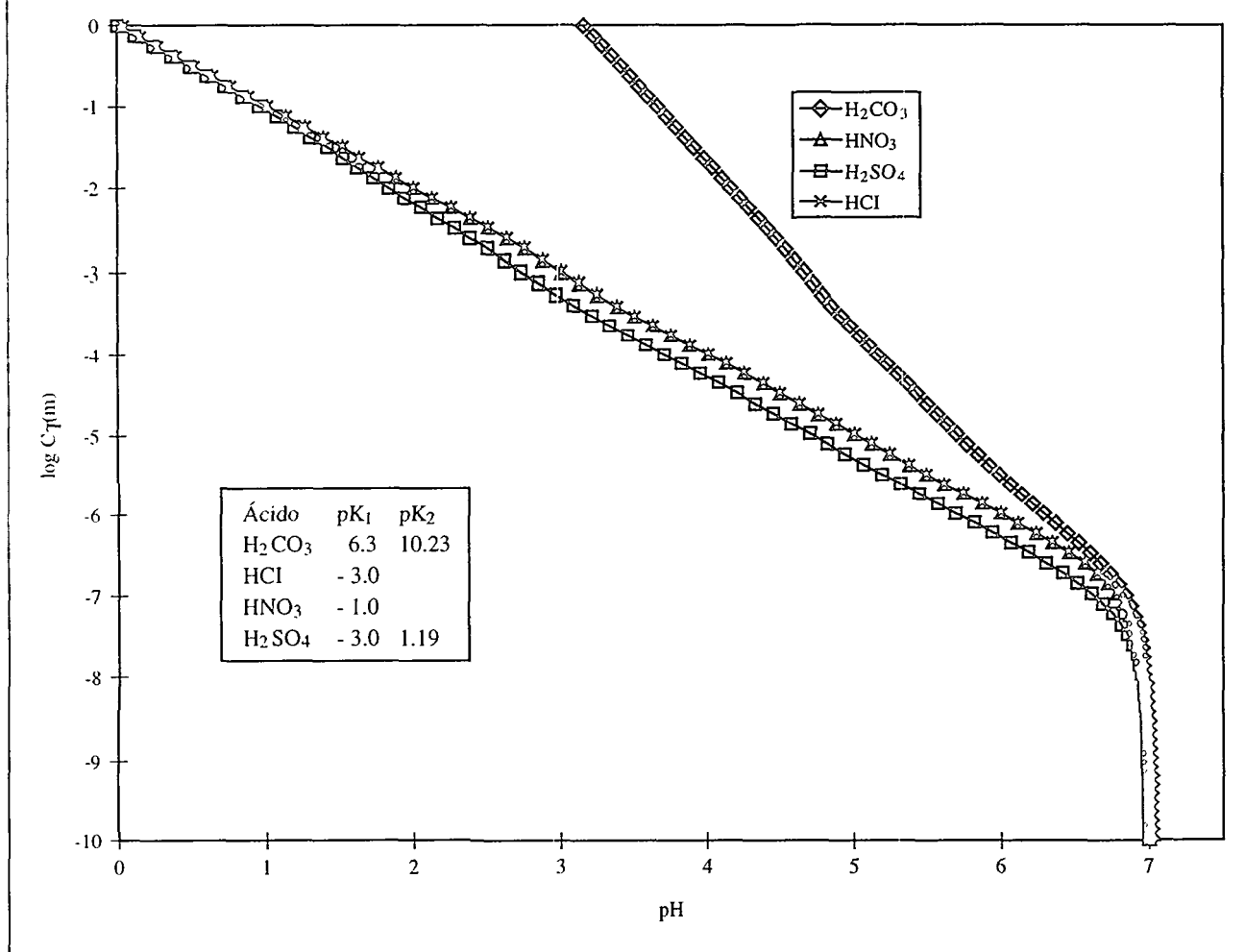
El valor de F_1 es conocido (calculado) en todos los puntos durante la titulación. Si graficamos F_1 contra V_t , el valor de F_1 tenderá a cero linealmente con una pendiente de $-C_b$ cuando V_t tiende a V_s . Esta ecuación también indica que el gráfico F_1 contra V_t pasará por el eje X a $V_t = V_s$. Así, la localización de esta intersección determinará V_s . Con ello, las otras funciones en el caso del sistema carbónico pueden definirse como:

$$F_2 = (V_t - V_s) 10^{-\text{pH}} = (V_m - V_t)K_1$$

$$F_3 = (V_t - V_m) 10^{-\text{pH}} = (V_w - V_t)K_2$$

FIGURA 3

Variación en pH con la concentración de los ácidos.



$$F_4 = (V_0 + V_a + V_t) 10^{-\text{pH}} = \frac{(V_t - V_w) C_b}{K_w}$$

$$F_5 = (V_w - V_t) 10^{-\text{pH}} = (V_t - V_w) / K_2$$

$$F_6 = (V_m - V_t) 10^{-\text{pH}} = (V_t - V_s) / K_1 \quad [13]$$

Donde V_m - volumen agregado para llegar al PE de HCO_3^-

V_w - volumen agregado para llegar al PE de CO_3^{2-} .

Con esto, la alcalinidad y concentración total del ácido carbónico disuelto serán en eq/l:

$$\text{alk}_0 = - \frac{(V_s C_b - V_a C_a)}{V_0}$$

$$A_{T,0} = - \frac{(V_m - V_s) C_b}{V_0} \quad [14]$$

Con los valores de alcalinidad y CO_2 disuelto total en el agua se puede calcular el pH y la especiación carbónica en el agua con las siguientes ecuaciones:

$$\text{alk} = C_T (a_1 + 2a_2) + [\text{H}^+] - [\text{OH}^-]$$

$$\alpha_0 = \left(1 + \frac{K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{K_1 K_2}{[\text{H}^+]^2} \right)^{-1} \quad [\text{H}_2\text{CO}_3] = C_T \alpha_0$$

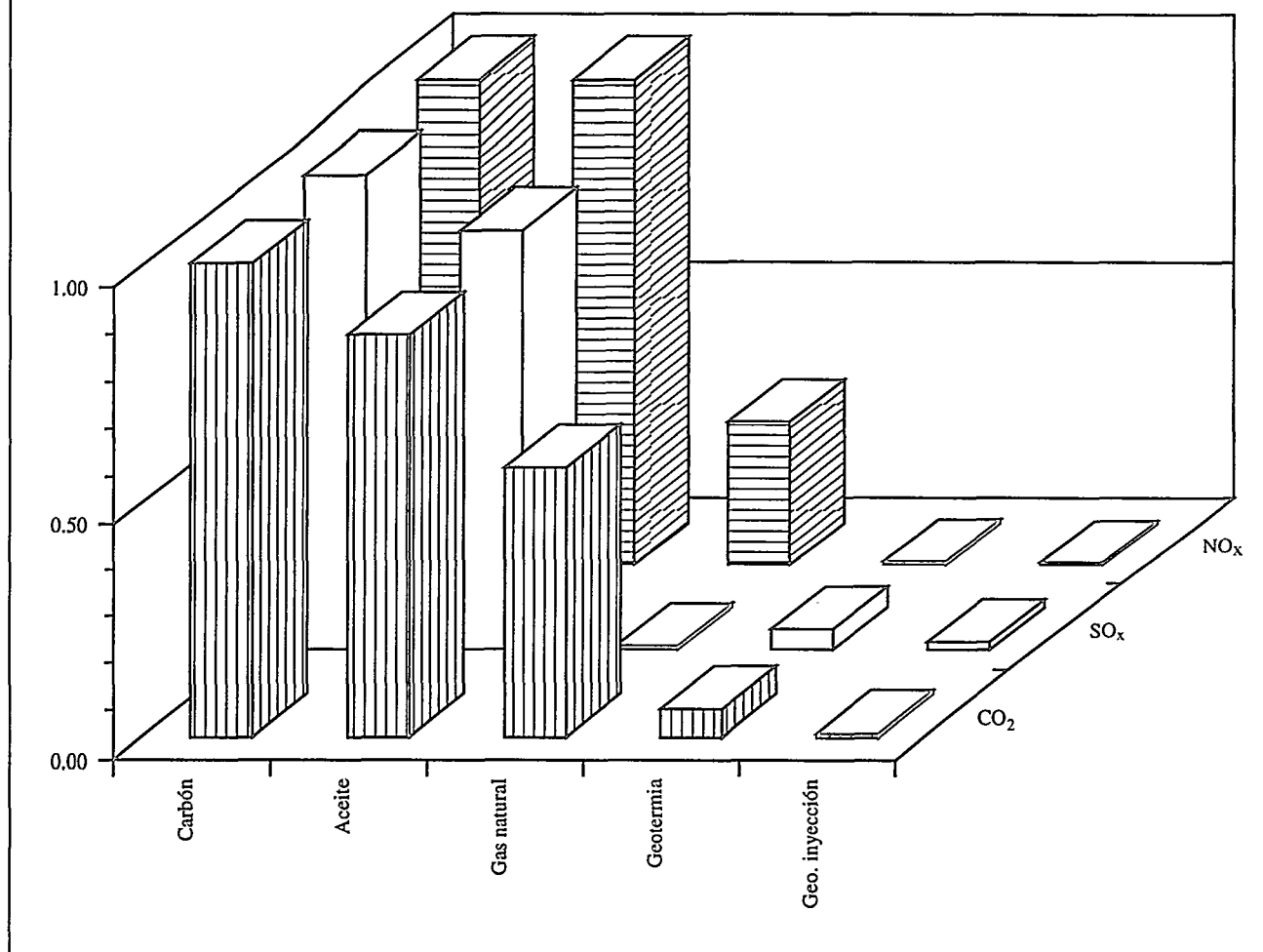
$$\alpha_1 = \left(\frac{[\text{H}^+]}{K_1} + 1 + \frac{K_2}{[\text{H}^+]} \right)^{-1} \quad [\text{HCO}_3^-] = C_T \alpha_1$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{[\text{H}^+]^2}{K_1 K_2} + \frac{[\text{H}^+]}{K_2} + 1 \right)^{-1} \quad [\text{CO}_3^{2-}] = C_T \alpha_2 \quad [15]$$

donde a_0 , a_1 y a_2 son las fracciones de ionización de ácido carbónico que han perdido cero protón, un protón y dos protones, respectivamente.

FIGURA 4

La concentración relativa de gases (CO_2 , SO_x y NO_x) emitidos por diferentes tipos de combustibles durante la generación de energía eléctrica (datos tomados de Goddard y Goddard, 1990).



Estudios sobre caracterización de la lluvia en México

Las investigaciones sistemáticas sobre el monitoreo de las precipitaciones pluviales en México son relativamente recientes. Báez y colaboradores (1986, 1993) recolectaron las lluvias en forma secuencial por fracciones en ocho sitios de la ciudad de México y áreas circundantes. Los resultados indicaron que los constituyentes químicos decrecieron en su concentración iónica en la porción primera de un evento de la lluvia, mientras que esta concentración se incrementó, decreció o incluso no varió durante la última parte del evento. Páramo *et al.* (1987) presentaron un estudio en 10 sitios localizados en el Distrito Federal y un análisis estadístico de los valores del pH medidos en las lluvias.

En 1987, el Instituto Nacional de Ecología (INE) implementó el programa Precipitaciones Ácidas en la Zona

Metropolitana de la Ciudad de México; se determinó el pH, la conductividad eléctrica, los sulfatos, los nitratos, los cloruros, el sodio, el potasio, el magnesio y el calcio a través de la técnica de muestreo por depósito total. En 1993 se revaluó este programa y se inició una etapa de monitoreo automático y continuo de los depósitos secos y húmedos en la zona. Los resultados preliminares de esta red de monitoreo se reportaron en el informe anual del Instituto Nacional de Ecología (INE) de 1994, y se elaboró un análisis estadístico de los parámetros medidos para encontrar una correlación entre ellos.

Los estudios de los contaminantes emitidos a la atmósfera demuestran que la geotermia es una de las fuentes limpias para generar energía (figura 4), pues la cantidad de gases emitidos casi no tienen efectos sobre la degradación de la atmósfera y de las lluvias. Sin embargo, la Comisión

Federal de Electricidad (CFE) realiza esfuerzos para medir la calidad de la atmósfera y de las lluvias alrededor de los sistemas geotérmicos; esto permite un estricto control ambiental. En 1995, la CFE, en conjunto con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), planeó realizar un estudio completo de monitoreo químico e isotópico. Los fundamentos de la metodología isotópica los presentó Verma (1995) y los resultados de este estudio están reportados por Verma *et al.* (1997). Se seleccionaron ocho sitios para el muestreo de las lluvias: seis dentro del campo de Los Azufres, Michoacán, y sus alrededores y dos en los campamentos de la CFE en Morelia, Michoacán, y Guadalajara, Jalisco. Los resultados más importantes fueron: los valores de pH del agua de lluvia por pH-metro no son muy confiables debido a que las aguas contienen muy bajo contenido de sales disueltas; la alcalinidad (o acidez) respecto al punto equivalente de CO_2 disuelto es un parámetro fundamental en la caracterización de la lluvia; los valores de acidez (negativo de alcalinidad) fueron del orden de 10^{-4} a 10^{-6} meq/l y en algunos casos, negativos, lo que indica la existencia de alcalinidad; la concentración de las especies químicas como SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- es muy baja, excepto en algunos datos excepcionales y así no existe una variación temporal y espacial apreciable.

El pH y el análisis químico completo

El pH se ha considerado como un parámetro de suma importancia en los estudios de caracterización de la lluvia ácida. Galster (1991) y Hansen y Hidy (1982) presentaron los conceptos fundamentales asociados con las técnicas de medición del pH. Es difícil obtener la determinación del pH con exactitud en las muestras de agua que contienen baja conductividad eléctrica (o sales disueltas) tales como agua destilada, deionizada o de lluvia. Se ha recomendado el tratamiento de las muestras con sales neutrales (como KCl) para incrementar la conductividad eléctrica. El cambio de fuerza iónica y la introducción de impurezas puede tener efectos mayores en la medición del pH de las aguas que son pobremente amortiguadas. El National Bureau of Standards (NBS) de Estados Unidos en Washington, organizó una investigación sobre la medición del pH en las muestras de lluvia simulada con la participación de 17 laboratorios [Koch *et al.*, 1986]. Los resultados indicaron que el "contacto potencial del líquido residual" fue la causa principal en el error de las mediciones del pH. Los problemas asociados con la

Los estudios de los contaminantes emitidos a la atmósfera demuestran que la geotermia es una de las fuentes limpias para generar energía (figura 4), pues la cantidad de gases emitidos casi no tienen efectos sobre la degradación de la atmósfera y de las lluvias.

medición potenciométrica del pH en aguas de baja conductividad eléctrica se han identificado como el potencial desarrollado contra la corriente por agitación, el contacto potencial del líquido residual causado por la diferencia en fuerza iónica entre los estándares y las muestras, el efecto de la temperatura y el tiempo de

respuesta variable, etcétera. Brennan y Peden (1987) indicaron que se puede obtener mejor reproducibilidad en la medición del pH agitando la muestra a cuatro revoluciones por segundo.

Para la caracterización química de la lluvia se realiza la determinación de los iones mayores como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} . El balance iónico se puede utilizar para calcular el pH de la solución [Brennan y Peden, 1987]. Otra manera de verificar los valores del pH es por medio del método de la titulación de Gran.

Como se afirmó, los estudios de monitoreo de las lluvias ácidas en México son relativamente recientes y se requiere un gran esfuerzo para la estandarización de la metodología y la creación de una red que permita generar los datos fisicoquímicos de la lluvia en toda la república mexicana. Báez *et al.* (1993) presentaron un estudio para comparar las variaciones de las especies químicas en las lluvias durante 1986 y 1987 tales como H^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} y NO_3^- en dos sitios: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el Distrito Federal, y Rancho Viejo, en el Estado de México. Las tendencias de comportamiento de las especies NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} y NO_3^- son las mismas para ambos sitios. La concentración de los constituyentes químicos decaen en la porción primera durante un evento de lluvia, mientras que esta concentración se incrementó, decreció o bien no varió durante la última parte del mismo. En el caso del H^+ (o pH), no hay un apreciable cambio sistemático durante 1986 en ambos sitios. La concentración de H^+ para el sitio UNAM se incrementa continuamente con los números de fracción precipitada.

Los autores relacionaron que las concentraciones bajas fueron consecuencia de la neutralización de algunos ácidos fuertes por la partículas alcalinas de la atmósfera. Los rangos de variación de H^+ son de 20-62 meq/l para 1986 y 6-30 meq/l para 1987 en el caso de UNAM, y 15-47 meq/l para 1986 y 13-28 meq/l para 1987 en el caso de Rancho Viejo. Si convertimos estos rangos en forma del pH, los valores serán de 4.70-4.21 para 1986 y 5.22-4.52 en el caso UNAM, y 4.82-4.33 para 1986 y 4.89-4.55 para 1987 en el

caso Rancho Viejo. Esta información indica que fue mejor la calidad de lluvia en ambos sitios en 1987.

Otro estudio importante sobre monitoreo de las lluvias en la ciudad de México se presentó en el informe anual del INE en 1994. En ese informe se reportaron los valores del pH en los rangos 7.9-3.5, 6.9-3.5, y 6.9-5.6 con las técnicas de muestreo de depósito total, húmedo y seco, respectivamente. Así se realizaron las distribuciones de los parámetros fisicoquímicos en la zona metropolitana de la ciudad de México. Se calcularon las matrices de correlación entre diferentes parámetros fisicoquímicos. El estudio de las tendencias históricas del pH de la lluvia durante el periodo 1987-1994 indicó que la calidad de las precipitaciones pluviales se ha mejorado en últimos años. Esto se debe a las medidas implementadas para reducir las emisiones de contaminantes provenientes de la industria, los servicios y el transporte en la ciudad, así como al mejoramiento de la calidad de los combustibles utilizados por las fuentes fijas y móviles.

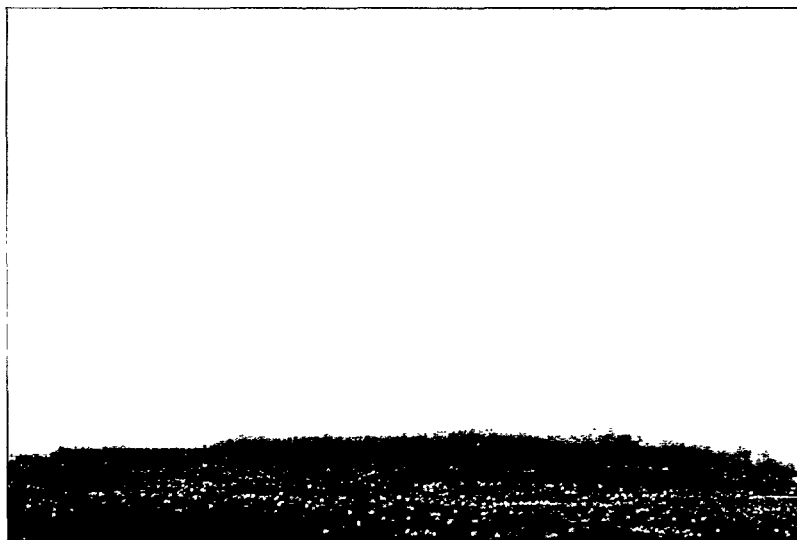
Verma (1995) presentó la necesidad de crear una metodología sistemática para caracterizar y evaluar las fuentes contaminantes en las precipitaciones pluviales a través de un monitoreo químico e isotópico de las especies disueltas. Se ha reportado en la literatura la determinación del pH en las muestras de lluvia con una precisión superior a 0.02. Desafortunadamente se observa que es muy difícil la medición del pH en las muestras de la lluvia con exactitud por los métodos potenciométricos. Galster (1991) presentó los conceptos fundamentales sobre el tema y explicó la necesidad de profundizar las investigaciones sobre las técnicas de medición del pH.

La estimación del pH a través de un análisis químico completo (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) no es muy confiable, debido a que existe un error analítico en la determinación de cada una de estas especies, lo que produce errores sumamente graves en el cálculo del pH por este método. Carratalá *et al.* (1992) presentaron un estudio muy completo sobre las precipitaciones pluviales en España; por otra parte, un cálculo de balance de carga para el análisis químico de la estación Atzaneta indica que el error de balance de carga fue de 23.7%. Así, efectuando la propagación del error utilizando el error analítico de cada especie se observa que el valor del pH calculado no es confiable.

Además, el pH de la lluvia no es un parámetro fundamental para la caracterización de la lluvia ácida. El pH puede disminuirse por disolución del CO_2 (la concentración del CO_2 ha sido alterada localmente por las emisiones industriales). Por tanto, la disminución del pH por aumento de la concentración de CO_2 no se considera como la causa de formación de la lluvia ácida. Báez *et al.* (1988) llevaron a cabo un estudio sobre la distribución de la concentración del CO_2 en la atmósfera de la ciudad de México. La variación en la concentración del CO_2 en la atmósfera indica la presencia de variación del CO_2 disuelto en la lluvia de la región. De este modo, la determinación de la alcalinidad con respecto al punto equivalente del CO_2 en las lluvias es fundamental para su caracterización. La alcalinidad, así como las especies carbónicas en las aguas de lluvia que contienen muy bajo contenido de sales, se determinan por el método de la titulación de Gran.

La alcalinidad

Las entidades conservativas son de vital importancia en el desarrollo de los conceptos fundamentales en la ciencia. Aunque la alcalinidad de una solución es una entidad conservativa, se ha usado muy poco en la modelación química de los sistemas acuosos. Por ejemplo, si se mezclan dos tipos de agua en proporción V_1 y V_2 , la alcalinidad de la mezcla será la media aritmética $((V_1 \text{ alc}_1 + V_2 \text{ alc}_2)/(V_1 + V_2))$ de las alcalinidades de las aguas individuales, lo que no siempre es válido para el pH o cualquier especie química. Así, la alcalinidad —en conjunto con el pH o el CO_2 disuelto total en las aguas naturales, la lluvia o aguas superficiales—



Pankow, J. F., *Aquatic chemistry*, Titan Press-OR, Estados Unidos, 1994.

Páramo, V. H., M. A. Guerrero, M. L. Morales, R. E. Morales y D. B. Contreras, "Acidez de las precipitaciones en el Distrito Federal", *Ciencia y Desarrollo*, Conacyt, núm. 72, 1987, pp. 59-67.

Stumm, W. y J. J. Morgan, *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*, Wiley, segunda edición, Nueva York, 1981.

Verma, M. P., *Isotopic methods to determine rain quality*, Acta INAGEQ 1, 1995, 23-27.

Verma, M. P., M. E. Fernández, V. Barrera, F. Sandoval, E. Casimiro, R. Rye, C. Gent y C. Johnson, "Caracterización química e isotópica de las precipitaciones pluviales en la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán, México", *Geotermia*, revista mexicana de geoenergía (en proceso), 1997.



maestro en física con especialidad en electrónica (1978) por la Universidad de Agra, Agra, India. Doctor en física con especialidad en espectrometría Raman e infrarroja por el Instituto

Hindú de Tecnología (Indian Institute of Technology), Kanpur, India. En 1985 ingresó como investigador al IIE en la Unidad de Geotermia. Se ha especializado en geoquímica de sistemas geotérmicos y es autor de más de sesenta artículos técnicos. Desde 1988 pertenece al Sistema Nacional de Investigadores.

MAHENDRA PAL VERMA JAISWAL

Licenciado en física, química y matemáticas (1975) y

Tecnología de sistemas híbridos solar-eólico para desarrollos ecoturísticos

Aplicaciones:
Iluminación
Refrigeración
Aire acondicionado

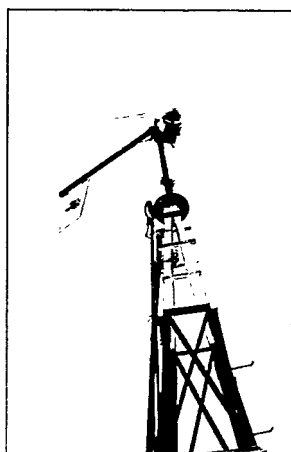


Villas Carrousel en Playa del Carmen, Quintana Roo, primer desarrollo ecoturístico que satisface sus necesidades de energía eléctrica para iluminación con un sistema híbrido solar-eólico diseñado y construido por el IIE.

Mayores informes

Unidad de Energías No Convencionales del IIE

Teléfono (73) 18 38 11, extensión 7771



Generación eléctrica con energía del viento

Jorge M. Huacuz y
Marco A. Borja

Mientras en México todavía se esgrimen opiniones encontradas respecto a las bondades de la energía eólica para la generación eléctrica (si esta forma de generación debe ser despachable o no, si se le pueden otorgar créditos por capacidad o no, si el ruido que producen las aspas de los aerogeneradores rebasa los límites de lo tolerable o no, si los aerogeneradores representan un peligro para las aves o no, si su operación y mantenimiento son costosas o no, etcétera) y, en consecuencia, no se ha avanzado más allá de la etapa de prueba piloto con una pequeña central de 1.5 megawatts (MW) instalada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en la zona de La Ventosa, Oaxaca, la actividad al respecto en otras latitudes llama a la reflexión.

Bien conocido es el caso de los desarrollos eolieléctricos en los Estados Unidos, concentrados principalmente en el estado de California, apalancados por los términos de la Ley PURPA (Public Utility Regulatory Policy Act) que obligaba a las empresas eléctricas a comprar electricidad de productores independientes, generada a partir de recursos energéticos renovables (sol,

Conforme el despliegue de la tecnología eolieléctrica alcanza dimensiones universales, también se multiplican los esquemas legales, institucionales, financieros y operativos que hacen posible esta evolución.

viento, biomasa). Ahí se instalaron los primeros “parques eólicos” (también llamados “granjas eólicas” o “centrales eolieléctricas”) de varias decenas de MW de capacidad cada uno, habiéndose acumulado una capacidad total de generación eolieléctrica de 1 770 MW entre los años de 1980 y 1995. Los equipos utilizados en estos proyectos fueron principalmente máquinas eólicas relativamente pequeñas, con una capacidad promedio de alrededor de 250 kilowatts (kW), lo que se podría identificar como tecnología de primera generación. Fueron muchas las lecciones que dejaron estos primeros proyectos, entre otras, que la tecnología aún adolecía de problemas técnicos que debían ser resueltos y que los costos de electricidad producida no eran lo suficientemente bajos como para que esta alternativa de generación compitiera en un mercado desregulado. También se hizo evidente que en su mayoría (aproximadamente 95%) el origen de la tecnología estaba en países europeos de mayor tradición en el uso de la energía eólica, como Holanda y Dinamarca.

Tal vez menos conocidos, pero ciertamente de mayor relevancia que estas primeras aplicaciones masivas de la energía eólica, son los desarrollos que han tenido lugar en otras partes del mundo en el periodo subsecuente. En lo puramente tecnológico, los aerogeneradores comerciales crecieron en capacidad hasta el rango de los

500 a 600 kW, que es el tamaño típico en proyectos comerciales actuales. La mayoría de los problemas técnicos que aquejaban a las máquinas de la primera generación se han resuelto y se han alcanzado márgenes importantes de competitividad económica. También han aparecido ya en el mercado los precursores de la tecnología de tercera generación, con máquinas en un rango de 1 a 1.5 MW de capacidad cada una, con lo que se espera lograr márgenes de competitividad aún mayores.

La capacidad total de generación con máquinas eólicas en el mundo ha crecido hasta alcanzar la cifra de 7 262 MW (figura 1) y la lista de países que han emprendido esta ruta tecnológica sigue haciéndose cada vez más larga (cuadro 1).

Conforme el despliegue de la tecnología eoloeléctrica alcanza dimensiones universales, también se multiplican los esquemas legales, institucionales, financieros y operativos que hacen posible esta evolución. Cada país y cada circunstancia son distintos, por lo que no hay un solo patrón, pero sí ejemplos a seguir que son aplicables a la solución de necesidades de nuestro país. Los siguientes ejemplos

En pocos años, Alemania se ha puesto a la cabeza de los países industrializados, no sólo en lo que respecta al número de MW de capacidad eoloeléctrica instalada en ese país, sino también en lo relativo a los esquemas utilizados para promover el uso de esta tecnología, en donde algunos de ellos son notablemente innovadores.

pueden ayudar a ilustrar este punto.

El caso alemán

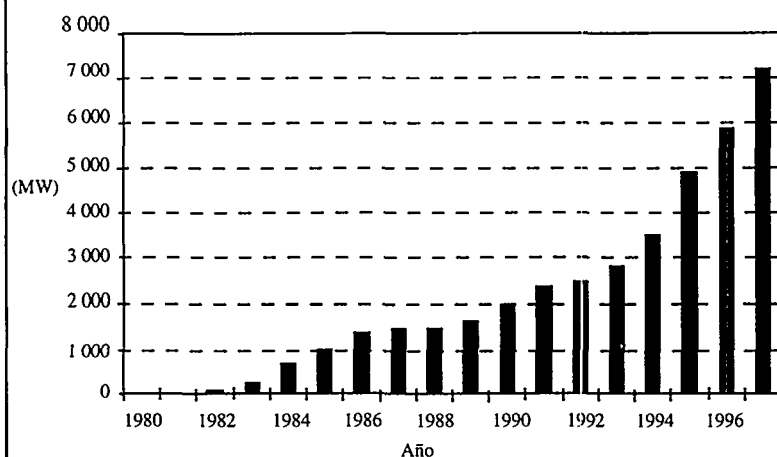
En pocos años, Alemania se ha puesto a la cabeza de los países industrializados (cuadro 1), no sólo en lo que respecta al número de MW de capacidad eoloeléctrica instalada en ese país, sino también en lo relativo a los esquemas utilizados para promover el uso de esta tecnología, en donde algunos de ellos son notablemente innovadores. A diferencia de lo que ocurrió en los Estados Unidos, en donde el gobierno se concretó a incentivar la apertura del mercado y los desarrolladores de proyectos eoloeléctricos recurrieron principalmente al uso de tecnología importada para responder a la oportunidad, en Alemania, mediante una acción gubernamental

concertada con la iniciativa privada, primero se puso énfasis en el desarrollo de una tecnología propia, asimilando las experiencias de terceros.

La tecnología localmente desarrollada fue llevada a una madurez comercial por medio de un programa gubernamental que financiaba la ejecución de proyectos piloto y demostrativos. Acto seguido, la apertura del mercado se estimuló mediante una ley que da a los ciudadanos alemanes el derecho de instalar aerogeneradores interconectados a la red eléctrica y que obliga a las empresas eléctricas a pagar un precio de garantía por la electricidad recibida. El precio de garantía toma en cuenta los costos ambientales de generar con sistemas convencionales, incentivando así la construcción de mayor capacidad con sistemas de bajo impacto ambiental.

La estructura de precios establecida y la simplicidad de los mecanismos administrativos creados para la autorización del emplazamiento e interconexión a red de los aerogeneradores han resultado en la instalación de unos 2 015 MW de capacidad adicional en tan sólo siete años. De interés particular resulta la manera en que estos instrumentos de política han logrado atraer el capital privado necesario para la construcción de unidades generadoras. A diferencia de lo ocurrido en los Estados Unidos, la instalación de aerogeneradores en Alemania no se ha dado exclusivamente en el esquema de parques eólicos, lo cual demanda esfuerzos significativos de gestión, especialmente en lo relativo a la integración de los paquetes financieros (en el rango de decenas a cientos de millones de dólares por proyecto) y que inherentemente

FIGURA 1
Crecimiento histórico de la capacidad eoloeléctrica instalada en el mundo.



conlleva riesgos financieros elevados. La simplicidad del esquema regulatorio alemán ha llevado a que un elevado número de pequeños inversionistas unan sus esfuerzos para ejecutar pequeños proyectos eolieléctricos, con una o varias máquinas instaladas por proyecto. Así, ahora es común encontrar en el territorio alemán aerogeneradores de 500 a 1 000 kW cada uno, instalados en forma aislada e interconectados individualmente a la red eléctrica, a lo largo de las autopistas, en parques industriales y en medio de los cultivos agrícolas. Este esquema disperso de generación ha causado cierta inquietud en algunos círculos de la sociedad por el impacto visual que las máquinas

En 1987, España no tenía un solo aerogenerador de gran tamaño interconectado a red. Ahora cuenta con más de 1 400 aerogeneradores instalados, cuya capacidad rebasa los 400 MW, y programas que plantean un crecimiento a cinco mil megawatts en la próxima década.

provocan; pero para otros, las instalaciones tienen un cierto toque de atractivo. Los aspectos de ruido y otros efectos ambientales están lo suficientemente bien regulados como para causar preocupación. Las posibilidades de crear perturbaciones en la red se han minimizado mediante el uso de esquemas tecnológicos avanzados.

Para el gobierno alemán, las

motivaciones para fijar un precio de garantía favorable a los productores de electricidad con aerogeneradores no parecen atender únicamente a los aspectos financieros de las empresas eléctricas, sino que parten además de otros beneficios que el uso de la tecnología eólica tiene para la economía global y el medio ambiente: establecimiento de una base industrial competitiva, creación de empleos, preeminencia tecnológica, menos emisión de contaminantes y apalancamiento de capitales, entre otros.

El caso español

Los escépticos seguramente pensarán que lo anterior únicamente puede ocurrir en Alemania o en Estados Unidos, pero otros países con menor poderío económico y tecnológico están llevando a cabo actividades similares. En 1987, España no tenía un solo aerogenerador de gran tamaño interconectado a red. Ahora cuenta con más de 1 400 aerogeneradores instalados, cuya capacidad rebasa los 400 MW, y con programas que plantean un crecimiento a cinco mil megawatts en la próxima década y la meta de duplicar la capacidad instalada anualmente. Esto se da, nuevamente, gracias al establecimiento de un marco jurídico que favorece el uso de tecnologías de bajo impacto ambiental y alienta la participación de capitales privados en la generación de electricidad. Sin ser originalmente poseedores de la tecnología, los españoles lograron, en relativamente poco tiempo, transferirla de aquellos países que la tenían e integrarla a su economía; no compraron simplemente las máquinas para hacer sus centrales como ocurrió en Estados Unidos, sino que compraron licencias de los

CUADRO 1

Capacidad eolieléctrica instalada por país.

<i>País</i>	<i>(MW)</i>	<i>País</i>	<i>(MW)</i>
Alemania	2 075	Curazao	<10
Estados Unidos	1 601	Nueva Caledonia	<10
Dinamarca	1 061	Cabo Verde	<10
India	845	Australia	<10
España	406	Luxemburgo	<10
Reino Unido	330	Libia	<10
Holanda	325	Austria	<10
China	166	México	<10
Suiza	108	G. Francesa	<10
Italia	100	N. Zelanda	<10
Grecia	<50	Argentina	<10
Canadá	<50	Jordania	<10
Costa Rica	<50	Brasil	<10
Portugal	<50	Egipto	<10
Japón	<50	Letonia	<10
Francia	<50	Turquía	<10
Finlandia	<10	Cuba	<10
Bélgica	<10	Corea	<10
Irlanda	<10	Rusia	<10
Noruega	<10	Siria	<10
Irán	<10	Tailandia	<10
República Checa	<10	Jamaica	<10
Total		7 262	

En un lapso de cinco años, la India pasó de la etapa demostrativa, a ocupar el cuarto lugar mundial en capacidad eolieléctrica instalada, siendo el país de los llamados en desarrollo que más ha logrado asimilar la tecnología.

elementos críticos de la tecnología y desarrollaron sus propios productos en forma incremental. Las centrales de generación eolieléctrica que actualmente se construyen en España son de origen local prácticamente en 100%, y ahora existen en el país varias empresas de fabricación y suministro de equipos eólicos, así como de desarrollo de proyectos e ingeniería. En forma análoga al caso alemán, la motivación más fuerte para el lanzamiento del programa eolieléctrico en España no ha sido la competitividad respecto al costo de la electricidad convencional, sino los beneficios globales para la economía, con énfasis en el desarrollo regional y la creación de fuentes de empleo.

El caso hindú

Sería ocioso pretender soslayar las similitudes que existen entre la India y México respecto a su grado de desarrollo económico y tecnológico, pero tampoco podría ignorarse la dimensión que en aquel país adquieren ciertos problemas, como el de suministro eléctrico, en virtud de su

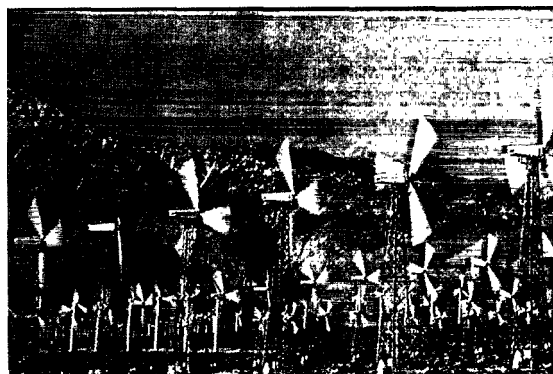
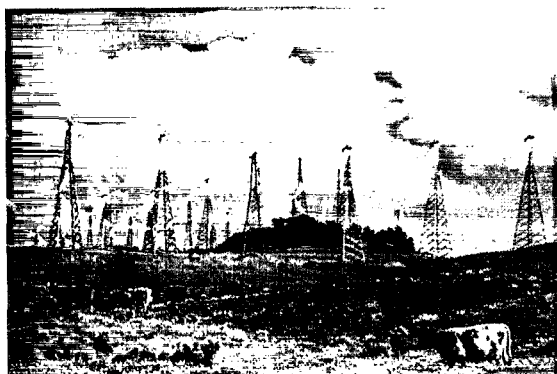
extensión territorial y de su gran volumen de población. Desde hace varios años, la India reconoció la potencialidad de los recursos energéticos no convencionales para mitigar su problema energético y creó un ministerio especial encargado de fomentar el uso de estas formas de energía. Este ministerio ha instrumentado políticas y mecanismos financieros y operativos que han resultado en programas impresionantes de aplicación de las energías renovables en gran escala, tanto para la alimentación de pequeñas cargas eléctricas en zonas rurales, como para la generación de electricidad en grandes volúmenes. En un lapso de cinco años, la India pasó de la etapa demostrativa a ocupar el cuarto lugar mundial en capacidad eolieléctrica instalada, siendo el país de los llamados en desarrollo que más ha logrado asimilar la tecnología. Su motivación es doble, pues a la vez que intenta incrementar su capacidad total de generación, busca aprovechar los beneficios globales que tiene el uso de la energía eólica para la economía y el medio ambiente.

El caso de México

El potencial eolieléctrico de México se estima actualmente en cerca de cinco mil megawatts económicamente aprovechables. Estudios hechos a lo largo de varios

La experiencia en otros países indica que los problemas que se plantean pueden irse resolviendo en el curso de las acciones, siempre y cuando éstas se den de manera planeada y en forma concertada entre los distintos actores.

años por la Unidad de Energías No Convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) han permitido identificar las zonas con mayor potencial, y desde hace varios años existe el marco jurídico que permite la participación del capital privado en la generación eléctrica a través de varias modalidades. Existen también empresas privadas interesadas en llevar a cabo proyectos eolieléctricos de distintos tamaños y, en este sentido, la Comisión Reguladora de Energía ha otorgado en los últimos dos o tres años permisos de construcción para varias centrales con capacidades entre los 27 y los 60 MW. Sin embargo, desde 1994, año en que la CFE instaló su planta piloto de 1.5 MW en La Venta, Oaxaca, la capacidad eolieléctrica del país no ha aumentado. La mayoría de los proyectos se han perdido en el laberinto de un marco normativo poco claro y complicado o se han detenido en el borde de una rentabilidad poco favorable, al tener que competir contra centrales de



generación convencionales únicamente con base en el costo de la electricidad producida.

No existe en el país una estrategia para el fomento de la generación eoloeleétrica a pesar de los beneficios potenciales que esta opción de generación ofrece. Un programa para la explotación del potencial económicamente aprovechable a 14 años podría significar la creación de treinta mil empleos directos y otros treinta mil indirectos, la adición de un promedio de 360 MW anuales de capacidad adicional de generación, el ahorro anual de 17 millones de barriles de combustóleo y evitaría la emisión a la atmósfera de nueve millones de toneladas anuales de gases con efecto de invernadero. Las industrias eléctrica y metalmecánica del país tienen el grado de desarrollo adecuado para asimilar la tecnología de aerogeneradores para producción local, tal como ocurre actualmente en la India y en España. De manera importante, un programa de esta naturaleza podría fomentar la aportación de capitales privados del orden de 450 millones de dólares anuales para la construcción de mayor capacidad de generación para las necesidades futuras del país.

El pleno aprovechamiento del recurso eólico hasta ahora estimado en el país representa un potencial de generación de electricidad cercano a 11 TWh/año. Esta cifra, comparada con la generación de electricidad en el país durante 1996, equivale a 9.6% de la generación bruta mediante las centrales térmicas convencionales (gas natural, combustóleo, diesel, carbón y uranio) entonces existentes; a 139% de la energía eléctrica generada a partir de uranio; a 62% de la generación con carbón; a 59.6% de la generación con gas natural; o a 15.7% de la generación con combustóleo.

Desde el punto de vista comercial, 11 TWh por año equivalen a 8.9% de las ventas de energía del sector público; a 155% de la energía destinada a usos propios de la empresa eléctrica; y a 47% de las pérdidas por transmisión, subtransmisión y distribución para el mismo año.

Ciertamente el uso del recurso eólico para la generación eléctrica plantea un número de interrogantes en lo político, lo institucional, lo financiero y lo técnico. La experiencia en otros países indica que los problemas que se plantean pueden irse resolviendo en el curso de las acciones, siempre y cuando éstas se den de manera planeada y en forma concertada entre los distintos actores. Las experiencias ajenas demuestran también que la voluntad política, traducida en objetivos precisos y en mecanismos operativos claros, ha sido el motor principal para convertir un recurso energético renovable, no contaminante y accesible, en beneficios para la sociedad.

JORGE M. HUACUZ VILLAMAR



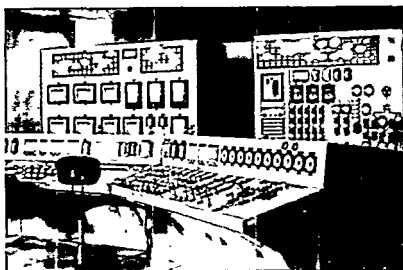
Ingeniero químico egresado de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Obtuvo sus grados de maestría y doctorado en ingeniería física en la Universidad de California, San Diego. En 1980 se integró como investigador al IIE, en la hoy Unidad de Energías No Convencionales, donde actualmente

es el gerente. Fue coordinador del área de energía solar; también originó y dirigió varios de los proyectos de electrificación rural con fuentes renovables de energía realizados bajo contrato con la CFE. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde 1986 y es coordinador internacional de la Red Iberoamericana de Electrificación Rural con Energía Renovable (RIER).

MARCO ANTONIO R. BORJA DÍAZ



Ingeniero en comunicaciones y electrónica (1978) egresado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato. En 1980 ingresó al IIE como investigador de la Unidad de Energías No Convencionales. Ha tenido a su cargo varios proyectos relacionados con el desarrollo de sistemas electrónicos, instrumentación y control, evaluación de comportamiento de sistemas convertidores de energía y caracterización de recursos energéticos; también ha participado en estudios de balance hidrológico y determinación de gastos de inyección en pozos geotérmicos, así como en estudios micrometeorológicos para dispersión de contaminantes en centrales termoeléctricas y caracterización de la capa atmosférica superficial. Es socio fundador de la Asociación Nacional de Energía Solar. Pertenece al SNI desde 1986.



Simulador Termos I.

Simuladores

Presentación

En 1979 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) inició, a solicitud de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el desarrollo de un simulador para el entrenamiento de operadores de centrales termoeléctricas. Este proyecto representó un gran reto en materia de investigación y desarrollo tecnológico, y dio origen a un área de trabajo ininterrumpido a lo largo de 18 años que ha colocado al IIE a la vanguardia en este campo en Latinoamérica, con resultados comparables en calidad, eficacia y costo a los de países industrializados.

Con cinco simuladores en operación a la fecha, la contribución del IIE a la capacitación de operadores de centrales eléctricas, así como del Sistema de Transporte Colectivo (Metro), ha sido por demás significativa. Entre los beneficios de los simuladores desarrollados en el Instituto destaca la considerable disminución de fallas y paros forzados en las centrales eléctricas atribuibles a errores humanos, con la consiguiente reducción en los costos de operación y mantenimiento de los equipos. además del aumento en la

Los ahorros potenciales que representa un simulador por concepto de una mayor disponibilidad y confiabilidad de las centrales generadoras, así como de la eficiencia de generación y la vida útil de los equipos, son del orden de millones de dólares anuales.

confiabilidad y disponibilidad de las mismas centrales.

Actualmente la Unidad de Simulación del Instituto está constituida por un sólido grupo que se especializa en el desarrollo de simuladores para entrenamiento; diseña e implanta metodologías, herramientas y estándares adecuados a los requerimientos de los usuarios, particularmente la CFE. Además se ocupa del mantenimiento y la actualización de los simuladores, de modo que en éstos se incorporen los cambios que haya en las centrales eléctricas, así como innovaciones en materia de *software* y *hardware*.

La flexibilidad del grupo le ha permitido incursionar en otras áreas de la simulación de procesos y recientemente desarrolló un equipo para probar reguladores automáticos de tensión en centrales eléctricas.

Simuladores: esenciales en el entrenamiento de operadores

En términos generales, un simulador es la representación de un proceso en una computadora por medio de modelos matemáticos.

Estos modelos se construyen a partir de ecuaciones que expresan leyes físicas fundamentales y correlaciones empíricas.

Se establecen vínculos con General Motors Ovonic

Los ingenieros Homero del Bosque, Steve Brennan y Paul R. Gifford, representantes de GM Ovonic, empresa filial de General Motors establecida en Troy, Michigan, Estados Unidos, especializada en el desarrollo de baterías avanzadas para automóviles eléctricos y otras aplicaciones, visitaron las instalaciones del IIE para establecer vínculos con los especialistas en baterías de la Unidad de Energías No Convencionales del Instituto.

Los visitantes presentaron su nueva tecnología níquel-hidruro metálico, hasta ahora sólo probada en el campo de los vehículos eléctricos, pero que por sus características podría ser aplicada a

los sistemas fotovoltaicos e híbridos que el IIE desarrolla.

Durante la reunión se planteó la posibilidad de que la nueva generación de baterías de GM Ovonic sea probada en el Laboratorio Fotovoltaico del IIE, que cuenta con la infraestructura necesaria para ello gracias al apoyo económico de la Subdirección de Distribución de la CFE.

El propósito final es que el IIE y GM Ovonic trabajen en un proyecto conjunto para

desarrollar un producto que podría contribuir a resolver el problema de almacenamiento de electricidad en sistemas fotovoltaicos para aplicaciones remotas.



GM Ovonic y el IIE podrían trabajar en un proyecto orientado a la solución del problema de almacenamiento de electricidad en sistemas fotovoltaicos para aplicaciones remotas.

Tercer año del horario de verano

El pasado cinco de abril se estableció en México, por tercer año consecutivo, el horario de verano que regirá hasta el próximo mes de octubre.

El Gobierno Federal y la CFE asignaron al Fideicomiso de Apoyo al Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (FIDE) la responsabilidad de auscultar, concensar, implementar y evaluar la aplicación de horarios estacionales (horario de verano) en México. Desde 1995, la Unidad de Uso de Energía del IIE ha apoyado al FIDE en las actividades técnicas para evaluar la factibilidad del horario de verano, implantarlo y analizar su impacto en el Sistema Eléctrico

Nacional, en el medio ambiente y en la economía familiar.

Con la aplicación del nuevo horario en 1996, la reducción del consumo de energía alcanzó la cifra de 943 millones de kilowatts hora, cantidad similar al consumo anual de energía de los estados de Tlaxcala o Colima. Para 1997 se tuvo un ahorro de 1 100 kilowatts hora, por lo que los usuarios residenciales dejaron de pagar 540 millones de pesos.

El ahorro promedio nacional de energía eléctrica por usuario doméstico ascendió a 3.3 por ciento del consumo residencial registrado en 1995.

En relación con la demanda pico, en 1997 se mantuvo la reducción alcanzada en 1996. Con esto, el país

tiene otro importante ahorro al reducirse la demanda máxima o demanda en la hora pico en 550 MW. Esta reducción en la demanda máxima significa que el país reduce o puede posponer inversiones en nuevas instalaciones de energía eléctrica del orden de 4 400 millones de pesos. Asimismo, a partir de la reducción en el consumo se ha evitado el uso de dos millones de barriles de petróleo con lo que se han reducido las emisiones de contaminantes en las zonas de generación de energía eléctrica que utilizan derivados del petróleo.

Cabe señalar que los resultados obtenidos confirmaron los ahorros previstos, por lo que se pronostica una tendencia similar en el futuro próximo.

Control coordinado de una central termoeléctrica de ciclo combinado

Marino Sánchez Parra y
Luis Castelo Cuevas

Resumen

En este artículo se presenta el control coordinado (CC) del Sistema de Control Distribuido (Sicodi) de la central de ciclo combinado Gómez Palacio, Durango. Se describe el esquema de control y su realización en *software*. Del esquema se detallan las estrategias de operación y automatización, supervisión y control. Del *software* se describen los componentes de la programación, la estructura de programas y datos del control y su implementación en estaciones de trabajo VAX 3100 bajo el sistema operativo VMS (Virtual Memory System).

Introducción

En un número anterior de *Boletín IIE* se describieron los aspectos generales de la modernización del sistema de control PACE 260 de Westinghouse por el Sicodi de Gómez Palacio desarrollado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en la central de ciclo combinado Gómez Palacio [Sánchez, P.M. *et al.*, 1996]. En este artículo se presenta el control coordinado del Sicodi de Gómez Palacio.

En el sistema de control PACE

El software del módulo de control instalado en la plataforma formada por las estaciones de trabajo VAX se compone de tres partes principales: el sistema operativo, la aplicación y la base de datos.

260 [Uram, Robert, 1977] las funciones de automatización, control y protecciones del control coordinado se ejecutaban en un sistema digital [Uram, Robert, 1977; Digital Control System, vol. 9] conjuntamente con el control digital para las turbinas de gas (TG) y de vapor (TV). Además, se contaba con interfaces para la comunicación con el centro de control analógico, encargado de realizar el acondicionamiento de las señales de campo y las funciones de control de los recuperadores de calor-generadores de vapor (REC), el condensador y pozo caliente (CyPC), y el tablero de operación original (llamado tablero BTG). La operación de la planta con el control coordinado se efectuaba desde una sección del BTG dedicada al mismo, contándose también con una sección de alarmas.

Como una primera fase en la modernización del control coordinado, en el Sistema de Control Distribuido desarrollado por el IIE para la central de ciclo combinado Dos Bocas, Veracruz, las funciones del control coordinado fueron implantadas en un módulo digital SAC [Delgadillo Valencia, M.A., 1993]. Además, se conservó el centro de control analógico y el tablero de operación original.

En el Sicodi de Gómez Palacio, que constituyó una segunda fase evolutiva, se reemplazaron el sistema digital

y el centro de control analógico originales por los módulos de control SAC-IBUSIII.

El tablero BTG fue sustituido por un conjunto de estaciones de trabajo (ET) en las que se dispone de la interfaz hombre-máquina (IHM) para la operación en los modos manual, automático y coordinado, contándose como respaldo con un tablero de mosaicos con un mímico del proceso, desde el cual se puede ejercer el comando manual de las TG, la TV, los REC y el CyPC. Las funciones de automatización, control y protecciones del control coordinado quedaron incorporadas en las estaciones de trabajo [Sánchez, P. M. *et al.*, 1996].

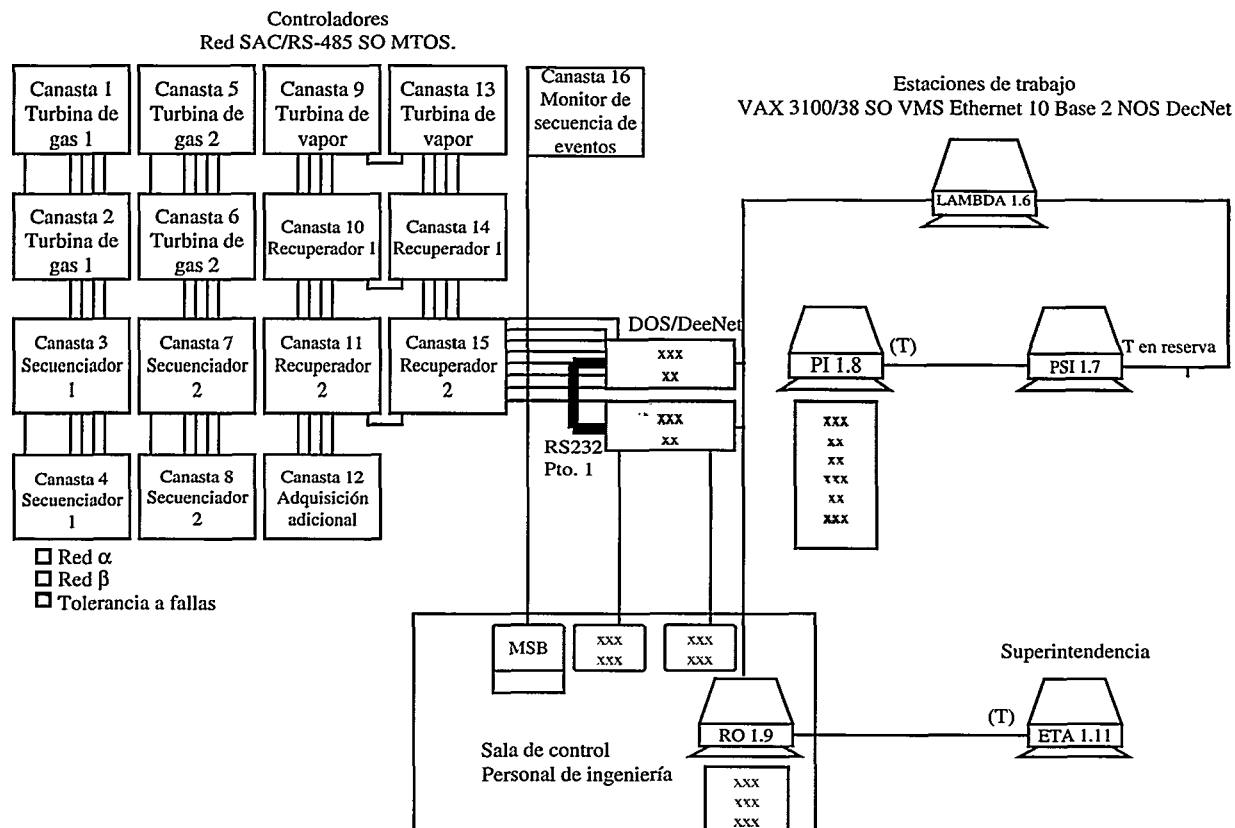
El objetivo del subsistema de vigilancia del control coordinado (SVCC) es el de garantizar que el proceso de generación de energía eléctrica en la planta no sea afectado por alguna falla originada por la ejecución de los programas del control coordinado o por problemas en las comunicaciones entre las estaciones de trabajo, el concentrador de comunicaciones y los controladores del Sicodi.

Configuración física

Como parte integrante del Sicodi de Gómez Palacio, el control coordinado puede ser comandado y monitoreado desde la interfaz hombre-máquina en alguna de las estaciones de trabajo de la red como

se muestra en la figura 1. El Sicodi de Gómez Palacio tiene una topología con redundancia uno a uno en las redes de comunicación y en los módulos de control SAC, pero si la estación de trabajo con el control coordinado llegara a fallar, la red formada por las estaciones de trabajo cuenta con un sistema de vigilancia remota [García G. L. *et al.*, 1994] que garantiza la transferencia del control, en línea, a otra estación de trabajo que fue seleccionada durante un proceso de inicialización. Además, si se tuviera una falla total de la red de estaciones de trabajo o del sistema de comunicaciones, entonces los programas del concentrador de comunicaciones [Flores, L.Z. *et al.*, 1994] junto con

FIGURA 1
Central ciclo combinado. Configuración de red de cuarto de control.



Fuente: cortesía de la central de ciclo combinado de Gómez Palacio, Durango.

los de la tolerancia a fallas [Ramírez V.C., 1994] y de comunicaciones, integrados estos dos últimos en los módulos SAC del control digital de las unidades, inician una serie de acciones que culminan con el rechazo al modo de operación manual de todas las unidades a fin de alertar al personal encargado de la operación.

Esquema de automatización y control

El control coordinado del Sicodi de Gómez Palacio fue desarrollado a partir de dos sistemas híbridos ya existentes: el PACE 260 [Sánchez P.M. *et al.*, 1996; Uram, Robert, 1977] y el SCD-DB [Delgadillo V., M.A., 1993]. Su diseño comprendió todas las funciones realizadas por sus antecesores y también el desarrollo de otras nuevas. Se trató de respetar, hasta donde fuera posible, la filosofía del diseño original [Digital Control System, vol. 97] con el objetivo de lograr la funcionalidad requerida. Como resultado, se consiguió un esquema unificado que comprende el rango completo de funciones de automatización, control y protección.

Estrategia de operación y automatización

Objetivos del control coordinado

Lograr la operación óptima de la central de ciclo combinado mediante el arranque de toda la planta y generando la máxima cantidad posible de potencia eléctrica (MW), sin necesidad de intervención del operador, excepto para solicitar una nueva demanda de carga total de la planta.

En general, el sistema de control coordinado comprende la ejecución de las siguientes tareas:

1) Ejecución del arranque y paro ordenado de la planta.

Una vez que se está ejecutando el control, el "vigilante" se encarga de realizar pruebas que garanticen que se cumplen los requisitos.

2) Supervisión de la aceleración y sincronización automática de las turbinas de gas y la turbina de vapor, y el estado de planta.

3) Generación de los puntos de ajuste para la distribución de la potencia eléctrica generada por las TG y la TV.

4) Generación de los puntos de ajuste para el control automático de combustión de los quemadores posteriores de los recuperadores.

5) Activación de protecciones.

El control coordinado es el mayor nivel operativo de automatización de la planta. Aquí el operador establece la demanda total de potencia eléctrica (MW) de la planta y la rapidez de carga (MW/mín.) desde la interfaz hombre-máquina en la estación de trabajo dedicada.

En este modo de control se puede tener un arranque total de la planta, iniciándose desde el arranque de las bombas de agua de alimentación de los recuperadores, de las TG y la TV (arranque en caliente) hasta el encendido de los quemadores posteriores. Todo esto en una secuencia previamente establecida (figura 2).

El sistema de control automáticamente arranca a cada equipo en la secuencia establecida, acelera y sincroniza los generadores de las turbinas, iniciando la generación de potencia eléctrica de las unidades para obtener los MW deseados. Las turbinas de gas son llevadas a generar la carga base y entonces se regula la combustión de los quemadores posteriores para producir el flujo de vapor adicional

que genere la carga necesaria de la turbina de vapor que satisfaga la demanda total de MW.

El control coordinado también es capaz de llevar a la planta a un paro total con la función de "paro normal", mediante un proceso de descarga que es esencialmente inverso al procedimiento de carga. Con el control coordinado, el sistema de control siempre utiliza la combinación más eficiente del equipo disponible de la planta. El operador desempeña el papel de observador de contingencias y el sistema de control le informará sobre las condiciones de alarma que se presenten.

Estrategia de supervisión y control

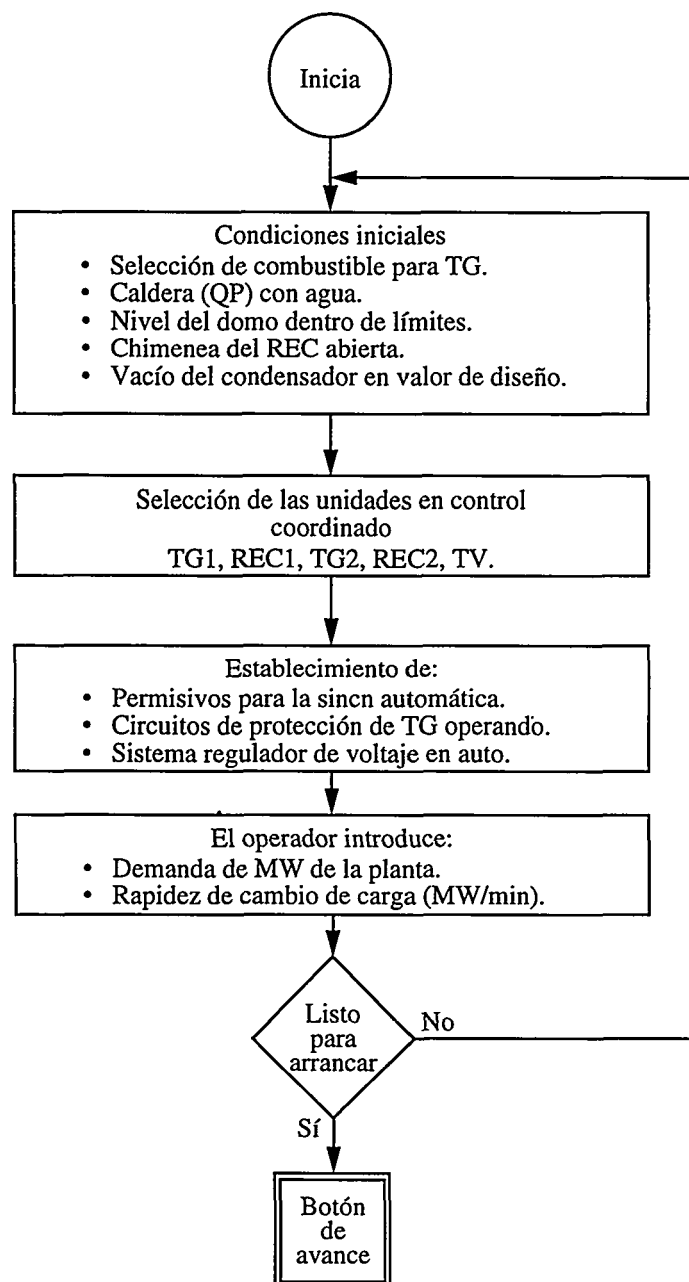
En la figura 1 se muestra la ejecución secuencial de las funciones del control coordinado. La ejecución es periódica y supervisada constantemente por el sistema de vigilancia remota, residente en otra estación de trabajo.

Cada bloque que aparece en el diagrama de la ejecución secuencial realiza funciones específicas (figuras 3 y 4). De esta forma es posible describir la estrategia general del control coordinado implantada para la operación automatizada de la planta de ciclo combinado, que incluye la supervisión de la red de comunicaciones, así como la integridad de la ejecución de los programas del control coordinado, que corresponde al bloque rechazo de control coordinado por falla de transmisión de red/sistema de vigilancia.

Software del control coordinado

Con la finalidad de conservar la estrategia de control original se utilizó la programación desarrollada para el control coordinado del Sicodi

FIGURA 2
Secuencia de arranque.



Con el objetivo de garantizar la continuidad de la operación y de mejorar la eficiencia de la generación se estableció una política de pruebas exhaustivas de los algoritmos de control.

lograr la habilitación funcional del control coordinado, además de resolver algunos problemas específicos del control derivados de su implantación en un nuevo ambiente de cómputo con requerimientos diferentes de sus antecesores.

Una vez justificada la necesidad de su inclusión y bajo la premisa de que el control coordinado residiría en una estación de trabajo VAX, que incluiría la base de datos del Sicodi, se desarrolló lo siguiente:

- 1) La especificación e identificación de las variables de intercambio, analógicas y digitales, entre el control coordinado y cada uno de los controladores dedicados a los subsistemas de la planta.
- 2) La especificación, el diseño y el desarrollo de funciones de enlace entre los programas del control coordinado en las estaciones de trabajo y los controladores SAC, lográndose la transferencia de la información (con las características requeridas de exactitud en las conversiones) y de sincronismo de señales entre equipos diferentes.
- 3) También se generó la especificación de los requerimientos de la interfaz hombre-máquina requerida para la supervisión y operación del control coordinado. El diseño del *software* se basó en el desarrollo de módulos operativos para las diferentes secciones del panel de control que se muestra en la figura 5.

Organización del software

El *software* del módulo de control

de Dos Bocas, Veracruz [Delgadillo Valencia, M. A., 1993], basada en el análisis del control digital del sistema PACE 260 [Digital Control System, vol. 9], más las respectivas adaptaciones.

Debido a que el control coordinado del Sicodi de Gómez Palacio debía residir en estaciones de

trabajo VAX, con el sistema operativo VMS, y utilizar como medio de comunicación entre estaciones de trabajo la red Ethernet, que a su vez se debería enlazar con la red formada por los controladores SAC, fue necesario proponer, especificar y diseñar nuevas herramientas de cómputo a fin de

FIGURA 3

Diagrama de la ejecución secuencial del control coordinado.

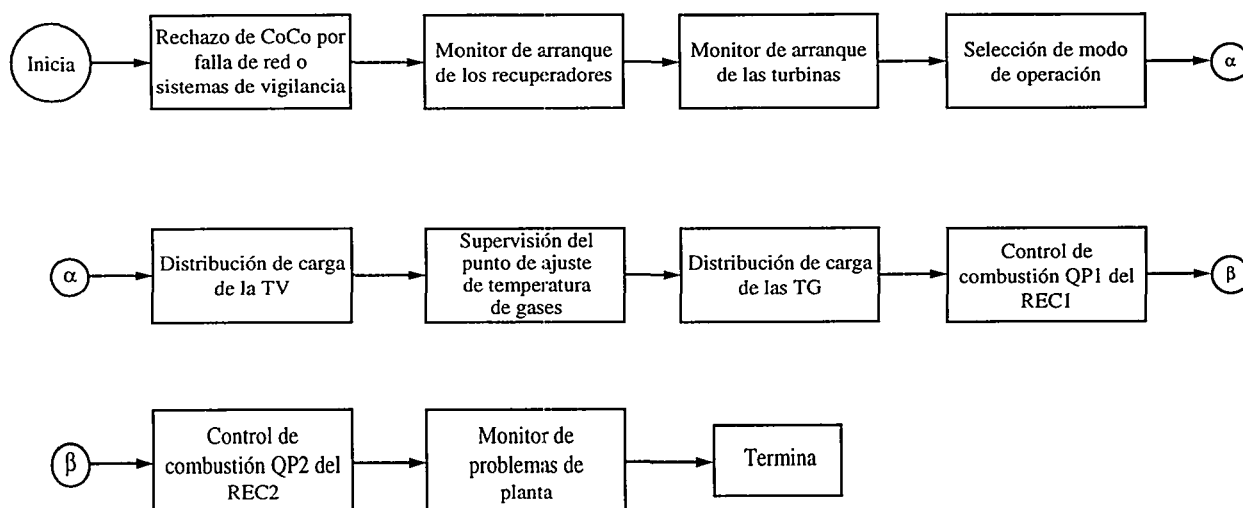
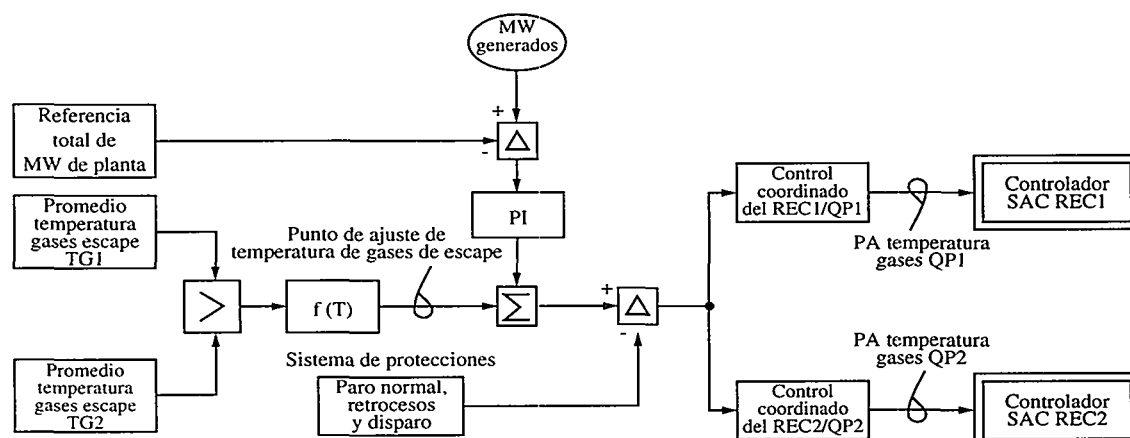


FIGURA 4

Control coordinado para la generación de las turbinas de gas y la turbina de vapor.



instalado en la plataforma integrada por las estaciones de trabajo VAX se compone de tres partes principales: el sistema operativo (SO), la aplicación y la base de datos (BD). El sistema operativo VMS es el núcleo de la programación del módulo de control. A diferencia del MTOS que se aplicó en los controladores SAC, no es un sistema operativo configurable diseñado para el desarrollo de aplicaciones multitarea en tiempo real.

Sin embargo, haciendo uso de algunos de los múltiples recursos del

sistema operativo VMS, fue posible implantar las tareas requeridas del control con las características de recurrencia y periodicidad necesarias para la ejecución [García, G.L. *et al.*, 1994].

Para el módulo de control se diseñó una estrategia basada en los recursos del sistema operativo VMS, que se encarga de asignar el valor del parámetro de recurrencia a cada una de las diferentes tareas de la aplicación. A diferencia de la aplicaciones implantadas en los controladores SAC, en el control

coordinado el número de tareas (o su equivalente) es mínimo (únicamente dos), ya que otras funciones como la adquisición y conversiones A/D y D/A las realizan otros procesos instalados en las estaciones de trabajo.

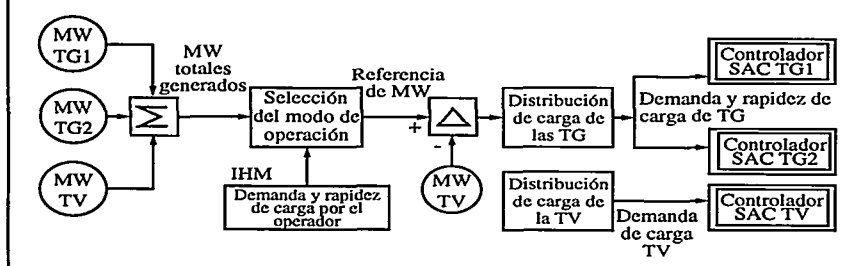
Componentes de la aplicación de control

Archivos de datos, funciones y tareas

Se cuenta con una base de datos relacional que facilita el acceso a la información y favorece la respuesta en tiempo real del sistema. El acceso

FIGURA 5

Control coordinado de combustión, QP.



se hace por medio de apuntadores e índices que minimizan el tiempo de procesamiento y los requerimientos de espacio en memoria. Las entidades de la base se definieron de acuerdo con los tipos de señales que manejan las distintas aplicaciones del sistema. Los programas de la aplicación se agruparon

funcionalmente en cinco archivos, como se muestra en la figura 6.

Vigilancia del control

El objetivo del subsistema de vigilancia del control coordinado (SVCC) es garantizar que el proceso de generación de energía eléctrica en la planta no sea afectado por alguna

El análisis retrospectivo del desarrollo del sistema de control muestra que los retos tecnológicos más relevantes fueron la adaptación del sistema de control en una nueva plataforma de cómputo dedicada al control en tiempo real de un proceso, la integración del equipo y el diseño de una estrategia global de pruebas que permitió depurar y evaluar uno a uno los diferentes componentes del Sicodi.

falla originada por la ejecución de los programas del control coordinado o por problemas en las comunicaciones entre las estaciones de trabajo, el concentrador de comunicaciones y los controladores del Sicodi (figura 6).

Los mecanismos de vigilancia del control coordinado del Sicodi fueron implantados como parte del

FIGURA 6

Panel de operación del control coordinado. Sistema de control distribuido de la central de ciclo combinado Gómez Palacio, Durango. Interfaz de operación-control coordinado.

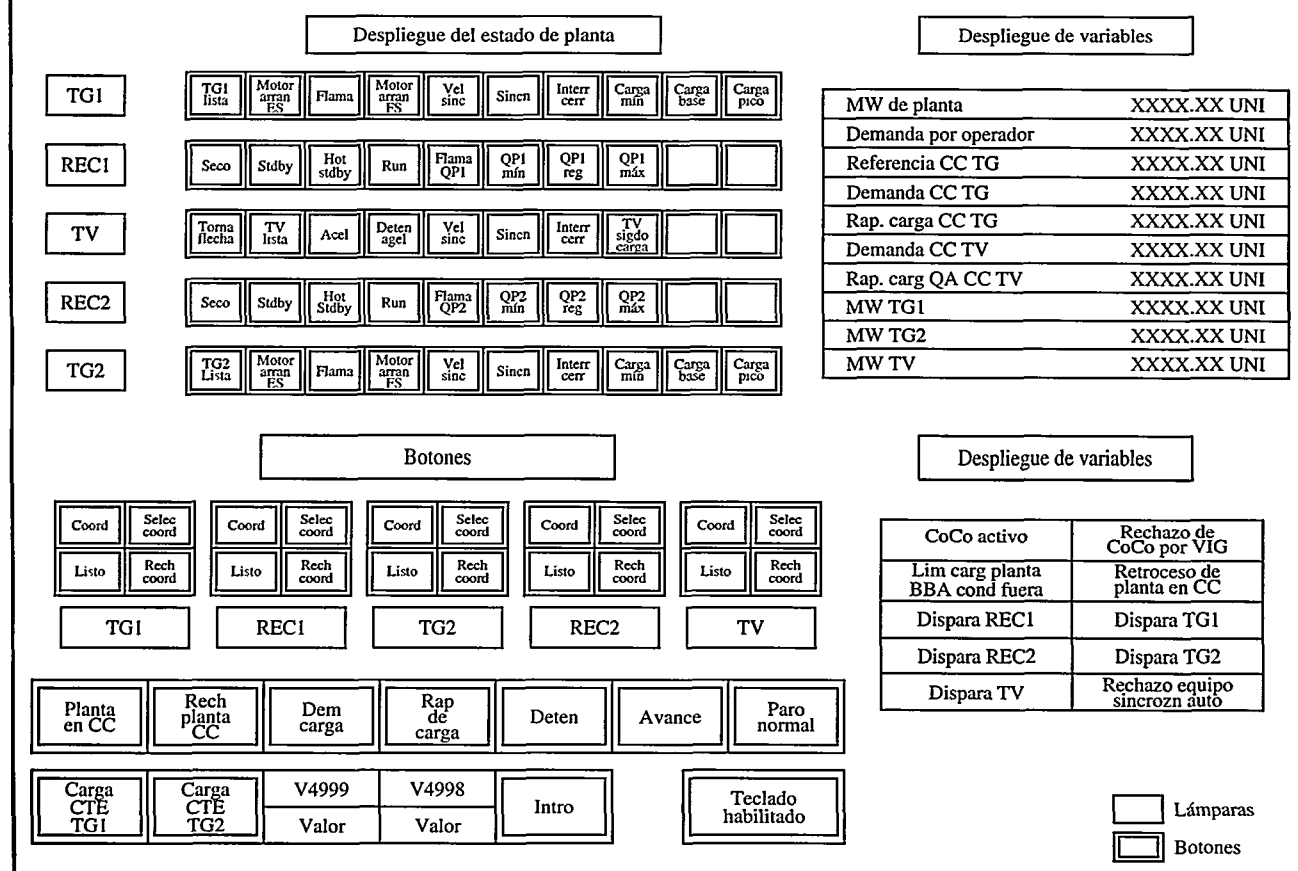
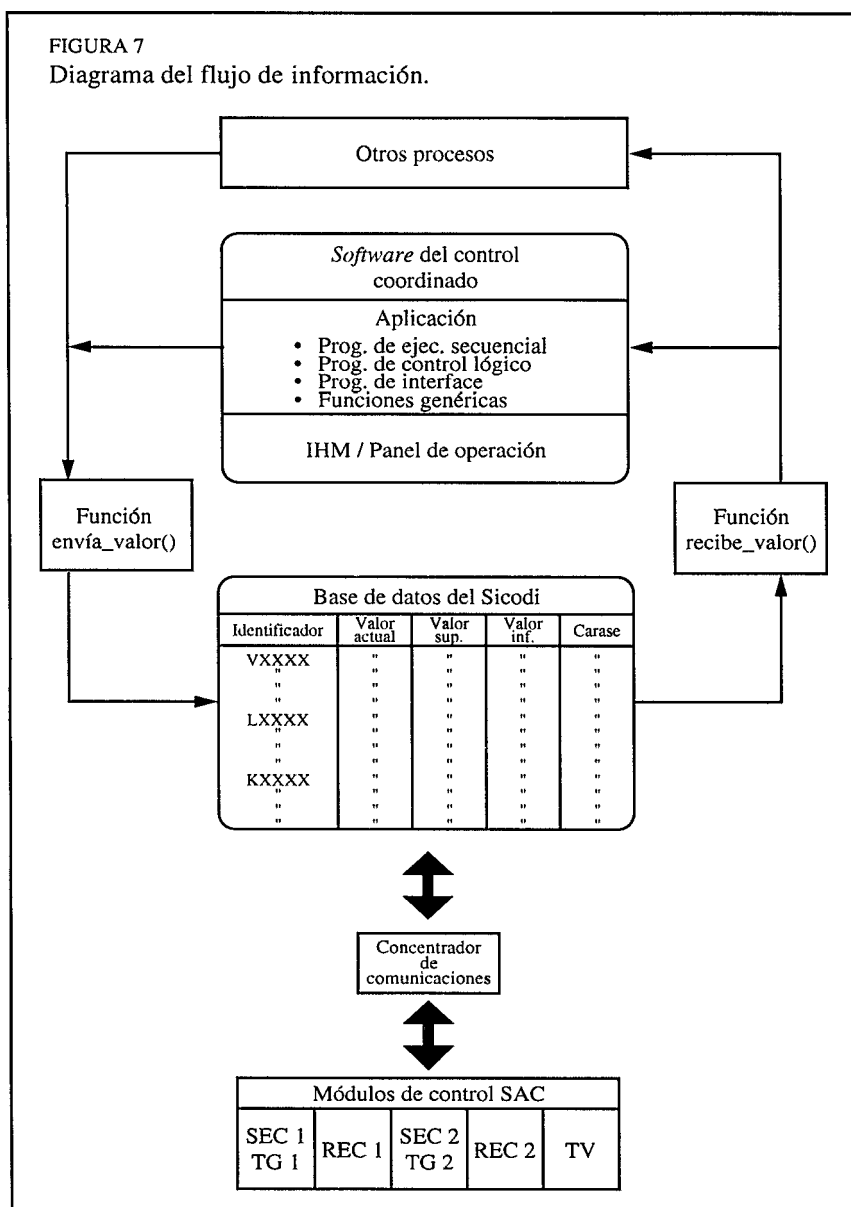


FIGURA 7

Diagrama del flujo de información.



desarrollo del Sicodi de Gómez Palacio para identificar situaciones críticas en la operación y detectar, corregir y alarmar si ocurriera alguna de las siguientes condiciones de la ejecución del control:

- Intento de ejecución en más de un nodo de la red de estaciones de trabajo.
- Paro imprevisto.
- Ejecución lenta.
- Falla en buses de comunicación de los controladores que realizan el

control coordinado.

- Pérdida de la estación de trabajo en donde reside el control coordinado.

Una vez que se está ejecutando el control, el "vigilante" se encarga de realizar pruebas que garanticen que se cumplen los requisitos. En caso de detectarse algún problema en la ejecución del control coordinado, se toman acciones que van desde realizar un rechazo parcial hasta un rechazo total del mismo. En caso de diagnosticarse falla de la estación en

donde reside el control coordinado, la estación remota realiza un rechazo total [García, G.L. *et al.*, 1994].

Pruebas del control coordinado

Con el objetivo de garantizar la continuidad de la operación y de mejorar la eficiencia de la generación se estableció una política de pruebas exhaustivas de los algoritmos de control, que abarcó desde las pruebas unitarias (validación lógica de algoritmos) en ambiente VAX/VMS, hasta pruebas integrales de la operación del Sicodi, que incluyeron el enlace de las estaciones de trabajo VAX con los controladores SAC.

Etapas de prueba y objetivos

Las etapas de pruebas realizadas fueron las siguientes:

1. Pruebas de activaciones (ambiente estaciones de trabajo VAX/VMS).
2. Pruebas unitarias de las funciones de control regulatorio y supervisorio (ambiente estaciones de trabajo VAX/VMS).
3. Pruebas de integración de las funciones de control regulatorio y supervisorio.
4. Pruebas de enlace del control coordinado-concentrador-canasta (laboratorio).
5. Pruebas de integración del control coordinado con controladores SAC y con el apoyo de probadores que simulaban la operación real del proceso (laboratorio), para lo cual se contó con un documento guía de las pruebas propuestas.
6. A fin de reproducir totalmente las condiciones del proceso real, se realizaron las pruebas de integración del control coordinado con todos los componentes necesarios del Sicodi de Gómez Palacio en la central de ciclo combinado, habiéndose utilizado los controladores de respaldo.

Para las pruebas de aceptación en planta se preparó una guía de pruebas de aceptación para el desarrollo con la participación de personal de la Comisión Federal de Electricidad.

Finalmente fue posible realizar pruebas de desempeño del control coordinado en línea variando la producción total de MW de la central. Para ello, se demanda primero un valor de MW superior al máximo posible, con lo que se logró llevar la generación hasta el máximo alcanzable (en el momento de la prueba) y, posteriormente, demandando un valor intermedio de la cantidad generada de MW.

Conclusiones

El análisis retrospectivo del desarrollo del sistema de control muestra que los retos tecnológicos más relevantes fueron la adaptación del sistema de control en una nueva plataforma de cómputo dedicada al control en tiempo real de un proceso, la integración del equipo y el diseño de una estrategia global de pruebas que permitió depurar y evaluar uno a uno los diferentes componentes del Sicodi.

Se considera relevante el desarrollo de la programación; esto es, la adaptación de la programación del sistema anterior (ambiente SAC) en el ambiente VAX/VMS, debido a que fue necesario especificar, diseñar, desarrollar y validar diferentes herramientas de *software* a fin de habilitar el control coordinado en las estaciones de trabajo VAX.

La metodología de validación aplicada durante el desarrollo fue sistemática y esto hizo posible detectar problemas y resolverlos a tiempo. Entonces se confirmó la importancia del plan de pruebas utilizado.

Prácticamente la evaluación del control coordinado en la etapa final de pruebas en planta y de la puesta en servicio contribuyó en la evaluación integral de los diferentes componentes del Sicodi, con lo que se obtuvo una experiencia importante en lo correspondiente a la integración de sistemas de control distribuido, ya que el desarrollo del sistema de control digital implica básicamente crear un sistema de *software* en tiempo real hecho a la medida y con requerimientos estrictos de seguridad. Su realización constituye un proyecto completo por sí mismo, en donde los conceptos dominantes corresponden al campo de la ingeniería de *software*.

Referencias

Delgadillo Valencia, M.A., *Modernización del control coordinado de la central de ciclo combinado Dos Bocas, Veracruz*, documento interno del proyecto 2223, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Departamento de Instrumentación y Control, 1993.

Digital control system, vol. 9, Coordinated Control, Westinghouse Electric Corporation.

Flores, L.Z. y B.J. Vázquez, *Sistema de adquisición y transferencia de información en tiempo real para un sistema de control distribuido*, documento interno del proyecto 2834, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Departamento de Instrumentación y Control, 1994.

García, G.L., C.L. Castelo, R. Cariño Garay y M. Sánchez Parra, *Protocolo de pruebas de vigilancia del control coordinado de la IHM del Sicodi-GP*, documento interno del proyecto 2834, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Departamento de Instrumentación y Control, 1994.

Ramírez, V.C. y M.A. Delgadillo V., *Fault tolerance in a distributed control system for combined cycle power plants*, IFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems, vol. II, Power Plants, diciembre de 1995, Cancún, Quintana Roo, México, pp. 165-169.

Sánchez, P.M., R.R. Garduño, E.G.

Madrigal, C.O. Gómez y A.R. Gutiérrez, "Modernización de los sistemas de control de la CTE de ciclo combinado Gómez Palacio, Dgo. Parte I: generalidades", *Boletín IIE*, marzo/abril de 1996, vol. 20, núm. 2, pp. 86-93.

Uram, Robert, *Computer control in a combined cycle power plant. Part I: the process and the computer*, IEEE PES Winter Meeting, del 30 de enero al 4 de febrero de 1977, Nueva York.

Uram, Robert, *Computer control in a combined cycle power plant. Part IV: the coordinated control system*, IEEE PES Winter Meeting, del 30 de enero al 4 de febrero de 1977, Nueva York.

MARINO SÁNCHEZ PARRA



Ingeniero en comunicaciones y electrónica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) y maestro en ingeniería (control) por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En 1988 ingresó al IIE. Actualmente es investigador y jefe de proyecto en la Unidad de Control e Instrumentación. Tiene experiencia en la implantación de sistemas de control digital para turbinas de gas, turbinas de vapor, recuperadores de calor, generadores de vapor y control coordinado de centrales termoelectricas. Recientemente ha participado en la especificación de sistemas de control avanzado para la modernización de las plantas de proceso en las refinerías de Pemex. Ha dirigido proyectos para el desarrollo y la

evaluación de técnicas de control moderno basadas en redes neuronales artificiales, control robusto y lógica difusa aplicados a centrales termoeléctricas. Se interesa en la investigación de los sistemas de control convencionales y control moderno de procesos industriales con aplicación a plantas de generación eléctrica. Ha publicado diversos artículos técnicos tanto en México como en el extranjero. Excatadrático de la UNAM y del IPN, actualmente también es profesor-investigador de tiempo parcial del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet). Es miembro de la sección Morelos del IEEE, de

la IFAC, del ISA y de la Academia Nacional de Investigación en Ingeniería Electrónica.

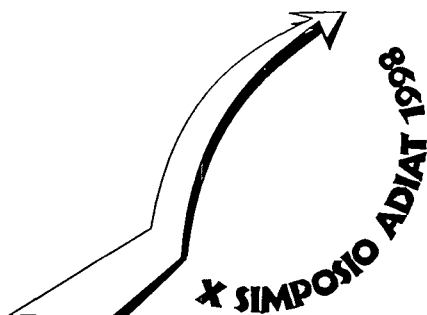
LUIS CASTELO CUEVAS



Ingeniero mecánico egresado de la Facultad de Ciencias Químicas e Industriales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos

(UAEM). En 1993 ingresó al IIE. Actualmente se desempeña como investigador de la Unidad de Control e Instrumentación. Tiene experiencia en la implantación del control coordinado de centrales termoeléctricas. Ha participado en la especificación de paquetes de licitación para la modernización de las plantas de proceso en las refinerías de Pemex. Su interés se centra en los sistemas convencionales de control y en la integración de sistemas digitales. Ha publicado artículos en revistas y congresos nacionales e internacionales. En 1994 obtuvo el segundo lugar en los Certámenes Nacionales de Tesis.

¿LE GUSTARÍA CONOCER CASOS CONCRETOS DE EMPRESARIOS QUE INVIERTEN EXITOSAMENTE EN TECNOLOGÍA?



adlat

Mayores informes:

Camino a Sta. Teresa No. 187, Col. Parques del Pedregal,
C.P. 14010, México, D.F. Tel: 665 9312, Fax: 665 9316
E-mail: <adlat@servidor.unam.mx>
ADIATNET: <www.lanla.mx/~adlat>

Impacto de la implantación de tecnologías modernas de automatización propiciadas por el Sicle en las subestaciones de transmisión de la CFE

Gustavo Gutiérrez Arriola

Resumen

Se presenta el impacto previsto por la implantación del sistema de automatización Sicle (Sistema de Información y Control Local de Estación) en la organización de la CFE, lo que incluye la operación diaria y cambios o influencia en las áreas de control, protección, medición, subestaciones y líneas y comunicaciones de la red de transmisión. Asimismo, se presentan los posibles efectos en los proveedores de sistemas y los fabricantes de equipo, así como la participación del IIE en el desarrollo de aplicaciones sobre monitoreo en línea para mantenimiento de equipo primario basado en el principio denominado "por condición" o "por requerimiento" del mismo equipo.

Introducción

La CFE ha instalado los primeros sistemas Sicle para automatizar subestaciones de transmisión en siete proyectos piloto correspondientes a diferentes regiones de transmisión del país y está en proceso la licitación de 360 sistemas adicionales que se instalarán en los próximos tres años (1998-2000).

El Sicle puede ejecutar funciones que anteriormente no se podían efectuar de manera automática en la subestación y pondrá información valiosa de la misma a disposición de usuarios actuales y futuros de operación, control, protecciones, medición, y mantenimiento de equipo primario.

Impacto del Sicle en la operación diaria

El Sicle se ha conceptualizado como un sistema de cómputo poderoso de la subestación que tendrá múltiples funciones además de las correspondientes a las tradicionales UTR (Unidades Terminales Remotas). Cuenta con una interfaz hombre-máquina (IHM) donde el operador de subestación puede tener el control y la supervisión de la misma. Se tiene una segunda consola local para ingeniería y acceso desde una tercera consola remota vía red amplia para consulta de información controlada por *passwords*. Además de las variables disponibles en los instrumentos y controles manuales de tablero tradicional, el operador de la subestación podrá supervisar y controlar gran cantidad de variables adicionales. Desde el Sicle se tendrán funciones que anteriormente sólo se consideraban en la estación maestra del centro de control: manejo de alarmas y registro de eventos, registros históricos de variables de interés, graficación de tendencias, impresión de todas estas funciones e impresión de reportes especiales en forma automática o por solicitud, etc. Todas estas funciones pueden aplicarse a todas las variables de la subestación, muchas de las cuales no son de interés para el operador de

sistema de un centro de control, pero sí muy importantes para los grupos involucrados en la subestación, (estado de equipos, mantenimiento, servicios de la subestación, etc.) y que, por tanto, serán filtradas para que su manejo quede circunscrito al nivel que realmente corresponden y se utilicen ventajosamente.

El enlace a los dispositivos electrónicos inteligentes (DEI), como son los relevadores de protección y equipos de multimedición, ha abierto las puertas a equipos que suministran gran cantidad de información referente a las fallas y al monitoreo de un sinnúmero de variables medidas o calculadas con registros históricos.

Aunque el operador de la subestación se verá liberado de algunas tareas rutinarias como el registro manual de variables cada determinado tiempo, deberá adaptarse al nuevo ambiente de cómputo, a partir del cual podrá efectuar acciones desde la consola del sistema, que normalmente efectúa en el tablero de la subestación. La bitácora o registro de turno también podrá llevarse dentro del registro informático de la subestación y ayudará en el análisis de las fallas conjuntamente con el registro en tiempo real de alarmas y eventos de resolución de 1 milisegundo y con los registros de fallas provenientes de los DEI.

El Sicle ayudará en la operación de la subestación en ocasiones en las que los equipos tienen que operar en condiciones de mayor esfuerzo térmico y/o eléctrico. Tal es el caso, por ejemplo, cuando se tiene alta temperatura ambiente y debido a ello el aire no puede reducir la de los sistemas de enfriamiento de transformadores, así como cuando ocurre una gran demanda de energía. En este tipo de situaciones, en las

El Sicle ayudará en la operación de la subestación en ocasiones en las que los equipos tienen que operar en condiciones de mayor esfuerzo térmico y/o eléctrico.

cuales el personal de la subestación está sometido a la tensión emocional que produce la operación cerca de los límites, se espera que el Sicle sea una herramienta de utilidad, tanto para el monitoreo de las condiciones críticas como para llevar los registros de tiempo de equipos sometidos a condiciones anormales.

Impacto en el área de control

El personal del área de control de la CFE, en su calidad de promotor e innovador de la tecnología del Sicle ha tenido que estar al tanto de los avances en nuevas tecnologías tanto de *software* como de *hardware*.

Dichos avances en el primer caso incluyen sistemas abiertos, *software* en tiempo real, sistemas operativos comerciales (UNIX, Windows NT o VMS), paquetes de control, nuevas formas de configuración y mantenimiento de los sistemas, etc.

Por el lado de *hardware* comprenden la utilización de redes de computo de subestación (LAN) y redes amplias (WAN), nuevos módulos de adquisición de datos y control y unidades de procesamiento, sincronización satelital, etc.

Se han elaborado especificaciones más completas que reflejen el nivel técnico del tipo de equipo solicitado sin ambigüedades y la elaboración de nuevos procedimientos de prueba de aceptación que incluyan las nuevas funciones y características no contempladas por las tradicionales UTR.

Asimismo, todos los grupos de control tendrán que capacitarse en el protocolo de comunicaciones

adoptado como estandar de la CFE (DNP 3.0).

También ha sido necesario promover una política de integración hacia los departamentos de protecciones, subestaciones y líneas, medición, comunicaciones y operadores de la subestación para que cada uno obtenga las mayores ventajas del sistema.

Impacto en el área de protección y medición

La integración de los relevadores de protección al Sicle permitirá que los reportes de fallas procedentes del equipo de protección estén disponibles tanto en forma local, en una consola del sistema, como en forma remota por medio de la red WAN en otros puntos de la red.

La sincronización satelital permitirá efectuar correlaciones de fallas y eventos con resolución a un milisegundo que afecten a más de una subestación.

Queda abierta la posibilidad para efectuar ajustes en las protecciones en forma remota, si algún día lo requiere el ingeniero de protecciones.

La integración de multimedidores permite el acceso a los mismos en forma remota y, sobre todo, ampliar o substituir las variables obtenidas por los módulos de adquisición de datos de SCADA y evitar redundancia de señales.

La incorporación al Sicle de los usuarios de protección, medición, control, comunicaciones y subestaciones propiciará que trabajen de manera más integrada desde las etapas de planeación, instalación, prueba, operación, expansión o ampliación de equipo.

Impacto en el mantenimiento de equipo primario

La implantación de monitoreo en

línea del comportamiento de equipo primario permitirá el establecimiento de técnicas denominadas "bajo condición" o "por requerimiento" de atención del mismo equipo, por medio de las cuales se detecta el desarrollo de fallas incipientes, evitando las revisiones periódicas, que muchas veces resultan innecesarias, y fallas adicionales en el peor de los casos.

Dentro de este campo se trabaja en el monitoreo de transformadores e interruptores como se indica más adelante. El ingeniero de subestaciones y líneas podrá auxiliarse de la información proporcionada por el sistema: registros históricos y graficación de tendencias en tiempo real e históricas de variables involucradas, detección de cruces de límites de variables de regiones de precaución o condiciones críticas.

Desde el punto de vista de registro y control de mantenimiento, ya sea preventivo o predictivo, el Sicle puede contener las bases de datos de mantenimiento e inventario de la subestación para consulta local o remota.

Impacto en contratistas de sistemas y fabricantes de equipo

La especificación del Sicle ha marcado la pauta en México para que los fabricantes e instituciones ofrezcan servicios con tecnología de vanguardia. Además de proporcionar *hardware* distribuido en las bahías de la subestación, el equipamiento debe soportar las condiciones ambientales y electromagnéticas propias de la subestación de potencia. Debe ser capaz de integrar equipo existente en la subestación, DEI actuales, así como DEI nuevos que van apareciendo con funciones cada vez mas avanzadas.

El sistema de cómputo multitarea

Desde el punto de vista de registro y control de mantenimiento, ya sea preventivo o predictivo, el Sicle puede contener las bases de datos de mantenimiento e inventario de la subestación para consulta local o remota.

en tiempo real y el subsistema de adquisición de datos distribuido en las bahías de la subestación del Sicle evitan la proliferación de pequeños sistemas de monitoreo de equipos o subsistemas de propósito especial dispersos en la subestación que no se comunican entre sí, constituyendo "islas de información" con señales que no se comparten y PC dedicadas con información que explota un sólo usuario.

La adopción del protocolo de comunicaciones DNP 3.0 ha ocasionado que cada día aparezcan más dispositivos que lo tengan implantado y que puedan comunicarse sin la necesidad de utilizar convertidores de protocolo o traductores especiales.

Los sistemas que se van a proporcionar también deben ser capaces de evolucionar tecnológicamente para evitar su obsolescencia en unos cuantos años. Es decir, deben estar integrados con base en redes locales capaces de la incorporación futura de nuevos módulos electrónicos o escalables, de la integración de nuevos DEI, de la actualización de nuevas versiones de *software* y sistemas operativos, aparte de contar con herramientas para desarrollo e integración de programas de aplicación proporcionados por terceros.

Participación del IIE en el desarrollo de programas de aplicación

Durante el desarrollo del proyecto

Sicle el IIE ha apoyado técnicamente a la CFE en la elaboración de especificaciones y procedimientos de evaluación de ofertas y procedimientos de prueba. Sin embargo la principal aportación del IIE se ha orientado al aprovechamiento de la gran infraestructura de cómputo y monitoreo de la subestación para el desarrollo de programas de aplicación específica, que no son proporcionados por el contratista principal del Sicle y que cubren necesidades específicas o políticas operativas de la CFE. Con esto también se contribuye a que la misma dependa menos tecnológicamente del contratista. Estos programas de aplicación se han orientado al mantenimiento predictivo de transformadores e interruptores.

Desarrollo de modelos de monitoreo para mantenimiento de equipo primario

En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques general por medio del cual se implementan las aplicaciones para monitoreo de transformadores en forma modular. Los modelos de cálculo son de tipo adaptivo para reflejar las condiciones cambiantes y envejecimiento de los equipos. Las señales de los sensores de campo son adquiridas por los módulos distribuidos de adquisición de datos. La información de entrada se deposita en tablas en la memoria de tiempo real. Los módulos toman la información de éstas, la validan, se verifican los valores de las variables contra límites prefijados para determinar si están dentro de rango normal o rebasaron dos niveles de alarma (precaución o crítica). Los algoritmos programados hacen el cálculos de la predicción de la variable para el siguiente muestreo,

la compararan con el valor medido y el calculado y graban la información en las memorias de salida (tablas o archivos). Cada determinado tiempo, dos días, por ejemplo, se recalculan los parámetros de los modelos adaptivos.

El operador puede observar la información en pantalla, gráficas en tiempo real/históricas, archivos o reportes históricos. Un programa activador de tareas en el tiempo (*scheduler*) activa las tareas de adquisición periódica programada, módulos o programas de cálculo cuando se requiere y el registro de información.

Una parte muy importante en el mantenimiento, tanto en el tradicional ejecutado cada determinado tiempo como en el de los métodos propuestos,

son los registros de históricos variables en el tiempo, correlacionados con otras variables (por ejemplo, medición de temperaturas, gases y condiciones de carga para transformadores), a partir de los cuales se hacen los análisis y se registra la experiencia y conocimiento de cada equipo en particular. Lo mismo pasa con el establecimiento de referencias comparativas, iniciadas idealmente al instalar el equipo o a partir del momento en que se iniciaron los registros. Para llevar a cabo todo este proceso de registro histórico de manera eficiente, es evidente la necesidad de automatizarlo.

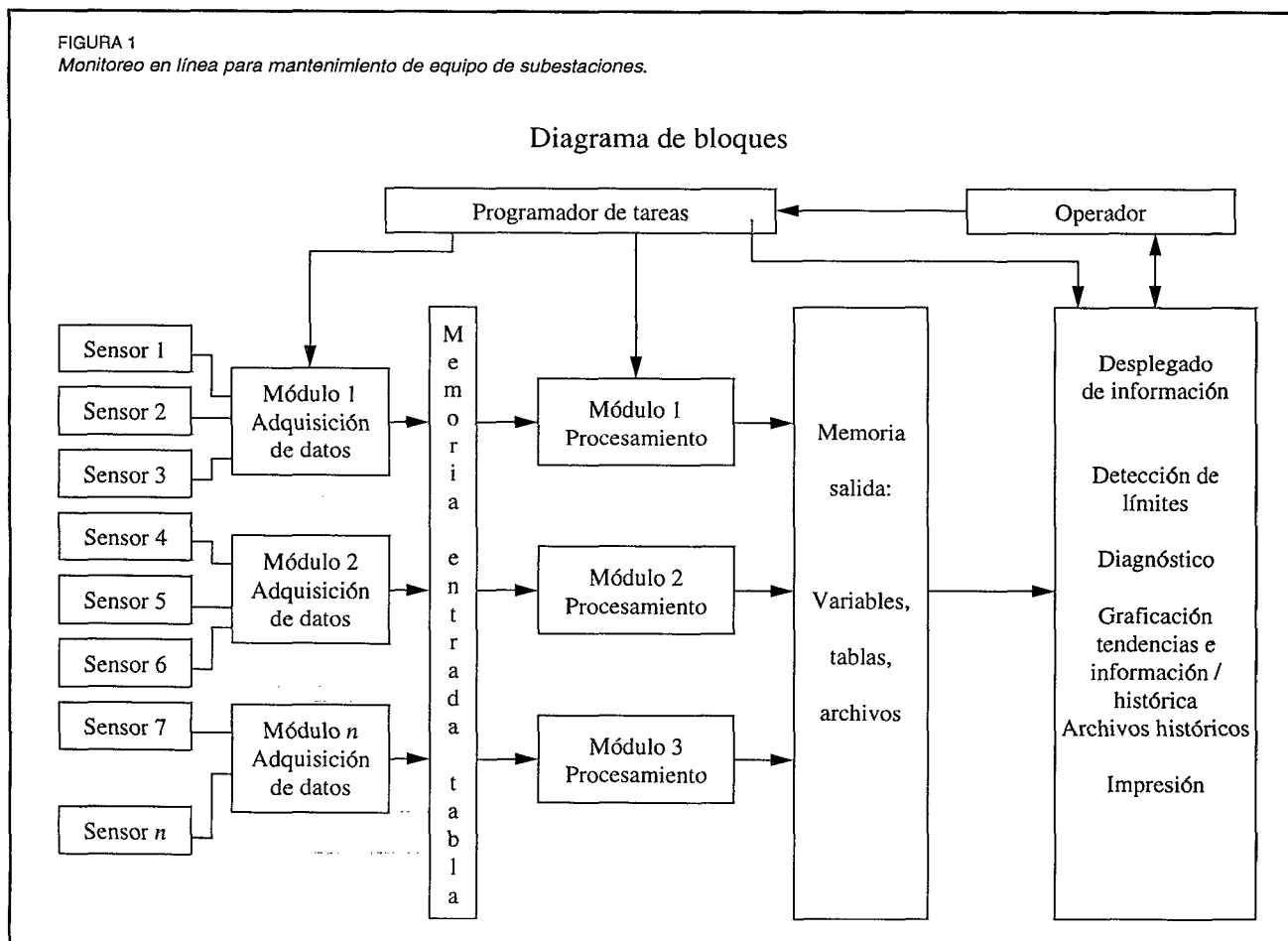
Modelo térmico para monitoreo de transformadores

Como aplicación inmediata se

La principal aportación del IIE se ha orientado al aprovechamiento de la gran infraestructura de cómputo y monitoreo de la subestación para el desarrollo de programas de aplicación específica, que no son proporcionados por el contratista principal del Sicle y que cubren necesidades específicas o políticas operativas de la CFE.

trabajó en el desarrollo de un modelo térmico para el monitoreo de transformadores (Gutiérrez *et al.*, 1997) que se implantó en la subestación de Temascal. Este modelo utiliza la temperatura del aceite, la del ambiente y la corriente en el lado de baja tensión (Crowley, 1990). Se verifica el rango normal o sus niveles de alarma (precaución y

FIGURA 1
Monitoreo en línea para mantenimiento de equipo de subestaciones.



crítica) y se hace la indicación correspondiente en el archivo de alarmas. El algoritmo predice la temperatura del aceite para el próximo muestreo, la cual se compara con la que se medirá. Se lleva registro histórico con graficación de tendencia e histórica de las variables medidas y calculadas. El modelo matemático recalcula sus parámetros cada dos días para adaptarse a las condiciones que van cambiando a lo largo de la vida útil del transformador

Modelo para monitoreo de gases en transformadores

El modelo propuesto a la CFE para el monitoreo en línea de gases para detección de fallas incipientes en transformadores utiliza la medición en línea del hidrógeno generado, el cual es representativo del estado del equipo. Para el muestreo y monitoreo en línea existen sensores, como el Hydran, que proporciona la cantidad de hidrógeno. El sistema verificará el nivel, los rangos normal, de precaución o crítico y el índice de generación y hará un cálculo de hidrógeno (ppm) para el siguiente muestreo, el cual se compara con la cantidad que se medirá; además, se llevan registros de todas las variables. Se considera que los transformadores siempre están trabajando con una cierta cantidad de gases, pero bajo condiciones de falla

el índice de generación puede incrementarse de manera drástica, por lo cual tal situación debe detectarse de manera inmediata. Crowley (1990) propone un modelo para predicción y registro histórico, similar al modelo de temperatura anterior. Según se indica, la aplicación de los dos modelos cubren una buena cantidad de fallas del transformador, como se presenta en el cuadro 1. En ambos casos, los registros históricos resultan muy importantes, tanto para análisis como para recálculo de los parámetros de los modelos adaptivos. El sistema en línea no verifica todos los gases generados, ya que resultaría muy costoso, pero sí uno representativo. En caso de detectarse una alteración, se activará una alarma del sistema en tiempo real que será la indicación para continuar posiblemente con un análisis cromatográfico o una inspección más detallada.

Monitoreo de interruptores

Se ha propuesto monitorear las principales causas de fallas de los interruptores en SF₆. Según una encuesta internacional organizada por CIGRÉ (Jansen *et al.*, 1994) se determinó que las principales fallas se deben a:

- Mecanismo operativo
- Funciones de control y auxiliares
- Hermeticidad en el sistema de gas SF₆

Debido a la gran variedad de tipos de mecanismos resulta difícil el desarrollo de un monitor genérico para el mecanismo operativo; sin embargo, el monitoreo se está orientando a la medición y registro histórico de ciertos parámetros significativos del interruptor (huella) que reflejen un deterioro a lo largo de su vida útil. Estos parámetros son: medición del tiempo transcurrido entre el comando de apertura y la interrupción de corriente, tiempo de recarga de resorte o utilización de compresor, número de operaciones y acumulación de corriente de falla o interrumpida y estado de bobinas. Respecto al sistema de gas se debe detectar la densidad tanto por su importancia en su función dieléctrica como para evitar fugas con repercusión ambiental y costo del mismo gas.

Algunas empresas eléctricas también recomiendan monitorear la corriente de arqueo y el tiempo del mismo, sobre todo en interruptores clave y con mayor frecuencia de operación. Por razones de costo, el monitoreo en línea de estas variables no se puede generalizar a todos los interruptores. Básicamente, el monitoreo de la carrera de contactos se obtiene de manera indirecta por el movimiento de la barra de operación, por medio de marcas cuyo paso es registrado por detectores ópticos, a partir de los cuales por medio de un

CUADRO 1

Modelos de falla de transformador de potencia

Modelo	Deformación embobinado	Daño en núcleo	Boquilla fracturada	Electrificación	Punto caliente	Arqueo corto	Burbujas en gas	Aceite contaminado
Térmico	X	X		X	X			
Gas			X	X	X	X	X	X

algoritmo de *software* se calcula el tiempo de apertura, cierre y sincronización de fases.

Combinado esto con las señales del sensor de corriente es posible obtener gráficas de corriente contra tiempo y el valor de I_t .

Conclusiones

Es un hecho que el Sicle puede ejecutar funciones que anteriormente no se podían efectuar de manera automática en la subestación y que pondrá información valiosa de la misma a disposición de usuarios actuales y futuros de operación, control, protecciones, medición y mantenimiento de equipo primario. Se espera que esto produzca un efecto sinérgico con la visualización de nuevas aplicaciones que redundarán en mayores beneficios que los inicialmente proyectados. La subestación de potencia siempre está sujeta a innovación y mejora, además de ser un campo de interés a escala mundial donde continuarán apareciendo nuevos dispositivos y técnicas para mejorar la confiabilidad y calidad del servicio y para alargar la vida útil del costoso equipo primario.

Referencias

Blaum, H. *et al*, CIGRE 1994 Session, París, ponencia 23/13-12: "Integrated

diagnostic for a modern high voltage GIS"

Crowley, T. H., *Automated diagnosis of large power transformers using adaptive model-based monitoring*, Massachusetts Institute of Technology, junio de 1990.

Deter *et al*, CIGRÉ 1996, ponencia 23-204: "Policy implications of the application of advanced substation technology".

Gutiérrez, G. y M. Vega, "Automatización de Subestaciones. Integración de aplicaciones sobre el Sicle", *Boletín IIE*, vol. 21, núm. 4, julio-agosto, pp 183-186, 1997.

IEEE Guide for the interpretation of gases generated in Oil-Immersed transformers. IEEE Std C57.104-1991

Jansen, A.L.J. *et al*, CIGRÉ 1994, paper 23-102: "A Summary of the final results and conclusions of the second international enquiry of the reliability of high voltage circuit breakers". Presentado por el grupo de trabajo 13.06

Jones, C.J. *et al*, CIGRÉ 1996 ponencia 23-203: "Guidelines for monitoring, control and supervision of GIS incorporating advanced technologies". Presentado por los grupos de trabajo 23-10 y 23-05.

Karrenbauer, H. y C. Neuman, CIGRE 1993 Session, Berlín, ponencia 120-3: "A concept for sel-checking and autocontrol of HV Circuit Breakers and its impact on maintenance an reliability".

Knab, H.J. *et al*, CIGRE Berlín 1993, ponencia 110-05: "Diagnostic tools for transformers in service".

Liñán R., *et al*, Monitoreo y diagnóstico en línea de transformadores de potencia. *Boletín IIE*, vol. 21, núm. 4, julio-agosto, pp 192-204, 1997.

Moreno, P. y S. Nájera, "Mexico automates large-scale substation", *Transmisión & Distribution World*, Octubre 1996, pp 62-67.

GUSTAVO GUTIÉRREZ ARRIOLA



Ingeniero mecánico electricista egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (1970), cuenta con un diplomado en el área de control y automatización por la Universidad de Salford, Inglaterra. En 1978 ingresó al IIE a la Unidad de Transmisión y Distribución. Cuenta con experiencia en proyectos relacionados con control supervisorio de redes eléctricas; en el diseño, prueba y transferencia de tecnología de unidades terminales remotas (UTR), equipo de pruebas para UTR y estaciones maestras. Actualmente se dedica a proyectos relacionados con la automatización e informática de subestaciones.

<http://www.iie.org.mx/>

Proyectos IIE

Iniciados

- Implantación de los módulos ANAPRES y simulador para el sistema BD'GEO/Yalu Galicia Hernández. Unidad de Energía Nuclear, División de Energías Alternas.
- Métodos teóricos y experimentales para la evaluación del impacto de emisiones sobre la calidad del aire/Rafael Castrejón García. Unidad de Materiales y Procesos Químicos, División de Energías Alternas.
- Evaluación del envejecimiento por corrosión de materiales metálicos/Jorge Uruchurtu Chavarín. Unidad de Materiales y Procesos Químicos, División de Energías Alternas.
- Evaluación de soldaduras del estator de la unidad 3 de la central hidroeléctrica Carlos Ramírez Ulloa, El Caracol, Guerrero/Miguel Ángel Marcial Amaro. Unidad de Materiales y Procesos Químicos, División de Energías Alternas.
- Análisis de las muestras de depósitos encontradas en los sistemas de bombeo electrocentrífugo (BEC) empleados en los pozos de la plataforma Eka del activo Ek Balam de Pemex/Georgina Blass Amador. Unidad de Materiales y Proceso Químicos, División de Energías Alternas.
- Metodología de planeación de transmisión/José Luis Ceciliano Mesa. Unidad de Análisis de Redes, División de Sistemas de Control.
- Desarrollo de un sistema para el autoentrenamiento de operadores de centrales generadoras y de una metodología de ajuste y validación de parámetros de modelos de procesos/Marco Antonio Arjona López. Unidad de Simulación, División de Sistemas de Control.
- Desarrollo de un sistema para la ejecución automática de procesamiento de pruebas de aceptación de simuladores/Víctor Octavio Huerta Hernández. Unidad de Simulación, División de Sistemas de Control.
- Asesorías y apoyo técnico a sistemas computacionales de la central nucleoelectrica de Laguna Verde/Sergio Alejandro Cortázar Ferral. Unidad de Supervisión de Procesos, División de Sistemas de Control.
- Diseño conceptual de un sistema integral de información para el diagnóstico del mantenimiento predictivo en centrales termoeléctricas/Sergio Aranda Ávila. Unidad de Supervisión de Procesos, División de Sistemas de Control.
- Efecto de los variadores electrónicos de velocidad en el comportamiento de las máquinas eléctricas rotatorias/Hermenegildo de la Torre Vega. Unidad de Equipos Eléctricos, División de Sistemas Eléctricos.
- Integración del proyecto definitivo de la norma NOM-002SEDE-1997/Marco Antonio Ponce Vélez. Unidad de Equipos Eléctricos, División de Sistemas Eléctricos.
- Desarrollo de metodologías para la administración de la demanda, ahorro de energía y confiabilidad de sistemas eléctricos industriales/Francisco García Juárez. Unidad de Uso de Energía, División de Sistemas Eléctricos.
- Elaboración de los proyectos de norma de eficiencia energética en edificios no residenciales y en edificaciones para uso habitacional hasta de tres pisos/Christopher Lionel Heard Wade. Unidad de Uso de Energía, División de Sistemas Eléctricos.
- Pruebas de envejecimiento acelerado para aislamiento polimérico utilizando sistemas de medición de corriente de fuga para laboratorio/Isaías Ramírez Vázquez. Unidad de Transmisión y Distribución, División de Sistemas Eléctricos.
- Análisis del comportamiento mecánico de componentes y equipos para el diagnóstico de su integridad estructural/Alberto López López. Unidad de Ingeniería Civil, División de Sistemas Mecánicos.

Combustión de gotas de combustóleos mexicanos con alto contenido de asfaltenos

José Francisco García Rodríguez

Resumen

En el presente trabajo se ha estudiado la combustión de gotas de combustible con 18% de contenido de asfaltenos. Los resultados obtenidos para este combustible se compararon con los obtenidos para otro con 12% de contenido de asfaltenos.

Las gotas fueron suspendidas en un filamento de platino y quemadas en un horno radiante esférico. El tamaño de las gotas varió entre 600 y 800 micras.

Las gotas de combustible con 12% de asfaltenos mostraron tiempos de combustión más cortos, un incremento del diámetro menor durante las etapas de combustión y un tiempo de quemado del residuo carbonoso también más corto que las gotas del combustible con 18% de contenido de asfaltenos.

Introducción

La mayor parte de los aceites residuales mexicanos llamados comúnmente combustóleos proceden de la refinación de mezclas de crudo ligero con pesado.

Una de las principales características de estos

La combustión de partículas individuales ha merecido la atención de algunos investigadores. Este interés se basa en que el estudio de la combustión de una gota proporciona información sobre la velocidad de quemado del combustible y sobre el comportamiento de la gota durante su quemado. Estos datos son importantes en el diseño y operación de sistemas de combustión industriales.

combustóleos, con respecto a aceites convencionales (aceites residuales con contenido de asfaltenos no mayor a 5% en peso), es el alto contenido de asfaltenos.

Los asfaltenos han llegado a representar hasta 40% en peso del combustible (Ayala *et al.*, 1985); esto ha significado notables aumentos en propiedades tales como viscosidad, contenido de azufre y vanadio (Martínez *et al.*, 1984, 1985).

La combustión de partículas individuales ha merecido la atención de algunos investigadores. Este interés se basa en que el estudio de la combustión de una gota proporciona información sobre la velocidad de quemado del combustible y sobre el comportamiento de la gota durante su quemado. Estos datos son importantes en el diseño y operación de sistemas de combustión industriales, por ejemplo, calderas (Lightman y Street, 1983, Kobayasi, 1954).

En este trabajo se ha estudiado la combustión de gotas individuales de dos combustóleos, uno de ellos con 12% de asfaltenos (LAC) y el otro con 18% de asfaltenos (HAC). El combustóleo con 12% de contenido de asfaltenos ha sido tomado como base de comparación.

Aspectos teóricos

Los aspectos teóricos del quemado de una gota de

combustible se basan principalmente en suponer que la combustión es un fenómeno controlado por transferencia de calor y además implica una velocidad de reacción química mayor que la de transferencia de masa, lo cual conduce a la conocida ley del cuadrado del diámetro. La ecuación que representa esta ley tiene la forma siguiente:

$$t = Kd_o^2$$

en donde t representa el tiempo de quemado, K representa la constante de combustión y d_o el diámetro inicial de la gota. Esta ecuación fue desarrollada experimentalmente y concuerda en forma aceptable con los planteamientos teóricos sobre la combustión de combustibles líquidos en forma atomizada (Kobayasi, 1955), sobre todo en el caso de combustibles ligeros.

Sin embargo, es posible suponer también que esta ley no se cumpla si el mecanismo de combustión es más complicado que una simple evaporación y combustión en fase gaseosa de las moléculas evaporadas.

Los aceites residuales o combustóleos son sistemas muy difíciles de estudiar ya que están compuestos por fracciones volátiles intermedias y no volátiles.

Éstas pueden hacer que el aceite residual inicie su quemado de forma muy similar a los compuestos puros con alta volatilidad, lo que, a su vez, significa el cumplimiento de la ley del cuadrado del diámetro. Sin embargo, una vez agotados los compuestos volátiles, quedan compuestos muy susceptibles de formar un residuo carbonoso sólido, que domina la etapa final de la combustión de la gota. La formación de residuo carbonoso requiere de transformaciones químicas que necesariamente están compitiendo

Entre más ligero es un combustible líquido, sus características de combustión se apegarán más a la ley del cuadrado del diámetro.

con el proceso de volatilización y combustión. Además, como la última etapa está constituida por la combustión de carbón, es de esperarse una mayor influencia del mecanismo de control químico. Por lo tanto, en el quemado de gotas de aceites residuales difícilmente se puede esperar que el mecanismo de combustión se apegue al descrito por la ecuación de la ley del cuadrado del diámetro.

La conclusión de este breve análisis es que entre más ligero es un combustible líquido, sus características de combustión se apegarán más a la ley del cuadrado del diámetro.

Por el contrario, cuanto mayor complejidad del combustible y más pesado sea (como es el caso de los aceites residuales nacionales), tanto más complicado será su comportamiento.

El cuadro 1 muestra algunas de las características de los combustibles utilizados en este trabajo.

Aspectos experimentales

En la figura 1 se muestra una vista del horno esférico utilizado en este

estudio. En esta figura se observa, lateralmente, el horno esférico, el cual está dividido en dos hemisferios.

Además, el horno tiene, diametralmente opuestos, dos puertos, uno de ellos para introducir la gota de combustible suspendida en el filamento al interior del horno y el otro para observar y registrar mediante una cámara de video de alta velocidad el proceso de quemado de las gotas. Se observa también en esta figura una lámpara de 1000 W instalada en uno de los hemisferios, la cual se utiliza como fuente de energía para proporcionar a las gotas el calor requerido para su ignición.

Resultados

El cuadro 2 muestra los resultados de combustión obtenidos para algunas muestras seleccionadas de los dos combustibles estudiados. Se eligieron tres diferentes diámetros de gota. Para el caso de combustible con mayor contenido de asfaltenos, los diámetros correspondieron aproximadamente a 620, 710 y 790 micras. Para el caso del combustible con menor contenido de asfaltenos, los diámetros fueron aproximadamente de 600, 710 y 840 micras.

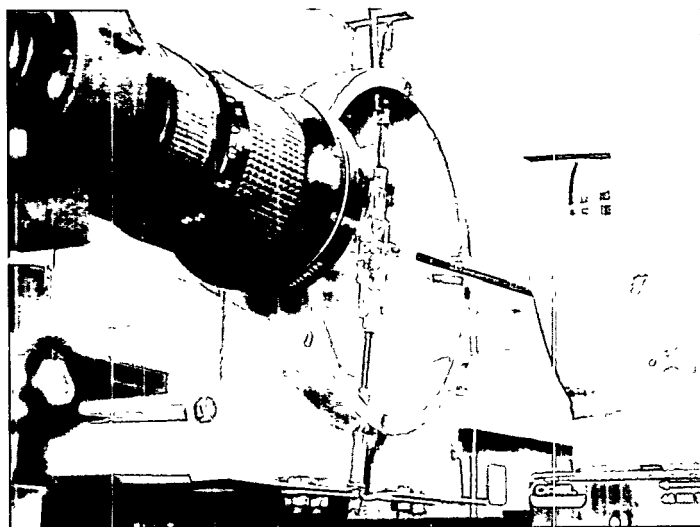
La relación entre el diámetro máximo (d'_{max}) y el diámetro inicial (d_o) de las gotas fue muy similar en

CUADRO 1

Propiedades físicas de los combustóleos estudiados.

Propiedad	LAC	HAC
Asfaltenos C_s (% peso)	12.0	18.0
Azufre (% peso)	4.5	4.61
Peso específico (20/4 °C)	0.99	1.003
Viscosidad (50 °C, m ² /s)	0.00118	0.00126

FIGURA 1
Vista del horno esférico experimental.



CUADRO 2
Resultados experimentales de combustión de algunos diámetros de gotas seleccionadas

Muestra	HAC			LAC		
Diámetro inicial (d_0) (μm)	620	710	790	600	710	840
d_{coque}/d_0	2.7	2.5	2.6	2.5	2.6	2.5
d_{max}/d_0	0.82	0.78	0.7	0.63	0.65	0.75
Tiempos característicos (ms)						
Ignición	368	400	410	420	430	450
Combustión de compuestos ligeros	520	580	580	650	664	686

d_0 = diámetro inicial

d_{coque} = diámetro del coque

d_{max} = diámetro máximo

ambos combustibles investigados. La relación entre el tamaño del coque formado (d_{coque}) y el diámetro inicial (d_0) de las gotas fue, en la mayoría de los casos, mayor para el combustóleo con mayor contenido de asfaltenos.

Los tiempos de las diferentes etapas de quemado también se

investigaron. Los resultados indican que el tiempo de combustión de los compuestos ligeros de las gotas (antes de la formación del coque) fue mayor para el combustible con menor contenido de asfaltenos. En contraste, el periodo de ignición para las gotas con mayor contenido de asfaltenos fue menor que el de las

El parámetro de los asfaltenos puede tener un efecto importante en el tiempo total de quemado del combustible. Más aún, este tipo de combustibles necesita de tiempos de residencia más largos antes de alcanzar su combustión completa.

gotas con bajo contenido de asfaltenos.

Por otro lado, se investigaron los tamaños del residuo de coque formado de la combustión de gotas, con diámetros entre 600 y 800 micras para el combustible con mayor contenido de asfaltenos, y de gotas de entre 580 y 870 micras de diámetro para el caso del combustóleo con menor contenido de asfaltenos. Se observó que los tamaños del coque de las gotas para el HAC fueron mayores (entre 550 y 780 micras) que los de las gotas del LAC (entre 350 y 635 micras). Es importante mencionar que el filamento afecta estas mediciones creando un límite inferior artificial en el tamaño de las partículas de coque.

De este análisis se resume que, para diámetros iniciales e iguales de ambos combustibles (con todas las otras condiciones similares), el tiempo total de quemado para el combustible con mayor contenido de asfaltenos fue mayor que para el de menor contenido. Esta diferencia se debe, principalmente, a que la etapa de combustión de las partículas de coque es más larga para el HAC que para el LAC. Este hecho podría asociarse con la formación del residuo carbonoso, el cual está fuertemente ligado con el contenido de asfaltenos del combustible. En consecuencia, el parámetro de los asfaltenos puede tener un efecto importante en el tiempo total de quemado del combustible. Más aún, este tipo de combustibles necesita de

Los valores calculados de la constante de velocidad de quemado para los combustibles estudiados mostraron una buena aproximación a los valores encontrados en la literatura sobre el tema.

tiempos de residencia más largos antes de alcanzar su combustión completa.

Constante de velocidad de quemado

Se ha reportado (Godsave, 1952, Isoda y Kumagai, 1958) que la velocidad de quemado de gotas en reposo es directamente proporcional a la primera potencia del diámetro de la gota. Asimismo, resultados experimentales sobre combustibles volátiles han mostrado que la relación entre el diámetro de la gota y el periodo de evaporación está dado por la siguiente relación:

$$d_0^2 - d^2 = Kt$$

en donde d_0 es el diámetro inicial de la gota, K es la constante de evaporación y t el tiempo de quemado.

El coeficiente de evaporación es una constante que caracteriza la velocidad de disminución del tamaño de la gota y es función de las propiedades del combustible y de las condiciones ambientales alrededor de la gota. El valor de la constante se determina directamente de la pendiente de la curva entre el cuadrado del diámetro inicial de la gota y el tiempo de combustión. Se ha observado (Isoda y Kumagai, 1958) que, después de la etapa de ignición, un incremento en la pendiente de la curva diámetro/tiempo se debe al aumento en la cantidad de calor transferido desde la flama hasta la superficie de la gota.

Esto significa que para un combustible volátil, la ley del cuadrado del diámetro se mantiene en la superficie de la gota, con difusión de una mezcla vapor/aire desde la superficie de la gota hacia los alrededores de la flama.

Algunos estudios (Kobayasi, 1954, Braide *et al.*, 1979) han indicado que, puesto que la gota experimenta algunos efectos de expansiones y contracciones durante su quemado, y se forma un residuo carbonoso, la ley del cuadrado del diámetro no es válida, entonces, una constante equivalente de velocidad de quemado puede definirse en términos del cuadrado del diámetro inicial de la gota, el cual es aproximadamente proporcional al periodo de combustión de los volátiles del mismo combustible y bajo las mismas condiciones. Esta relación, llamada algunas veces como la ley del diámetro inicial al cuadrado, se usó en este estudio para investigar la relación entre el cuadrado del diámetro inicial relativo al periodo de combustión de

los volátiles. El cuadrado del diámetro inicial contra el tiempo de quemado de los volátiles se grafica en la figura 2, en la cual se observa que no se cumplió la ley del cuadrado del diámetro.

Esto puede deberse a que las gotas de combustóleo, en este trabajo, se quemaron en estado no estacionario.

Por otro lado, con los resultados experimentales se evaluó la siguiente constante:

$$K_b = \frac{(d_0^2 - d_{th}^2)}{t_b}$$

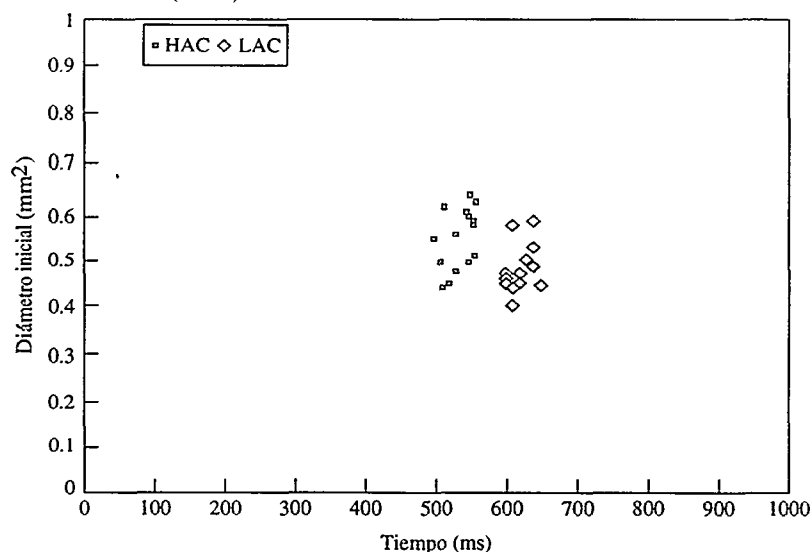
en donde d_0 es el diámetro inicial de la gota, d_{th} es el diámetro del termopar, K_b es la constante equivalente de velocidad de quemado y t_b el tiempo de quemado.

Esto significa que, dado el diámetro inicial de una gota de aceite residual, es posible evaluar el tiempo de vida de la gota usando estos coeficientes.

Los valores calculados de la

FIGURA 2

Constante equivalente de velocidad de quemado para combustóleo con alto contenido de asfaltenos (HAC) y para el combustóleo con bajo contenido de asfaltenos (LAC).



Como se esperaba, la constante de velocidad de quemado para el combustóleo con mayor contenido de asfaltenos fue más grande que para el que tenía menor contenido. Puesto que la constante de velocidad de quemado indica el tiempo de combustión de los compuestos volátiles del combustible, y pequeñas cantidades de material ligero están presentes en el combustóleo con alto contenido de asfaltenos, éste se quema más rápido que otro con una mayor cantidad de volátiles.

constante de velocidad de quemado para los combustibles estudiados mostraron, como se observa en el cuadro 3, una buena aproximación a los valores encontrados en la literatura sobre el tema. Las diferencias pueden atribuirse al tipo de combustible empleado y a las condiciones experimentales. Como se esperaba, la constante de velocidad de quemado para el HAC fue mayor que para el LAC. Puesto que la constante de velocidad de quemado indica el tiempo de combustión de los compuestos volátiles del combustible, en el combustóleo con mayor contenido de asfaltenos, están presentes pequeñas

cantidades de material ligero; dicho material se quema más rápido que otro con una mayor cantidad de volátiles.

Morfología del residuo

La morfología de los residuos obtenidos de la combustión de gotas de los combustóleos estudiados se analizó mediante microscopía electrónica de barrido. En la figura 3 se presentan los resultados del análisis de los residuos del combustóleo con mayor contenido de

asfaltenos, y en la figura 4 se presenta la morfología de los residuos del combustóleo con menor contenido de asfaltenos. Se observa que, para ambos residuos, la superficie presenta una estructura porosa, con cavidades, hoyos y paredes delgadas (aproximadamente de una micra). Se aprecia que el número de cavidades es mayor para el HAC que para el LAC. Se determinó que el proceso de combustión tiene una etapa de transición de una combustión estable

CUADRO 3
Constante de velocidad de quemado de los dos combustóleos estudiados y comparacion con valores de la literatura.

Combustible	Valores calculados (mm²/s)	Observaciones (tem- peratura del horno)
HAC	0.957	
LAC	0.773	
	valores de la literatura (mm²/s)	
Medium fuel oil	0.478 (1)	700 °C
Heavy fuel oil	0.507 (1)	700 °C
Heavy fuel oil 'A'	0.94 (2)	800 °C
Heavy fuel oil 'B'	0.86 (2)	800 °C

(1) Braide *et al.*, (1979).
(2) Kobayasi, (1954).

FIGURA 3
Microfotografía del residuo de la combustión de una gota del HAC.

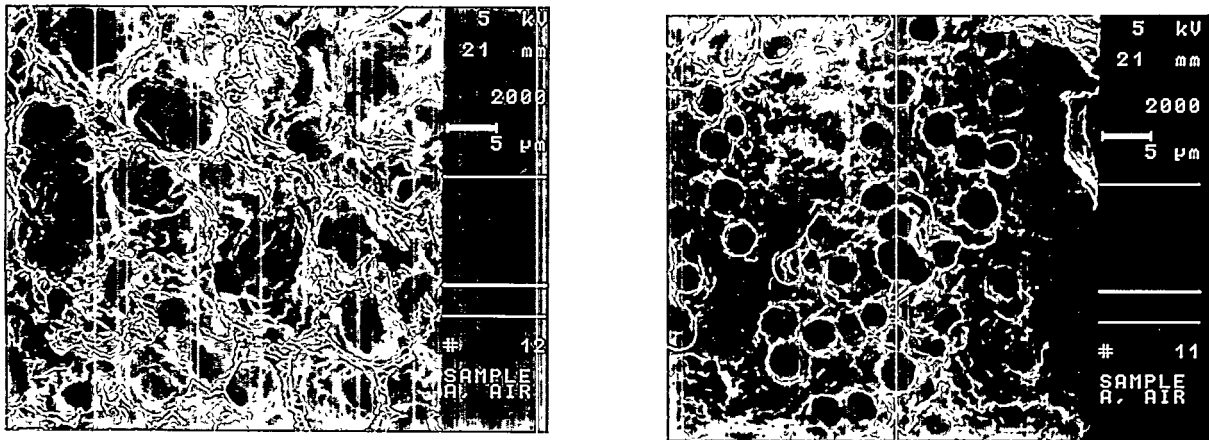
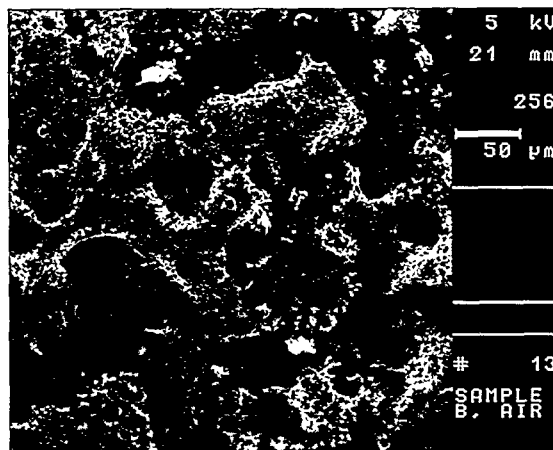
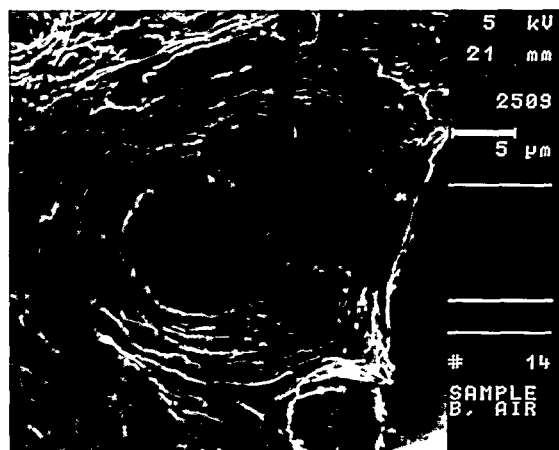


FIGURA 4

Microfotografía del residuo de la combustión de una gota del LAC.



a otra con ruptura múltiple en las últimas etapas de combustión de los compuestos ligeros. Esta ruptura es la causa probable de la formación de los hoyos que se observan en la superficie de los residuos.

Conclusiones

Las gotas de combustible con 12% de contenido de asfaltenos mostraron tiempos totales de combustión más cortos, un incremento del diámetro menor durante las etapas de combustión y un tiempo de quemado del residuo carbonoso también más corto que las gotas del combustible con 18% de contenido de asfaltenos.

Referencias

Ayala, P. J., N. Hernández, E. Alarcón, y L. Panama, *Determinación de propiedades especiales de los combustibles para su uso en el diseño de centrales termoeléctricas*, Reporte IIE/12/1919/I 03/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1985.

Braide K., G. Isles, J. Jordan y A. Williams, "The combustion of single droplets of some fuel oils and alternative liquid fuel combinations," *Journal of the Institute of Energy*, vol. 52, núm. 412, pp. 115-120, 1979.

Godsave A., "Studies of the combustion

of drops in a fuel spray", *The burning of single drops of fuel*, Fourth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp. 818-828, 1952.

Isoda, H. y S. Kumagai, "New aspects of droplet combustion", *Seventh International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 523-531, 1958.

Kobayasi, K, "An experimental study on the combustion of a fuel droplet", *Fifth International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 141-148, 1954.

Lightman, P., y P. J. Street, "Single droplet behaviour of heavy fuel oils and fuel oil fractions", *Institute of Energy*, vol. 56, núm. 3, 1983.

Martínez A., G. Ruiz, *Caracterización de combustibles utilizados en generadores de vapor*, Resumen final, IIE/12/1675/I 06/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1984.

Martínez A., J. Ayala, *Caracterización de combustibles utilizados en generadores de vapor, parte II*, Resumen y análisis de resultados, IIE/12/1829/I 09/F Vol.-1, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1985.

FRANCISCO GARCÍA RORÍQUEZ

Ingeniero Químico (1979) por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos; maestro en Sistemas Computacionales (1983) por el



Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey y doctor (1997) en Tecnología de Combustibles por la Universidad de Salford, Inglaterra. Ingresó como investigador al IIE en 1980 al Departamento de Combustibles Fósiles. Actualmente trabaja en la Unidad de Procesos Térmicos. Su área de especialidad ha sido la combustión de combustibles líquidos a nivel de gotas individuales. Ha participado en diversas áreas relacionadas con la combustión de aceites residuales mexicanos.

Combustión de emulsiones de agua en combustóleo y perspectivas de aplicación en México

René Ocampo Barrera

Resumen

Se quemaron gotas de un combustóleo, con un contenido de asfaltenos del 16% en peso, y de tres emulsiones preparadas con 5, 15 y 25% de agua. La combustión de las gotas se llevó a cabo en un horno esférico empleando la técnica de gota suspendida en un filamento. El proceso de combustión se registró mediante un sistema de video de alta velocidad. Se encontró que la superficie de las partículas de coque, producidas por la combustión de emulsiones, tuvo hoyos más grandes que la del combustóleo. Además, el tiempo de quemado de todas las emulsiones fue menor que el del combustóleo, por lo que es de esperarse que emulsionar el combustóleo puede ayudar a reducir las emisiones de partículas inquemadas.

Introducción

El combustóleo, debido a su bajo costo, se utiliza ampliamente como fuente de energía en calderas de diversas industrias, refinerías y centrales eléctricas. Sin embargo, la forma en que se obtiene —residuo de petróleo que pasa por diversos

En el IIE se están realizando investigaciones a diferentes niveles, fundamental y horno piloto, relacionadas con la combustión de emulsiones de agua en combustóleo. El objetivo es analizar la factibilidad de mejorar la combustión de combustóleo con esta tecnología.

procesos de refinación cada vez más severos— provoca que su calidad haya disminuido paulatinamente a través del tiempo. Esto, aunado a que la mayoría de los equipos en donde se utiliza se diseñaron para usar uno de mejor calidad, ha traído como consecuencia que se hayan incrementado las anomalías en estos equipos. Dentro de los problemas que se encuentran por la combustión de combustóleo nacional se pueden mencionar: ensuciamiento anormal de las superficies de intercambio de calor, disminución de eficiencia térmica y de combustión e incremento de emisiones. Este último efecto, particularmente la emisión de partículas suspendidas totales, se ha relacionado con el contenido de asfaltenos en el combustóleo. Esto es, que a mayor contenido de asfaltenos, mayor emisión de partículas inquemadas [Lightman y Street, 1983; Lawn *et al.*, 1987; Molino y Dusatko, 1987; Jacques *et al.*, 1976].

Debido a lo anterior, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) realiza estudios para mejorar la combustión de combustóleo. Dentro de estos estudios se encuentra la emulsificación de agua en combustóleo.

En otras partes del mundo se han realizado estudios fundamentales de combustión de emulsiones de agua en aceite para obtener conocimiento en este campo. En estas investigaciones se emplearon hornos pequeños con gotas individuales suspendidas en un filamento o en caída libre

[Dryer 1976; Marrone *et al.*, 1983; Spadaccini y Pelma, 1976; Gollahalli, 1979; Gollahalli *et al.*, 1981; Marrone *et al.*, 1983]. En algunos de estos trabajos, se emplearon combustibles residuales [Ivanov y Nefedov, 1965; Jacques *et al.*, 1976; Gollahalli, 1979; Nakamura *et al.*, 1981] con un máximo de asfaltenos de 10% en peso, y en otros estudios se utilizaron n-parafinas [Dryer *et al.*, 1976; Lasheras *et al.*, 1979 y 1980; Dryer, 1982].

Como consecuencia de las diferentes técnicas utilizadas y de los diferentes combustibles empleados, los resultados que se encontraron son variables. Por ejemplo, hay discrepancia en el tamaño del residuo producido (coque) por la combustión de gotas de combustóleo y emulsión. Algunos investigadores han encontrado una reducción en el tamaño del mismo con el uso de emulsiones [Ivanov y Nefedov, 1965; Jacques *et al.*, 1976], mientras que otros no han notado diferencia [Marrone *et al.*, 1982]. Por otro lado, el tiempo de combustión de las gotas de emulsiones ha sido generalmente menor que el del combustóleo para gotas del mismo tamaño [Ivanov y Nefedov, 1965; Dryer, 1982; Marrone *et al.*, 1983]. Sin embargo, también se encontró que el tiempo total de combustión de gotas de combustóleo emulsionado con agua fue mayor que el del combustóleo solo [Kimoto *et al.*, 1986]. Por lo tanto, aunque se han llevado a cabo varios estudios asociados a la combustión de emulsiones de agua en combustóleo a nivel fundamental, los resultados obtenidos no son totalmente consistentes y los mecanismos de la combustión no están totalmente entendidos.

Por lo anterior, en el IIE se están realizando investigaciones a diferentes niveles, fundamental y

La combustión de gotas individuales se realizó usando la técnica de gota suspendida en un filamento. El equipo experimental consistió en un horno esférico, un sistema de videograbación de alta velocidad y un sistema de digitalización de imágenes.

horno piloto, relacionadas con la combustión de emulsiones de agua en combustóleo. El objetivo es analizar la factibilidad de mejorar la combustión de combustóleo con el uso de esta tecnología. El estudio a nivel fundamental (combustión de gotas individuales) se realizó para entender los mecanismos del proceso de la combustión de emulsiones, cuyos resultados se presentan en este trabajo. Éste se enfocó por lo tanto al análisis del proceso de combustión del residuo formado (coque) y del tiempo de quemado del combustóleo y sus emulsiones. El combustóleo que se utilizó tuvo un contenido de asfaltenos 60% mayor que los reportados en la literatura sobre el tema.

Experimentación

La combustión de gotas individuales se realizó usando la técnica de gota suspendida en un filamento. El equipo experimental consistió en un horno esférico, un sistema de videograbación de alta velocidad y un sistema de digitalización de imágenes. Los instrumentos utilizados, así como las pruebas de combustión llevadas a cabo, se describen brevemente a continuación y en detalle se pueden encontrar en otro trabajo [Ocampo, 1997].

El horno consta de dos secciones hemisféricas construidas en aluminio que al unirse forman una esfera de diámetro interno de 0.2 m y con un espesor de la pared de

0.015 m. Las superficies internas de las secciones hemisféricas están pulidas a espejo. En una de estas secciones se instaló una lámpara de 1000 watts cerca del centro del horno. En la otra sección se tuvieron dos puertos diametralmente opuestos, uno para introducir el filamento que sostuvo la gota y el otro para observar y grabar con la cámara de alta velocidad, el proceso de combustión.

El sistema de grabación de alta velocidad estuvo formado por una cámara de alta velocidad (1000 cuadros por segundo) y un procesador de imágenes. El sistema de procesamiento de imágenes consistió de una computadora, el monitor de alta resolución y un programa de digitalización de imágenes. Este sistema permitió medir la variación del tamaño de la gota durante el proceso de combustión. Un esquema de los equipos mencionados y su integración se muestra en la figura 1.

Pruebas experimentales

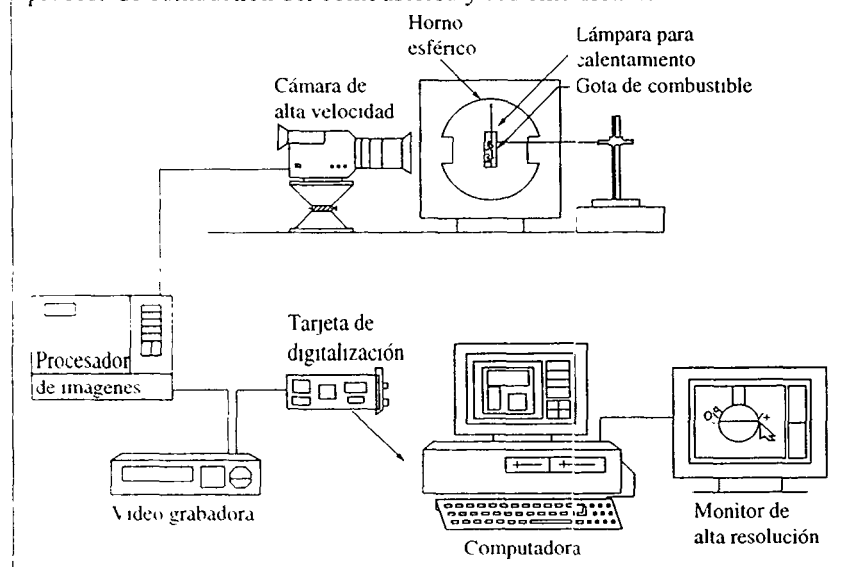
En este estudio se utilizó un combustóleo típico nacional; en el cuadro 1 se presentan sus características. Se prepararon tres emulsiones con 5, 15 y 25% de agua destilada, utilizando un agitador comercial durante 10 minutos.

Las emulsiones mostraron estabilidad, ya que no se observó separación de fases hasta después de tres semanas de su preparación. La distribución de las gotas de agua dispersas en el combustóleo fue homogénea, lo cual se observó con un microscopio óptico, el diámetro máximo de las gotas de agua fue de 5 μ m para todas las emulsiones.

De cada emulsión y del combustóleo se introdujeron al horno 26 gotas, quemándose de manera individual en aire y a 1000 watts de potencia de la lámpara. Las gotas de

FIGURA 1

Diagrama esquemático de los equipos involucrados en la digitalización del proceso de combustión del combustóleo y sus emulsiones.



CUADRO 1

Características del combustóleo usado para preparar las emulsiones.

Propiedad	Cantidad
Carbono (% peso)	85.18
Hidrogeno (% peso)	10.35
Nitrógeno (% peso)	0.29
Azufre (% peso)	3.70
Agua (% peso)	0.1
Ceniza (% peso)	0.063
Oxígeno (% peso)	0.31
Asfaltenos en n-pentano (% peso)	16.17
Carbón Conradson (% peso)	16.58
Viscosidad cinemática, a 50 °C, cSt	1300
Viscosidad cinemática, a 82.2 °C, cSt	170
Poder calorífico neto (kJ kg ⁻¹)	39.880
Temperatura de inflamación (°C)	102.0
Peso específico a 15/15 °C	1.002
Vanadio (ppm)	215.0
Sodio (ppm)	24
Níquel (ppm)	10
Hierro	7

combustóleo se utilizaron de referencia o línea base. Las pruebas experimentales se enfocaron a los aspectos siguientes: (i) evaluación del proceso de combustión, (ii) variación de diámetro durante la combustión, (iii) análisis de coque con un microscopio electrónico de barrido, y (iv) tiempo de quemado.

Resultados

Proceso de combustión

El proceso de combustión de una gota de combustóleo y de una emulsión con 25% de agua se muestra en las figuras 2 y 3. El diámetro inicial de la gota de combustóleo fue de 827 μm (figura 2a) y el de la emulsión fue de 839 μm (figura 3a). En la etapa inicial de la combustión, la emulsión mostró una gran expansión a 240 milisegundos (ms) (figura 3b), lo cual no se observó con el combustóleo (figura 2b). Después, la emulsión mostró microexplosiones que liberaron vapor de agua y los compuestos más ligeros del combustible, acompañado por pequeñas gotas de combustible a 250

El tiempo de quemado de todas las emulsiones fue menor que el del combustóleo. El tiempo de quemado de la emulsión con 25% de agua fue 18% menor que el del combustóleo. Además, se encontró que al aumentar el contenido de agua, el tiempo de quemado se redujo.

ms, sin ocurrir la ignición (figura 3c). Posteriormente, el resto de la secuencia fue similar para ambos combustibles, combustóleo y emulsión. Esto es, ocurrió la ignición de la gota y apareció la flama (figuras 2d y 3d). Durante la etapa en que la flama fue visible, se observaron una serie de pequeñas expansiones y contracciones acompañadas de liberación de vapor. Posteriormente, la gota alcanzó otra expansión importante (figuras 2e y 3e). Después de esta expansión, ocurrió una última contracción formándose un residuo (coque), el cual después de un intervalo corto se contrajo de nuevo formándose un coque final (figuras 2f y 3f). Finalmente, la combustión de este último residuo sólido continuó y la fragmentación del mismo ocurrió hasta que terminó su combustión.

Del proceso de combustión de las gotas de combustóleo y de las emulsiones analizadas, se observaron tres etapas principales, las cuales se resumen a continuación con sus principales características: (i) preignición o etapa de calentamiento, en donde para la gota de combustóleo se observó un calentamiento rápido y la evaporación de componentes volátiles, mientras que en la gota de emulsión se presentó calentamiento, expansión y microexplosiones, (ii) etapa en donde la flama fue visible y se quemaron los componentes volátiles de la gota y (iii) etapa de

FIGURA 2

Secuencia típica de la combustión de una gota de combustóleo en aire con diámetro inicial de 827 μm



(a) Gota inicial
Tiempo = 0 ms



(b) Evaporación inicial
Tiempo = 296 ms



(c) Evaporación avanzada
Tiempo = 340 ms



(d) Flama
Tiempo = 430 ms



(e) Máxima expansión
Tiempo = 520 ms



(f) Coque final
Tiempo = 570 ms

combustión del coque (residuo).

Variación de diámetro

El tamaño de cada gota de las muestras se midió cada 10 ms desde el inicio de calentamiento hasta la formación del coque. Después de ese punto, la medición del tamaño no fue muy precisa debido a la forma irregular de la partícula de coque, por lo tanto en esa etapa la medición

se considera aproximada.

Debido a que la gota soportada en el filamento no es perfectamente esférica, sino elíptica, fue necesario calcular un diámetro equivalente de la gota usando la ecuación [1], la cual fue sugerida por Kobayasi (1955).

$$d = (d_1 d_2^2)^{1/3} \quad [1]$$

Donde d_1 es la longitud de el

Finalmente, se comprobó que emulsificar el combustóleo ayudó a quemarlo en forma más eficiente. Esto se investigó con un combustóleo de un contenido alto de asfaltenos, por lo que se podrá esperar que este tipo de combustóleos presenten las mismas tendencias.

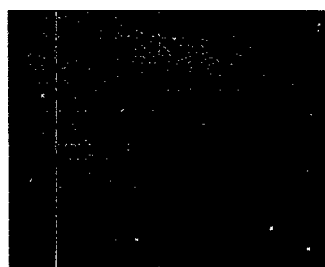
eje mayor, el cual es coaxial con el filamento y d_2 es la longitud del eje menor, el cual es perpendicular al eje del filamento. El diámetro equivalente así calculado fue normalizado con respecto al diámetro equivalente inicial.

La variación del diámetro del combustóleo (figura 4) mostró un comportamiento similar al reportado por Kobayasi (1955), Jacques *et al.* (1976), Lightman y Street (1983) y Pourkashanian (1987) para otros combustóleos. Es decir, en la etapa de preignición el diámetro de la gota varió muy poco. Después, en la etapa en donde la flama fue visible, la gota mostró una expansión pequeña debido a que la velocidad de evaporación de componentes volátiles fue mayor que la velocidad de escape de vapor en la superficie [Jacques *et al.*, 1976]. Después de la máxima expansión de la gota se formó el coque inicial. El máximo tamaño alcanzado en esta etapa fue 2.7 veces el diámetro inicial. Finalmente, la última y más larga etapa, la combustión del coque, donde el diámetro fue disminuyendo hasta terminar la combustión del coque.

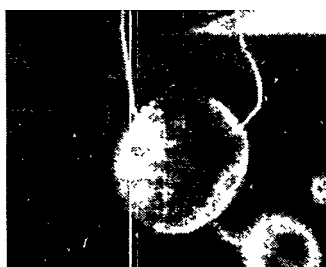
La variación de diámetro de la emulsión con 15% de agua también se presenta en la figura 4. En esa figura puede observarse que en la etapa de preignición, la emulsión mostró una importante expansión, la cual no se observó con el combustóleo solo. El tamaño alcanzado fue 2.8 veces su diámetro

FIGURA 3

Secuencia típica de la combustión en aire de una gota de emulsión con 25% de agua con diámetro inicial de 839 μm .



(a) Gota inicial
Tiempo = 0ms



(b) Expansión en la etapa de
pre-ignición, tiempo = 240 ms



(c) Microexplosiones
Tiempo = 250 ms



(d) Flama
Tiempo = 370 ms



(e) Máxima expansión en la etapa de
flama visible, tiempo = 420 ms



(f) Coque final
Tiempo = 500 ms

Una alternativa en México para quemar eficientemente el combustóleo nacional es emulsionarlo con agua, ya que puede permitir reducir la emisión de partículas inquemadas, según se infiere de los resultados obtenidos, además de que en pruebas realizadas a nivel piloto se comprobaron estos resultados. Sin embargo, es necesario optimar el uso de esta tecnología para utilizarla de la mejor manera.

aproximadamente dos veces el diámetro inicial para los diferentes contenidos de agua investigados (cuadro 2).

Análisis del coque

Los residuos (coque) del combustóleo fueron huecos, tuvieron forma ovoide y con hoyos, como puede verse en la figura 5. Puede observarse además que el filamento pasó a través del coque.

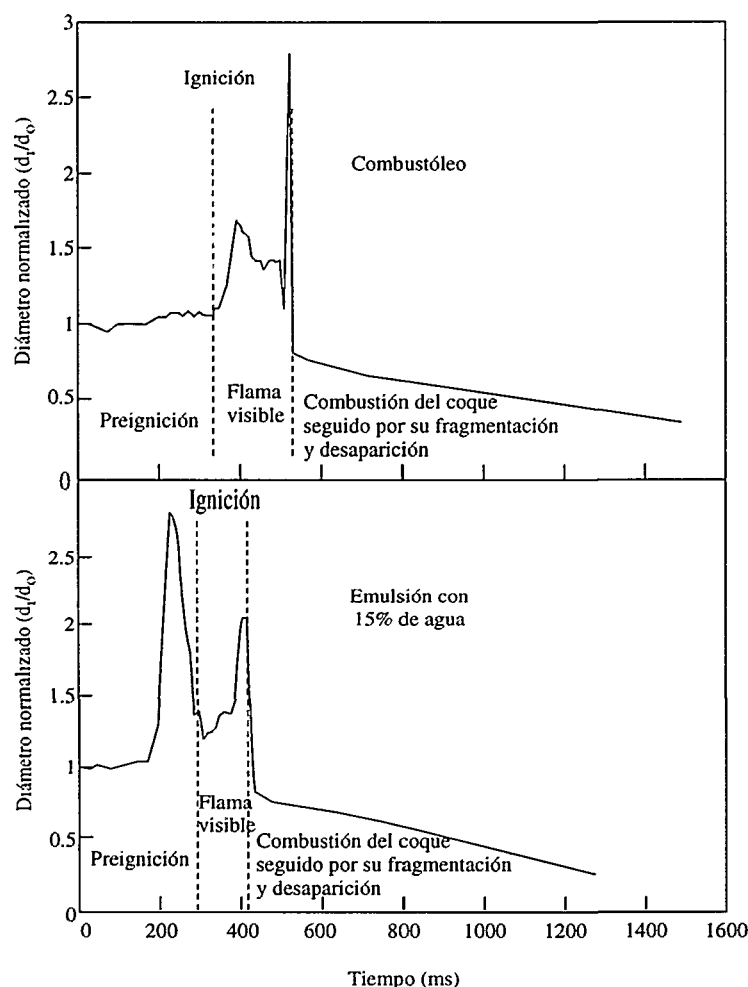
Así, la forma alargada de éste se debe al filamento utilizado para soportar la gota de combustóleo durante la combustión. La superficie de la partícula de coque es rugosa y hay cavidades y hoyos en ella. Los hoyos se formaron cuando los componentes ligeros del combustóleo se volatilizaron y salieron de la gota. Esos hoyos permitieron el paso del oxígeno al interior de la partícula para su combustión y la salida de los productos de combustión de la misma.

Las partículas de coque producidas por la combustión de emulsiones fueron también huecas y con hoyos como se muestra en la figura 6. Ahí se muestra el residuo de una emulsión con 25% de agua. En esta figura pueden verse grandes hoyos en la superficie. El origen de los hoyos de las partículas de las emulsiones puede ser el mismo para los del combustóleo. Esto es, la presión dentro de la gota se

inicial. En las siguientes etapas, flama visible y combustión de coque, la variación de diámetro de la emulsión mostró una tendencia similar al combustóleo, aunque la expansión alcanzada por la emulsión en la etapa de flama visible (dos veces el diámetro inicial) fue menor que la observada para el combustóleo (2.8 veces el diámetro inicial). Esto pudo deberse a que más componentes volátiles se expulsaron en las gotas de las emulsiones en la etapa de preignición. Además, como

consecuencia del contenido de agua, la expansión en la etapa de preignición fue mayor cuando el contenido de agua también se incrementó (cuadro 2). En ese periodo, una gota de emulsión con 5% de agua tuvo una expansión de 1.7 veces su diámetro inicial, mientras que otra con 25% de agua alcanzó una expansión de casi cuatro veces su diámetro inicial. Sin embargo, la expansión de las gotas de emulsión en la etapa donde la flama estuvo visible fue de

FIGURA 4
Variación del diámetro de gotas de combustóleo y una emulsión con diámetro inicial de 800 μm .



incrementó debido a la vaporización de componentes volátiles, lo cual provocó que el vapor del combustible rompiera zonas débiles de la superficie y escapara a través de ellas. Sin embargo, los hoyos en el coque de las emulsiones fueron más pronunciados y frecuentemente sin división, lo cual indica que la liberación de los componentes volátiles fue más vigorosa que en el caso del combustóleo. No se encontró una reducción significativa en el tamaño del coque final, ya que el tamaño del residuo para las emulsiones fue entre 2 y 9% menor que el del combustóleo (cuadro 2). No obstante, como se mencionó, la superficie de la partícula de la emulsión presentó hoyos de mayor tamaño que la del combustóleo (figuras 5 y 6).

Tiempo de quemado

El tiempo de quemado (desde el inicio del calentamiento hasta que termina la combustión) de las emulsiones fue menor que el del combustóleo. Se encontró que a mayor contenido de agua, menor tiempo requerido para la combustión de las emulsiones (cuadro 2). Así, el tiempo de quemado de una gota de emulsión con 25% de agua fue 18% menor que el de una gota de combustóleo. Este resultado concuerda cualitativamente con resultados de otros trabajos [Ivanov y Nefedov, 1965, Dryer, 1982, Marrone *et al.*, 1983] donde las emulsiones se quemaron más rápido que el combustóleo solo. Además, en el presente estudio se encontró que la ignición de las gotas de las emulsiones ocurrió antes que para el combustóleo, lo cual también concuerda con resultados de Ivanov y Nefedov (1965). Se cree que al incrementar el contenido de agua, la intensidad de las microexplosiones

CUADRO 2

Características del proceso de combustión del combustóleo y sus emulsiones.

Agua en la emulsión (%)	0	5	15	25
Variación de diámetro				
Diámetro inicial d_o (μm)	827	836	802	839
d_p/d_o	1.1	1.7	2.8	4.0
d_f/d_o	2.7	2.1	2.0	2.0
d_c/d_o	0.77	0.70	0.74	0.75
Tiempo total de quemado (ms)	1490	1410	1280	1220

Notas: d_p , d_f , d_c se refieren al máximo diámetro alcanzado en las etapas de preignición, flama visible y combustión de la partícula de coque, respectivamente.

FIGURA 5

Partícula de coque producida de combustóleo (X100).

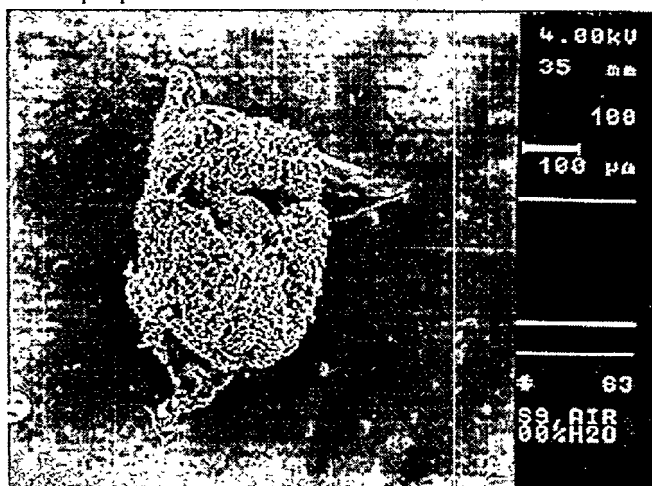
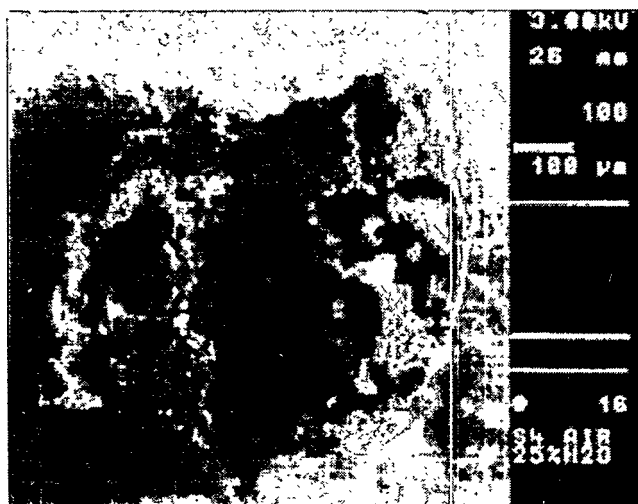


FIGURA 6

Partícula de coque originada por una emulsión con 25% de agua (X100).



relativamente larga en comparación con la combustión de volátiles. Esto es porque la combustión de coque ocurre en la superficie a una velocidad de reacción muy baja comparada con la combustión de los volátiles.

Conclusiones

Se estudió la factibilidad de mejorar la combustión de combustóleo mediante emulsiones usando un combustóleo que tuvo un contenido de asfaltenos de 16% en peso, 60% mayor que en otros trabajos reportados en la literatura especializada. El estudio se llevó a cabo a nivel fundamental usando la técnica de gota suspendida en un filamento.

Durante la etapa de preignición, las gotas de las emulsiones mostraron una gran expansión y microexplosiones, lo cual no se observó con el combustóleo solo. Las gotas de la emulsión con 25% de agua produjeron una expansión máxima de casi cuatro veces su diámetro inicial. El agua dispersa en la gota de combustóleo fue la causa de la expansión y produjo también microexplosiones y liberación de pequeñas gotas acompañadas de vapor. Este hecho acentuó la intensidad de la combustión, ya que las gotas pequeñas de combustible se queman más rápidamente.

La superficie de las partículas de coque, producidas por la combustión de emulsiones, presentó hoyos y cavidades de mayor diámetro que la del combustóleo. Así, es presumible que la masa del coque de la emulsión fuera menor que la del combustóleo, con lo que se puede explicar porque el coque de las emulsiones se quemó más rápidamente que el del combustóleo.

El tiempo de quemado de todas las emulsiones fue menor que el del

también aumenta. Esto influyó en la morfología del coque de las emulsiones, el cual tuvo hoyos de mayor diámetro en su superficie que el combustóleo, lo que puede verse en las figuras 5 y 6. A través de estos grandes hoyos, el oxígeno pudo pasar más fácilmente al interior de la partícula reaccionando y permitiendo la formación y liberación de más productos de combustión. Por lo tanto se puede inferir que la masa en el residuo de las emulsiones fue menor que la del residuo del

combustóleo. Lo anterior puede ayudar a explicar por qué el coque de las emulsiones se quemó más rápido que el del combustóleo. El tiempo de quemado del coque para las emulsiones fue menor, entre 5 y 20%, que para el combustóleo. La etapa de combustión de coque requirió cerca de 65% del tiempo total de quemado, lo que concuerda con resultados reportados por Pourkashanian (1987), quien encontró que la etapa de combustión del coque de un combustóleo era

combustóleo. El tiempo de quemado de la emulsión con 25% de agua fue 18% menor que el del combustóleo. Además, se encontró que al aumentar el contenido de agua, el tiempo de quemado se redujo.

Finalmente, se comprobó que emulsificar el combustóleo ayudó a quemarlo en forma más eficiente. Esto se investigó con un combustóleo de un contenido alto de asfaltenos, por lo que se podrá esperar que este tipo de combustóleos presenten las mismas tendencias a escala industrial.

Perspectivas en México

Una alternativa para quemar eficientemente el combustóleo nacional en México es emulsionarlo con agua, ya que esto puede reducir la emisión de partículas inquemadas, según se infiere de los resultados obtenidos, comprobados además en pruebas efectuadas a nivel piloto [Diego *et al.*, 1997]. Sin embargo, es necesario optimar el uso de esta tecnología, para agregar al combustóleo la menor cantidad de agua que brinde los máximos resultados. Para ello, además de encontrar esa cantidad (tal vez menos que 5 %), debe establecerse el tamaño de gota de agua más apropiado. También es necesario analizar las ventajas y desventajas de la tecnología. Dentro de los beneficios potenciales se pueden mencionar los siguientes: (i) reducción en 50 % aproximadamente de partículas inquemadas; (ii) mantener más limpias las superficies de intercambio de calor debido a la reducción de partículas inquemadas, con lo cual se lograría una mejor transferencia de calor; (iii) incremento de eficiencia debido a la reducción de partículas inquemadas; (iv) posible reducción de NOx térmico a raíz de la reducción de la temperatura de flama por la adición de agua.

El precio a pagar por la aplicación de esta tecnología puede ser la disminución de la eficiencia de la caldera debido al agua añadida al combustóleo, pero resultará bastante bajo en la medida que se minimice la cantidad de agua adicionada. La evaluación técnica-económica del uso de la tecnología tendrá que hacerse en forma específica para cada caldera, de acuerdo con el problema particular que necesite resolverse.

Referencias

- Diego, M.A., B.R. Ocampo, F.M. Martínez, F.A. Tamayo y Q.E. Alarcón, "Emulsiones agua en combustóleo para reducir las emisiones de partículas inquemadas en calderas", *Boletín IIE*, septiembre/octubre de 1997, pp. 225-231.
- Dryer, F.L., *Fundamental combustion studies of emulsified fuels*, U.S. Department of Energy, contract ET-18-S-02-4920.A0000, final report DOE/ER/10113-10, Estados Unidos, 1982.
- Dryer, F.L., *Water addition to practical combustion systems-concepts and applications*, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, Estados Unidos, pp. 279-295, 1976.
- Dryer, F.L., G.D. Rambach and I. Glassman, *Some preliminary observations on the combustion of heavy fuels and water in fuel emulsions*, paper presented at the central section meeting of the Combustion Institute, Columbus, Ohio, Estados Unidos, 1976, cited by Dryer, 1976.
- Gollahali, S.R., *An experimental study of the combustion of unsupported drops of residual oils and emulsions*, *Combustion Science and Technology*, pp. 19, 245-250, 1979.
- Gollahalli, S.R., M.L. Rasmussen and S.J. Moussaui, *Combustion of drops and sprays of no. 2. Diesel oil and its emulsions with water*, *Proceedings of the 18th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Estados Unidos, pp. 349-360, 1981.
- Ivanov, V.M. and P.I. Nefedov, *Trudy Instituta Goryachikh Iskopayemykh* 19, 1962, ver también NASA TTF-258, 1965, citado por Dryer, 1976.
- Jacques, M.T., J.B. Jordan, A. Williams and L. Hadley-Coates, *The combustion of water in oil emulsions and the influence of asphaltene content*, *Proceedings of the 16th Symposium International on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, Estados Unidos, pp. 307-319, 1976.
- Kimoto K., Y. Owashi and Y. Omae, "The vaporising behaviour of the fuel droplet of water-in-oil emulsions on the hot surface", *Bulletin of JSME*, vol. 29, núm. 258, pp. 4247-4255, 1986.
- Kobayasi, K., *An experimental study on the combustion of a fuel droplet*, *proceedings of the 5th Symposium International on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, Estados Unidos, pp. 141-148, 1955.
- Lasheras, J.C., A.C. Fernandez-Pello and F.L. Dryer, *Initial observations on the free droplet combustion characteristics of water-in-fuel emulsions*, *Combustion Science and Technology*, pp. 21, 1-14, 1979.
- Lasheras, J.C., A.C. Fernandez-Pello and F.L. Dryer, *Experimental observations on the disruptive combustion of free droplets of multicomponent fuels*, *Combustion Science and Technology*, pp. 22, 195-209, 1980.
- Lawn, C.J., A.T.S. Cunningham, P.J. Street, K.J. Mathews, M. Sarjeant and A.M. Godridge, *Principles of combustion engineering for boilers*, edited by C.J. Lawn, Academic Press Limited, Londres, Gran Bretaña, pp. 78-84, 1987.
- Lightman, P. and P.J. Street, *Single drop behaviour of heavy fuel oils and fuel oil fractions*, *Journal of the Institute of Energy*, pp. 56, 3-11, 1983.
- Marrone, N.J., I.M. Kennedy and F.L. Dryer, *Coke formation in the combustion of isolated single droplets of heavy fuels*, presented at the Eastern States Section Meeting of the Combustion Institute, Atlantic City, N.J., Estados Unidos, 1982, citado por Marrone *et al.*, 1983.
- Marrone, N.J., I.M. Kennedy and F.L. Dryer, *Internal phase size effects on combustion of emulsions*, *Combustion Science and Technology*, pp. 33, 299-307, 1983.
- Molino, N.M. and G.D. Dusatko, *Field test of a processed and emulsified residual oil*, *EPRI AP-5247*, *Proceedings: 1986 Fuel Oil utilisation Workshop*, Filadelfia, Pensilvania,

Estados Unidos, pp. 3.135- 3.165, 1987.

Nakamura, N., M. Hibi, Y. Hara and R. Matsumoto, *Combustion of heavy oil emulsion fuel, Japanese Flame Research Committee's Members Meeting*, Tokyo, 1981.

Ocampo, B.R., *Combustion of Mexican heavy fuel oil/water emulsions*, Ph. D., tesis de Safora, Gran Bretaña, 1997.

Pourkashanian, M., *The combustion of residual oil, coal and coal slurries*, Ph. D., tesis, Universidad de Leeds, Gran Bretaña, 1987.

Spadaccini, L.J. and R. Pelmas, *Evaluation of oil/water emulsions for application in gas turbine engines*, Symposium on Evaporation-combustion of Fuel Droplets presented before the Division of Petroleum Chemistry, Inc. American Chemical Society, San

Francisco Meeting, Estados Unidos, 1976.

RENÉ OCAMPO BARRERA



Ingeniero químico industrial (1986) de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del Instituto Politécnico

Nacional (IPN); maestro en ingeniería química (procesos) por la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y doctor en Combustión (1997) por la Universidad de Salford, Inglaterra. De 1986 a 1992 fue investigador del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) en la Subdirección de Investigación Básica de Procesos (IBP). Posteriormente ingresó al IIE en la Unidad de Sistemas de Combustión, en donde ha trabajado en proyectos relacionados con la combustión de emulsiones, tanto a nivel fundamental como a escala piloto. Actualmente es candidato a investigador del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

Nota aclaratoria

Por un lamentable error, en el *Boletín IIE* correspondiente a marzo-abril del presente año (vol. 22, núm. 2) se publicó incompleto el currículum vitae de Marco Antonio Borja Díaz. He aquí la versión correcta:

Marco Antonio Borja Díaz

Ingeniero en comunicaciones y electrónica, egresado en 1978 de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato. En 1980 ingresó al IIE como investigador en la hoy Unidad de Energías No Convencionales. En el tema de energías no convencionales, ha participado y dirigido proyectos relacionados con la evaluación de recursos energéticos, desarrollo de equipo de adquisición de datos, instrumentación de sistemas y laboratorios, evaluación de comportamiento de sistemas convertidores, desarrollo de sistemas de control para pequeños sistemas híbridos y desarrollo de herramientas de procesamiento de datos. En 1996 dirigió un proyecto contratado por la Comisión para la Cooperación Ambiental Canadá-Estados Unidos-México, sobre la prefactibilidad de una central eoloelectrónica de 150 MW para La ventosa, Oaxaca. En 1997 participó en el curso Internacional sobre la Implementación de la Generación Eoloelectrónica, impartido por la Fundación Holandesa de Investigación en Energía. Actualmente dirige el proyecto *Seguimiento de la tecnología de centrales eoloelectrificadas*, contratado por la Secretaría de Energía. Es el miembro mexicano del Comité Ejecutivo del Acuerdo de Implementación para la Investigación y Desarrollo de Sistemas de Generación Eoloelectrónica, dentro del marco de la Agencia Internacional de Energía.

Modelación de un atomizador de dos fluidos

Zoili Tapia Ramírez

Resumen

El trabajo reportado en este artículo presenta los resultados del esfuerzo por mejorar el entendimiento básico de la estructura del flujo que se forma en un atomizador de dos fluidos antes y después de la interacción entre el fluido atomizado y el fluido atomizante. Se muestran imágenes del flujo en el interior de la cámara de mezclado del atomizador, las cuales fueron tomadas con una cámara de video de alta velocidad. También se incluyen los resultados de la simulación numérica del flujo interno obtenidas por medio de un paquete de modelación comercial.

Introducción

La gran diversidad de aplicaciones en las áreas de generación de energía eléctrica, procesos industriales, cohetes, etcétera, requiere más información y mejores teorías sobre el comportamiento de los *sprays* y sobre el diseño de atomizadores, con la finalidad de incrementar la eficiencia de los sistemas de combustión en donde se queman combustibles líquidos. Los atomizadores de dos fluidos, principalmente los del tipo Y-jet y los

La gran diversidad de aplicaciones en las áreas de generación de energía eléctrica, procesos industriales, cohetes, etcétera, requiere más información y mejores teorías sobre el comportamiento de los sprays y sobre el diseño de atomizadores, con la finalidad de incrementar la eficiencia de los sistemas de combustión en donde se queman combustibles líquidos.

de mezclado interno, se utilizan ampliamente para la inyección del combustible a los hogares de los generadores de vapor. Con este tipo de atomizadores es posible manejar grandes flujos de combustible a presiones relativamente bajas, y se producen gotas de diámetro medio alrededor de 100 μm , lo que es muy aceptable en el quemado de combustibles líquidos. Sin embargo, la necesidad de optimar la utilización de los combustibles fósiles con una mínima producción de contaminantes ha motivado un nuevo interés en la investigación aplicada para revisar y proponer mejoras en la tecnología del quemado de dichos combustibles. En los últimos años se han realizado una gran número de trabajos experimentales enfocados al estudio del *spray* producido por estos atomizadores, pero poco se ha efectuado para entender el complejo proceso que ocurre dentro de la cámara de mezclado del atomizador. En la literatura sobre el tema se indica que los principales factores que afectan al tamaño de gota de un *spray* son las propiedades físicas de ambos fluidos involucrados en la atomización y la geometría del atomizador. Otro elemento importante es la relación de flujo másico entre el fluido atomizante y el combustible, la cual determina tanto el rompimiento del líquido en gotitas como el mezclado en el interior del atomizador [Mullinger, 1973 y Prasad, 1982].

Atomizadores de dos fluidos

En los atomizadores de dos fluidos la energía de un gas, en muchos casos aire o vapor, se utiliza para la desintegración de un líquido. El principio de funcionamiento de este tipo de atomizadores se basa en los esfuerzos de corte que se desarrollan en la interfaz entre el gas y el líquido. La atomización en un atomizador del tipo Y-jet se lleva a cabo alimentando el combustible junto con una corriente de gas a alta velocidad dentro de un espacio circular llamado cámara de mezclado. El orificio de salida de la cámara de mezclado es conocido como orificio de descarga. El flujo en dos fases que se forma cuando los dos fluidos involucrados en la atomización interactúan dentro de la cámara de mezclado se conduce hacia el orificio de descarga. Una porción del líquido se desintegra en pequeñas gotas dentro de la cámara de mezclado y la otra parte sale del orificio de descarga en forma de una lámina delgada de líquido, la cual se rompe en pequeñas partes que posteriormente forman gotas de varios tamaños creando de esta manera el *spray*. La distribución de tamaños de gota en el *spray* es gobernada parcialmente por la simetría y uniformidad de la película de líquido creada a la salida del atomizador y también por los patrones de flujo generado en la corriente del fluido atomizante durante su paso a través del atomizador [Lefebvre, 1989]. En la figura 1 se presenta un prototipo de un atomizador Y-jet utilizado para la atomización de aceites residuales del petróleo. El fluido atomizante en este tipo de atomizadores es vapor de agua. El combustible se suministra al atomizador a través de conductos distribuidos simétricamente alrededor del conducto central del

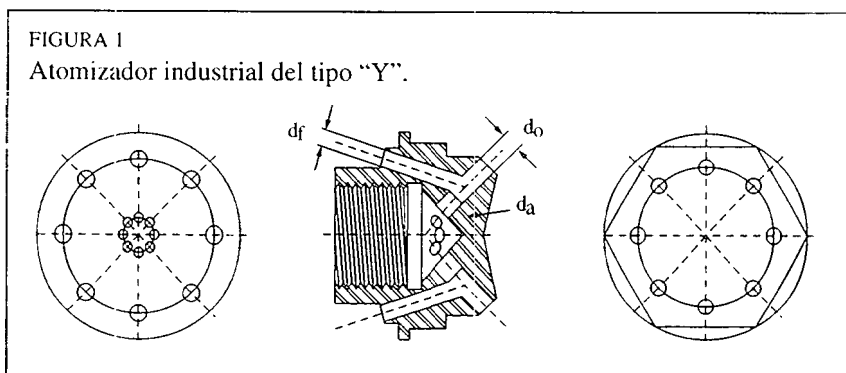
La mayoría de trabajos se han enfocado al estudio del spray producido por estos atomizadores y poco se ha hecho para tratar de entender el complejo proceso de atomización que ocurre dentro de la cámara de mezclado del mismo.

vapor. A la mitad del atomizador, el conducto central se divide en varios canales pequeños de vapor, los cuales coinciden con el número de canales de combustible. Cada par de conductos de combustible y vapor forman un atomizador de dos fluidos; el combustible se descarga en la corriente de vapor a cierto ángulo. Los orificios de descarga en este tipo de atomizadores se distribuyen simétricamente y orientan a cierto ángulo con respecto al eje de simetría del atomizador, de tal manera que una serie de *sprays* individuales con un cono sólido dan lugar a un *spray* de cono hueco.

Formación del *spray*

La desintegración del líquido en un atomizador es el resultado de causas internas y externas. Las primeras provienen de disturbios en el atomizador mismo; éstas se originan por la caída de presión del líquido, la fricción entre el fluido atomizante y el fluido atomizado, y los disturbios del movimiento del líquido en las orillas de los orificios de entrada y salida y en cualquier tipo de

irregularidad en la superficie. Las causas externas resultan de la interacción con el medio ambiente y dependen de la velocidad relativa del líquido y del gas del ambiente, así como de la densidad del gas y de las características del líquido que sale del atomizador. El rompimiento inicial del líquido depende de las propiedades del flujo en el interior del atomizador, las propiedades de turbulencia a lo largo de la corriente de líquido antes de la desintegración, las propiedades del medio ambiente y el desarrollo de ondas a lo largo de la superficie del chorro [Chigier, 1995]. El mecanismo de desintegración lo controlan la tensión superficial y la viscosidad dinámica dentro del líquido mismo [Lefebvre, 1989]. También es controlado por la interacción de las fuerzas aerodinámicas. Estas interacciones son demasiado complejas para representarlas matemáticamente con un alto grado de precisión. Sin embargo, la propia formación de la lámina de líquido es un fenómeno complejo altamente dependiente de las características específicas de diseño del atomizador, las cuales varían ampliamente [Hersh *et al.*, 1990]. La viscosidad del líquido es la propiedad más importante en el proceso de formación del *spray*. Su importancia proviene del hecho de que afecta no sólo las distribuciones de tamaño de gota, sino también la



velocidad de flujo en el atomizador y en los patrones del *spray* [Chigier, 1995].

Caracterización del *spray*

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de un *spray*, es necesario medir el tamaño y la distribución de las gotas —así como su velocidad y dirección—, la distribución radial y circunferencial del líquido, el ángulo y la penetración. Estas variables son extremadamente importantes durante la atomización de aceites pesados y su combustión, debido a que participan en la formación de emisiones contaminantes en un sistema de combustión. La distribución del tamaño de gota es frecuentemente caracterizado por su diámetro de gota medio Sauter (SMD, siglas en inglés). Las propiedades del fluido atomizado y del atomizante, las condiciones de operación y el diseño del atomizador influyen en el SMD [Carvalho *et al.*, 1989].

Geometría del atomizador

Para la modelación física del flujo en el interior del atomizador solamente es necesario un par de conductos de combustible y vapor. Los conductos internos del atomizador diseñado en este trabajo tenían una sección transversal rectangular con la finalidad de permitir un mejor acceso óptico disminuyendo la refracción. El atomizador fue construido con placas de metal, las cuales se unieron por medio de vidrio. La figura 2 muestra la geometría del atomizador diseñado, el cual consta de cinco piezas. Las piezas 2 y 3 permiten variar el ángulo formado entre los conductos de aceite y aire. Se probaron cuatro diferentes ángulos (90, 70, 50 y 30 grados) de interacción entre la corriente de aire

La desintegración del líquido en un atomizador es el resultado de causas internas y externas. Las primeras provienen de disturbios en el atomizador mismo; éstas se originan por la caída de presión del líquido, la fricción entre el fluido atomizante y el fluido atomizado, y los disturbios del movimiento del líquido en las orillas de los orificios de entrada y salida y en cualquier tipo de irregularidad en la superficie.

y aceite. La sección transversal de los conductos de entrada y salida se conservaron constantes a 4.5 mm² para el aire, 6 mm² para el aceite y 7.5 mm² para el orificio de descarga. Aunque el atomizador tenía una sección transversal rectangular, el *spray* que producía conservaba las características generales de uno de sección circular. Lo anterior se corroboró con mediciones realizadas del ángulo del *spray*, distribución del tamaño de gota y distribución radial del combustible [Tapia, 1997].

Equipo experimental

En la figura 3 se presenta un diagrama esquemático del equipo experimental que se utilizó para llevar a cabo la modelación física del atomizador. Dicho equipo está en el Laboratorio de Atomización del Instituto de Investigaciones Eléctricas. El equipo experimental consiste de una cámara de visualización, un sistema de extracción que incluye un separador de aire-aceite, un sistema posicionador que permite que el atomizador pueda estudiarse en diferentes posiciones. Dos tuberías independientes se usan para alimentar el aceite y el aire de atomización al atomizador. Cada tubería tiene la instrumentación adecuada para permitir el control sobre la presión, la temperatura y el flujo volumétrico. Además, para llevar a cabo el estudio del proceso de atomización, se usó un aceite hidráulico que simula las propiedades físicas de un aceite

FIGURA 2

Geometría seleccionada para la modelación del atomizador.

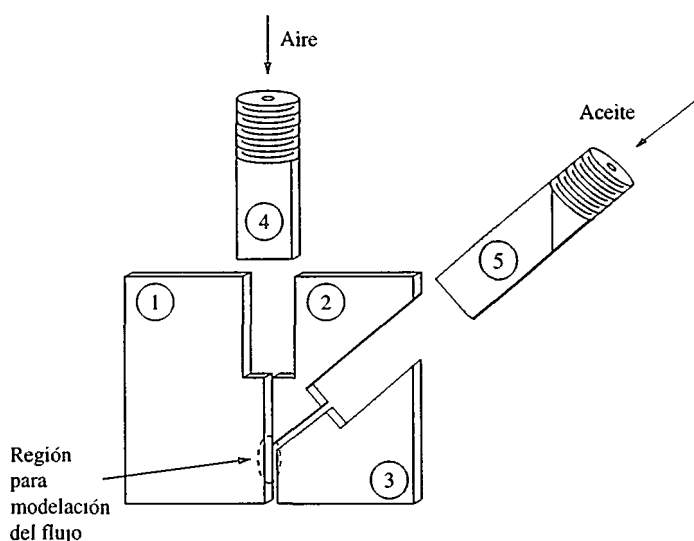


FIGURA 3

Diagrama esquemático del equipo de atomización.

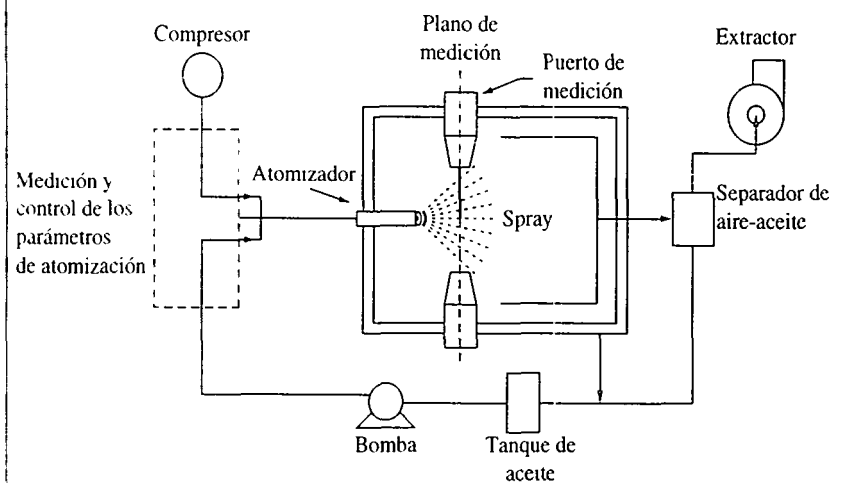
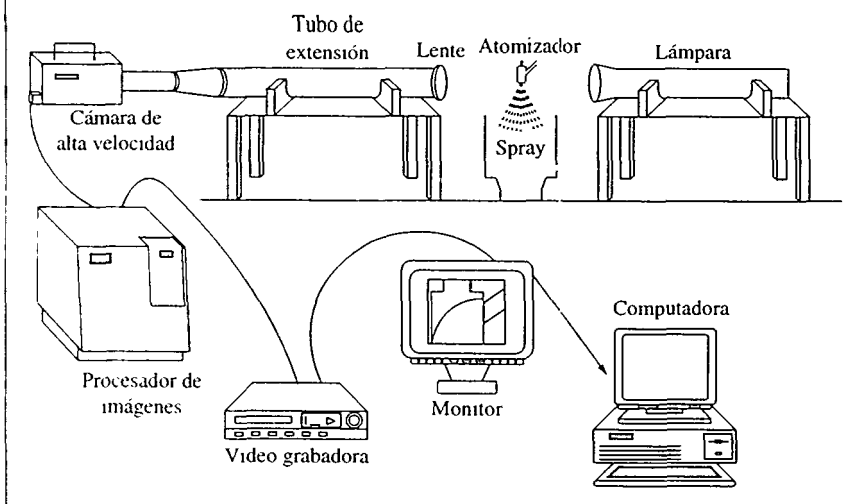


FIGURA 4

Arreglo del equipo para la visualización.



residual del petróleo. También se utilizó como fluido atomizante aire comprimido a temperatura ambiente en lugar de vapor, que es generalmente el medio atomizante en una central termoeléctrica.

Para visualizar la interacción del flujo en el interior del atomizador, se utilizó un sistema de video de alta velocidad junto con una fuente de iluminación de alta intensidad. El sistema de video consiste de: una cámara de video de

alta velocidad, un procesador de imágenes, un monitor de alta resolución y una video grabadora (figura 4).

Modelación física del flujo interno

Para facilitar la presentación de los resultados, en la figura 5 se describe una imagen representativa del flujo en una sección de la cámara de mezclado del atomizador. Los puertos de entrada de aire y aceite

Con la finalidad de evaluar el comportamiento de un spray, es necesario medir el tamaño y la distribución de las gotas —así como su velocidad y dirección— la distribución radial y circunferencial del líquido, el ángulo y la penetración. Estas variables son extremadamente importantes durante la atomización de aceites pesados y su combustión, debido a que participan en la formación de emisiones contaminantes en un sistema de combustión.

están localizados en la parte superior de la imagen; en esta sección las corrientes de aire y aceite empiezan a interactuar. La luz que atraviesa la sección del puerto de entrada de aceite es más intensa debido a que la corriente de líquido aún no sufre ningún disturbio. Cuando la corriente de aceite interactúa con la de aire, una parte de esta última tiende a penetrar el líquido y se observa una región de mezclado intenso. Parte de la luz que cruza la zona de mezclado se difracta y es la razón de que la intensidad de luz que llega a la cámara de video tenga diferentes tonalidades. Lo anterior sugiere que una porción de líquido es parcialmente atomizado, en la cámara de mezclado. Es notable que una región de vórtice se localiza en la intersección donde el aire empieza a mezclarse con el aceite. Además, en el interior de la cámara de mezclado se pueden detectar tres principales zonas de acuerdo con las diferentes tonalidades de gris que se presentan. En la figura 5 se indican estas zonas, las cuales son: (A) una zona clara localizada tanto en el puerto de aire como en el de aceite y que representa a los fluidos puros, (B) una zona oscura cerca de la pared que corresponde al puerto de

entrada de aceite y (C) una zona opaca o poco brillante que aparentemente es el lugar donde el aire y el aceite sufren un mezclado más intenso y puede ser la zona en la que hay gotas internas. Estas zonas se observaron para todas las diferentes configuraciones estudiadas y para las diferentes condiciones de operación; sin embargo, sufren ciertos cambios cuando cambian el conjunto de condiciones de operación o varía el ángulo de entrada del aceite con respecto al aire [Tapia, 1997]. Se puede observar también en la figura 5 que el espesor de la zona B se reduce conforme avanza hacia el puerto de salida.

También, un pequeño segmento de la porción del líquido que no sufre cambios (zona A) permanece pegado a la pared en donde se conecta el puerto de entrada de aceite; esto puede verse como una película de aceite que se adhiere a la pared. En todas las imágenes obtenidas, se observa que el chorro de aceite que entra en la cámara de mezclado no puede penetrar completamente el chorro de aire (por su alta presión) y éste es forzado hacia un lado de la cámara. Una característica observada en la visualización es la asimetría del flujo en la cámara de mezclado. Debido a esta distribución no uniforme del flujo interno, la energía cinética de la corriente de aire no se utiliza completamente en la aceleración y rompimiento del líquido; como consecuencia, los *sprays* producidos con los atomizadores del tipo Y-jet se caracterizan por una pobre simetría.

En la figura 6 se observa el efecto de incrementar el flujo de aire. Cuando el flujo de aceite se conserva constante, la tendencia general es que el espesor de la zona opaca (C) aumenta y además tiende a aclararse.

Sin embargo, el espesor de la

De las imágenes del flujo interno en la cámara de mezclado y de los resultados de la modelación matemática, resulta evidente que la desintegración de la corriente de líquido es consecuencia del mezclado intenso en el flujo y de la acción de las fuerzas de la corriente de aire sobre la superficie del líquido. La dirección en la cual los dos fluidos involucrados en la atomización convergen modifica significativamente la estructura del flujo interno y, consecuentemente, el tamaño de gota medio.

zona oscura (B) se decrementa. También se observa que disminuye el espesor de la película de aceite pegada a la pared que corresponde al puerto de entrada de aceite.

Modelación numérica del flujo interno

El análisis del flujo interno en la cámara de mezclado de un atomizador es un problema muy complejo debido a las interacciones del flujo en dos fases gas-líquido, las cuales causan un mezclado violento.

Afortunadamente el surgimiento de computadoras más poderosas ha traído la posibilidad de solucionar problemas de flujo de fluidos altamente complejos. En este trabajo la modelación numérica se llevó a cabo usando un código comercial llamado Fluent. El código tiene disponibles diferentes modelos para una simulación completa del problema físico. Esencialmente, los modelos para el análisis de interacción de flujos involucran la solución de las ecuaciones de conservación de momento y masa acopladas a un modelo fracción de volumen de fluido (VOF), diseñado para dos o más fluidos, donde la posición de la interfaz entre los mismos es de interés.

En la figura 7 se muestran imágenes del flujo obtenidas por medio de Fluent. Los flujos de aceite y aire utilizados en la modelación fueron 40 y 1.71 kg/h, respectivamente. Estos flujos corresponden a velocidades en los puertos de entrada de 2.04 m/s para el aceite y 87 m/s para el aire. Las dimensiones de los puertos de entrada de aire y aceite y del orificio de descarga, así como las propiedades físicas del aire y aceite fueron iguales a las utilizadas en la modelación física. Las dos imágenes presentadas pertenecen a diferentes intervalos de tiempo, con la finalidad

FIGURA 5
Flujo en el interior de la cámara de mezclado del atomizador.

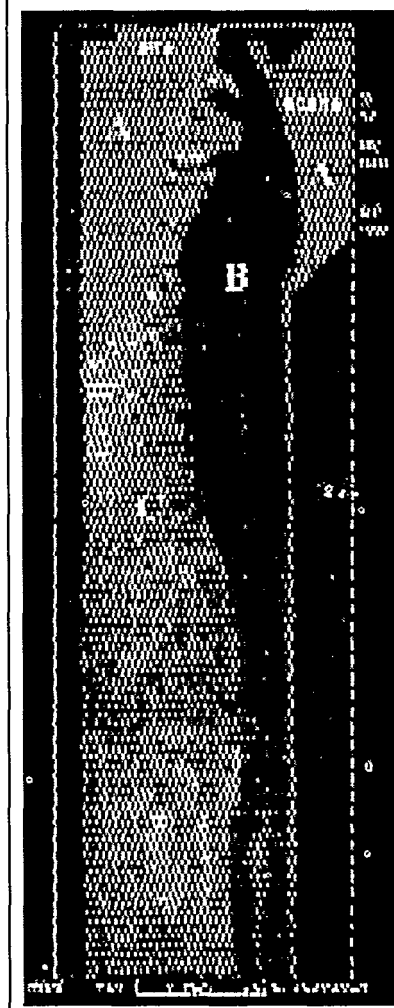
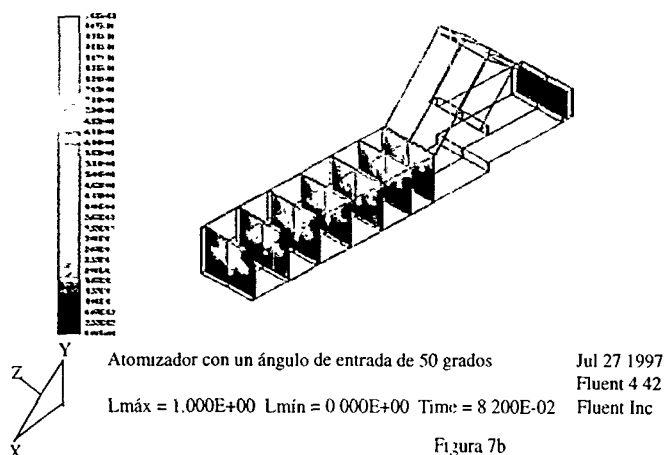
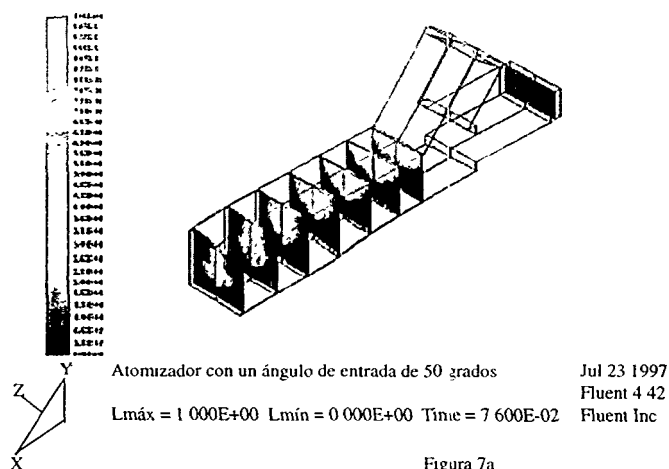


FIGURA 6

Flujo interno (flujo de aceite = 40 kg/h).



FIGURA 7



de observar el desarrollo del flujo interno; el tono oscuro representa el flujo de aire y el tono claro el flujo de aceite. Solamente se indican siete

secciones del flujo a lo largo de la cámara de mezclado. Se observa que la corriente de aceite tiende a desprenderse de la pared en donde se

localiza el puerto de entrada de aceite, sin embargo una pequeña porción del líquido permanece pegada a la pared, lo cual concuerda con lo observado experimentalmente. Es notable que la interfaz entre las corrientes de aire y aceite cambia a lo largo de la cámara de mezclado y también con el tiempo. La corriente de aire forma aproximadamente un flujo anular alrededor de la corriente de aceite. Para los cuatro ángulos de entrada de aceite estudiados, se observaron resultados similares, con la diferencia de que para los ángulos de 50, 70 y 90 grados, la corriente de líquido tiende a desprenderse de la pared correspondiente al puerto de entrada de aceite y para el ángulo de 30 grados, la corriente de líquido tiende a permanecer pegada a la pared.

Conclusiones

De las imágenes del flujo interno en la cámara de mezclado y de los resultados de la modelación matemática, resulta evidente que la desintegración de la corriente de líquido es consecuencia del mezclado intenso en el flujo y de la acción de las fuerzas de la corriente de aire sobre la superficie del líquido. La dirección en la cual los dos fluidos involucrados en la atomización convergen modifica significativamente la estructura del flujo interno y, consecuentemente, el tamaño de gota medio. De los resultados de la visualización se observó que una parte del líquido es atomizado por la corriente de aire a alta velocidad en el interior del atomizador y otra parte viaja como una película de líquido pegada a la pared del mismo. Para los cuatro ángulos de entrada de aceite analizados, se observa tanto en la simulación física como numérica que la corriente de aceite que entra a la

cámara de mezclado no puede penetrar completamente la corriente de aire y ésta es forzada hacia un extremo de la cámara de mezclado; sin embargo; para un ángulo de 50 grados se observa una mejor distribución del flujo. Debido a esta mala distribución del flujo, la energía del fluido atomizante no se utiliza completamente en la aceleración y rompimiento de la corriente de líquido, por lo que es necesario proponer ciertos cambios en la geometría interna del atomizador con la finalidad de hacerlo más eficiente.

Referencias

- Carvalho, M.G., M. Costa, F. C. Lockwood and V. Semiao., *The prediction of SMD and droplet size distribution for different atomisers*, International Conference on Mechanics of Two-Phase Flows, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1989.
- Chigier, N., *Spray technology short course*, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pensilvania, Estados Unidos, 1995.
- Hersh, S., D. V. Giovanni, F. L. Dryer, D. Eskinazi and W.C. Rovesti., *Coke formation index: A measure of particulate formation in oil combustion*, EPRI GS-6714, Palo Alto, California, Estados Unidos, 1990.
- Lefebvre, A.H., *Atomization and spray*, Hemisphere Publishing Corporation, Nueva York, Estados Unidos, 1989.
- Mullinger, P.J., *The design and performance of multi-jet internal mixing twin fluid atomizers*, Ph.D. thesis, University of Sheffield, Gran Bretaña, 1973.
- Prasad, K. S. L., *Sprays characterisation of air blast atomiser*, Proc. of the Second International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, pp 123-130, Wisconsin, Estados Unidos, 1982.
- Tapia, Z., *Spray formation in a twin-fluid atomiser*, Ph.D. thesis, University of Salford, Gran Bretaña, 1997.

ZOILI TAPIA RAMÍREZ

Egresado del Instituto Tecnológico de Pachuca de la carrera de ingeniería industrial mecánica en térmica (1983 - 1987). Efectuó su tesis de licenciatura como becario



del IIE. Cursó su maestría en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet), en Cuernavaca, Morelos (1988 - 1990), con especialidad en ciencias en ingeniería mecánica. Realizó su doctorado en combustión en el Programa IIE/Universidad de Salford. Colabora en el Área de Atomización en la Unidad de Procesos Térmicos del IIE desde 1992. Fue catedrático en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (1992 - 1994). Es miembro del sistema nacional de investigadores.

<http://www.iie.org.mx/>

Combustión de combustóleo con baja producción de óxidos de nitrógeno.

Rogelio Escalera Campoverde

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del estudio teórico experimental de los efectos de los chorros de aire secundario dirigidos en forma perpendicular al eje de la flama en la combustión de combustóleo en un horno de 500 kW. El propósito principal del estudio fue obtener bajas emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) sin incrementar el CO, lo cual se observa en quemadores convencionales de bajo NO_x . Los resultados experimentales demostraron una reducción significativa del NO_x y del CO: de 320 a 90 ppm y de 50 ppm a valores despreciables, respectivamente. Se empleó un código computacional comercial de dinámica de fluidos para modelar la combustión en condiciones de línea base, sin aire secundario, y con la inyección del aire secundario. Se comparan resultados experimentales con los calculados.

Introducción

En México, aproximadamente 65% de la electricidad que se genera proviene de la combustión del combustóleo. La composición del

A la fecha, técnicas de bajo costo de reducción de NO_x conocidas como combustión por etapas, son de las tecnologías usadas más ampliamente alrededor del mundo para reducir la producción de estos compuestos

combustóleo mexicano difiere considerablemente de aquellos que son quemados en la mayoría de los países consumidores de aceites pesados. Un combustóleo típico mexicano contiene entre 15 y 20% de asfaltenos [Ruiz *et al.*, 1983] mientras que un análisis de la composición del usado en otros países indica contenidos de asfaltenos mucho más bajos [Sefer y Moulton, 1988]. Consecuentemente, los combustóleos mexicanos son particularmente difíciles de quemar ya que la estructura aromática molecular de los asfaltenos tiende a la formación de residuos gráficos de combustión. Este problema se acentúa por la configuración típica de los quemadores de bajas emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) que usan combustión con aire por etapas con una zona primaria rica, ya que el bajo NO_x necesita balancearse con la producción de monóxido de carbono (CO) y partículas carbonosas inquemadas.

A la fecha, técnicas de bajo costo de reducción de NO_x conocidas como combustión por etapas [Thompson *et al.*, 1988, Wood, 1994, Eskinazi *et al.*, 1993, Hampartsoumian *et al.*, 1993], son de las tecnologías usadas más ampliamente alrededor del mundo para reducir la producción de estos compuestos. A pesar de un gran esfuerzo en investigación, no se ha obtenido todavía un dispositivo optimado para esta técnica, especialmente para quemadores de aceites pesados. En particular, la combustión por etapas eficiente requiere de la

compaginación de la dinámica del fluido del quemador con el *spray* del combustible. Estos conceptos han sido logrados debido a una completa caracterización del atomizador usado y a un nuevo concepto de diseño del quemador, el cual extiende el principio de bajo NO_x en la combustión por etapas aplicando el poder de mezclado en el sitio apropiado. Este nuevo diseño de quemador cumple entonces con el compromiso de reducir el NO_x sin alterar la eficiencia de la combustión. La técnica de dirigir chorros de aire a alta velocidad dentro de una cámara de combustión cilíndrica fue originalmente estudiada por Zhou *et al.* (1986). Se encontró que al inyectar dos chorros simétricos de aire en forma paralela al quemador, se forma una zona de recirculación bien definida que ayuda a la disminución del NO_x . Más tarde Liu *et al.* (1992) investigaron los efectos de un chorro de aire de alta velocidad en la combustión de carbón pulverizado en un horno experimental. El chorro de aire secundario tuvo un efecto significativo en la estabilidad de la flama y se obtuvo 30% de reducción de NO_x . En el trabajo de Liu el aire secundario se introdujo a la cámara de combustión a través de un puerto dirigido a la base del quemador donde se encuentra la zona de recirculación. La inyección de un chorro secundario en estas condiciones provocó efectos adversos en la combustión, ya que se alteró el patrón de la aerodinámica del quemador, encubriendo las ventajas de la inyección de un chorro de aire secundario.

Uno de los objetivos de este estudio fue establecer el punto correcto de inyección del aire perpendicular a la flama, con el propósito de lograr la mayor

A pesar de un gran esfuerzo en investigación, no se ha obtenido todavía un dispositivo optimado para esta técnica, especialmente para quemadores de aceites pesados. En particular, la combustión por etapas eficiente requiere de la compaginación de la dinámica del fluido del quemador con el spray del combustible.

disminución posible de NO_x y partículas manteniendo una alta eficiencia térmica. El aire secundario se inyectó en forma perpendicular al eje de la flama, a temperatura ambiente. Todas las pruebas se realizaron con 1.2 veces el flujo de aire estequiométrico. Para las pruebas con aire secundario, 36% del flujo total de aire se suministró por medio de un simple par de tubos colocados a través de las mirillas laterales del horno. El aire se inyectó en once pares de mirillas distribuidas a lo largo de los lados del horno. El punto óptimo de inyección se determinó suministrando progresivamente los chorros de aire secundario a diferentes distancias axiales del horno. Se midieron las correspondientes concentraciones de NO_x en el flujo de gases para cada par de mirillas de inyección en particular. La selección de esta tecnología de control se basó en el bajo costo para modificar el quemador de la cámara de combustión del IIE.

Horno experimental

Las pruebas de combustión se realizaron en un horno experimental (cámara de combustión), localizado en el laboratorio de combustión del IIE. Como la técnica a emplearse consiste en que la combustión sea subestequiométrica, hubo necesidad de modificar el quemador original para asegurar una combustión estable

bajo estas condiciones. Una de las modificaciones principales consistió en el diseño de un generador de giro del tipo de la Fundación Internacional para la Investigación de Flamas (International Flame Research Foundation), que tiene la posibilidad de acortar o alargar la zona de recirculación variando el grado de giro del aire que pasa por la garganta del quemador. Este dispositivo mejoró notablemente la simetría de los patrones de flujo en el horno, así como la estabilidad de la flama.

Otra ventaja de usar el generador de giro es su instalación simple, ya que el sistema de combustión no requiere de modificaciones significativas, y se obtiene una simetría adecuada en el flujo de aire y estabilidad de la flama, así como repetibilidad en las mediciones. Las paredes del horno de la cámara de combustión del IIE se enfrían con aire, mientras que en los hornos experimentales convencionales se usa agua para enfriamiento [Carvalho *et al.*, 1989, Costa *et al.*, 1991, Barreiros *et al.*, 1993]. Por lo tanto, el horno del IIE tiene un enfriamiento más modesto, lo que hace difícil alcanzar una combustión con baja producción de NO_x , por eso la importancia de la técnica novedosa investigada.

El atomizador de combustóleo utilizado en el quemador para las pruebas de combustión, es un atomizador comercial que utiliza aire como fluido atomizante. La caracterización completa del aerosol producido por el atomizador fue realizada por personal del grupo de atomización y quemadores en el banco de pruebas del IIE. En dicho trabajo se reportan las curvas de operación del atomizador para un amplio intervalo de flujos de aire y aceite.

El horno de la cámara de

combustión del HIE es cilíndrico, de 0.89 m de diámetro interno y 3.0 m de longitud, orientado horizontalmente como se muestra en la figura 1.

El quemador está montado de tal forma que la flama se desarrolla en el eje de la cámara. La salida del horno está conectada a un tren de cambiadores de calor enfriados con aire. El propósito de este tren de intercambiadores es simular el perfil de temperatura de los gases de un generador de vapor de una central termoeléctrica. Una vez que la temperatura de los gases ha sido reducida, los gases producto de la combustión son emitidos a través de una chimenea de 20 m de altura. El quemador tiene una relación de expansión del quark de 1.3 (diámetro

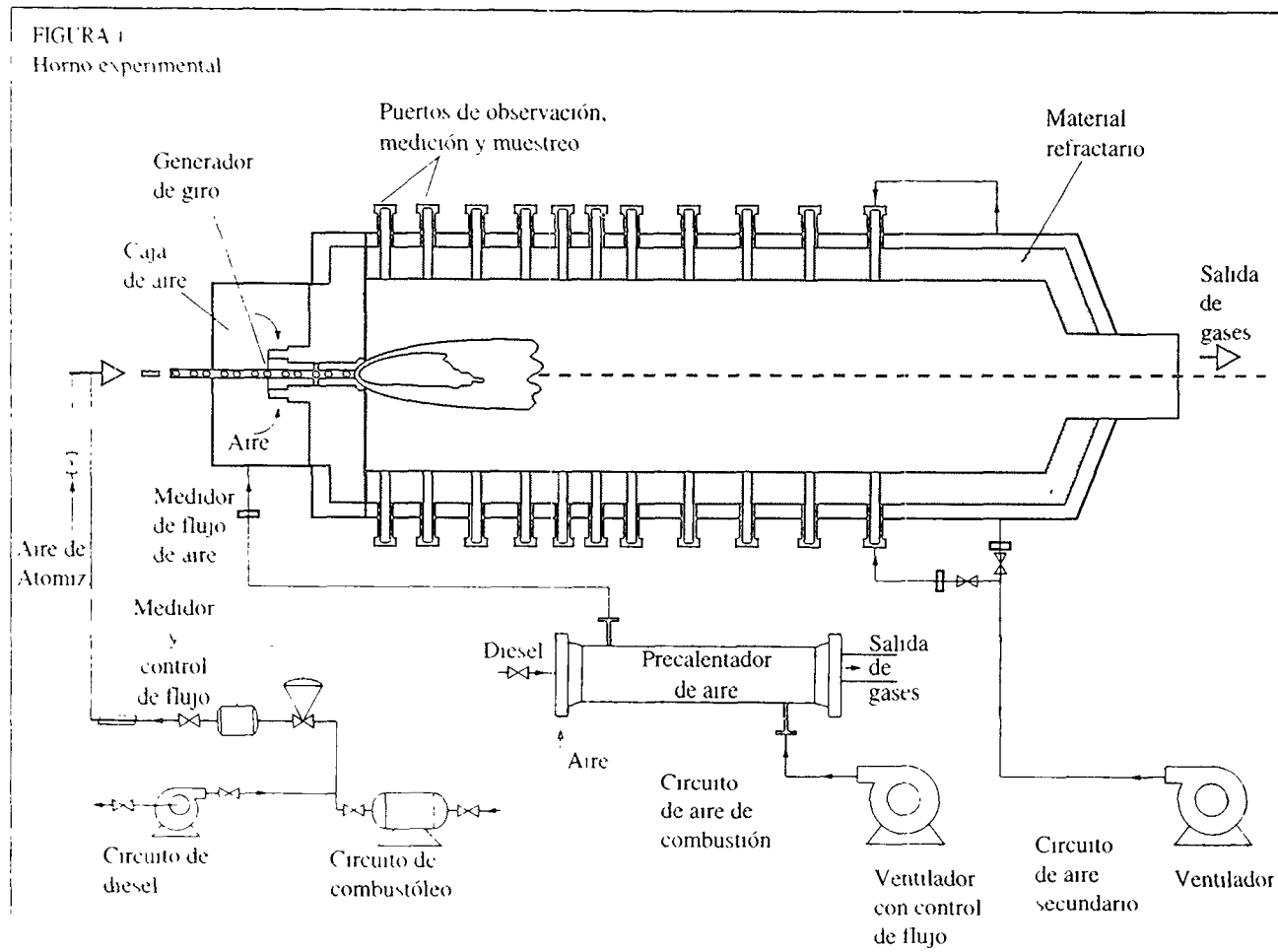
Uno de los objetivos de este estudio fue establecer el punto correcto de inyección del aire perpendicular a la flama, con el propósito de lograr la mayor disminución posible de NO_x y partículas manteniendo una alta eficiencia térmica.

de la garganta de 11 cm y diámetro de salida de 14.3 cm) y está construido de cemento refractario. El refractario de la parte cilíndrica es ladrillo de 11.5 cm de espesor, el cual puede soportar temperaturas hasta de 1600 °C. Después del refractario se encuentra la chaqueta de enfriamiento del horno, anulo de 35 mm formado por dos placas de acero inoxidable de 12.7 mm de espesor, por el cual fluye el aire de

enfriamiento. Al final se encuentra una capa de fibra de cerámica de 2.5 cm de espesor cubierta por una lámina de acero inoxidable.

Para mejorar la simetría del flujo de aire de combustión suministrado en forma tangencial a la caja de aire, se instaló un segundo ducto de aire, simétrico al existente. El generador de giro se diseñó del tipo de bloques móviles. Las especificaciones para la construcción de este tipo de generador de giro se encuentran reportadas en la literatura sobre el tema [Beér and N.A. Chigier, 1983].

En las pruebas, el flujo másico del aire de combustión se midió con una placa de orificio, previamente calibrada. Las mediciones de presión estática en las direcciones



radial y axial se hicieron con la ayuda de una sonda de disco. Las zonas de recirculación fueron detectadas con la sonda de Hubbard, posicionando una sonda de cinco orificios, de acuerdo con la dirección del flujo previamente registrada, para medir radialmente los perfiles de velocidad en las direcciones radial, axial y tangencial cada tres centímetros del centro del quemador a la pared. Las sondas de medición se introdujeron a través de los puertos en los lados del horno. Cada puerto de observación, medición y muestreo tiene un diámetro interno de 56 mm.

Resultados

Para cuantificar la producción total de NO_x medido a la entrada de la chimenea, se hicieron pruebas de combustión, inyectando 35% del aire total de combustión a través de las mirillas perpendiculares al eje de simetría de la cámara de combustión, mientras que el aire primario, pasando a través de la garganta del quemador, permaneció constante a 75% del flujo de aire estequiométrico. Los chorros fueron producidos por un par de tubos de 40.9 mm de diámetro interno colocados al ras de la superficie del refractario a una distancia radial de 445 mm a partir del centro del horno.

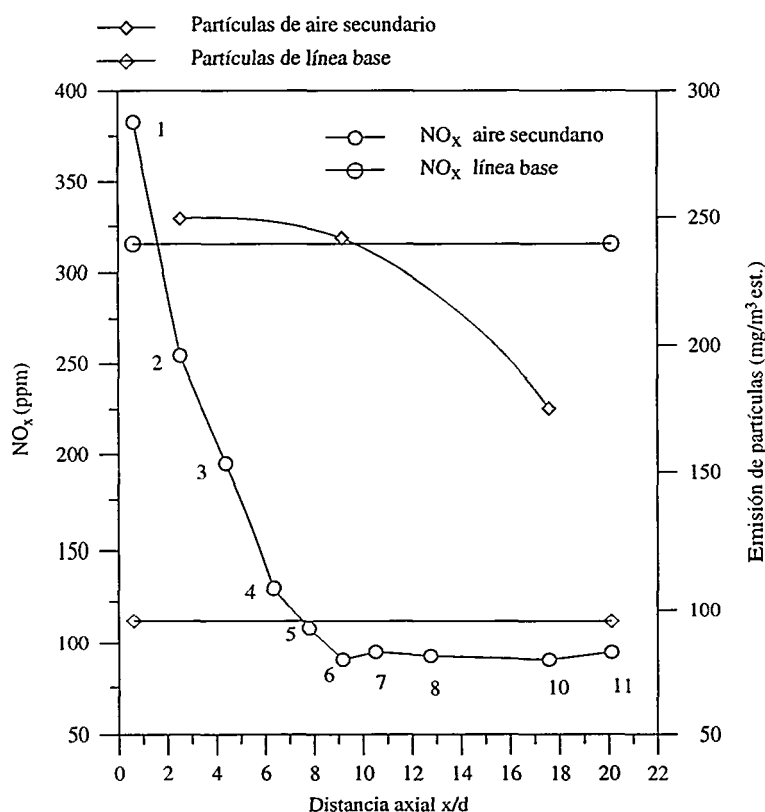
La principal característica de este método de reducción consiste en el eficiente mezclado del aire secundario con los productos de combustión, disminuyendo así la producción de CO, material inquemado y el NO_x térmico, al ser menor la temperatura de la flama en la zona de combustión. En este experimento el aire secundario se inyectó a temperatura ambiente por cada uno de los once pares de puertos de muestreo distribuidos a lo largo del horno. La convención

Las pruebas de combustión se realizaron en un horno experimental, localizado en el laboratorio de combustión del IIE. Como la técnica a emplearse consiste en que la combustión sea subestequiométrica, hubo necesidad de modificar el quemador original para asegurar una combustión estable bajo estas condiciones. Una de las modificaciones principales consistió en el diseño de un generador de giro del tipo de la Fundación Internacional para la Investigación de Flamas (International Flame Research Foundation), que tiene la habilidad de acortar o alargar la zona de recirculación variando el grado de giro del aire que pasa por la garganta del quemador.

adoptada aquí es que el primer puerto es el más cercano al quemador y el último se localiza cerca de la salida del horno, como se aprecia en la figura 1. La efectividad del presente método de reducción fue medida relativa a las pruebas de combustión desarrolladas como línea base, bajo condiciones estables de operación sin la inyección del aire secundario. La figura 2 muestra los valores de NO_x medidos en la chimenea según las varias posiciones de inyección de aire secundario. La línea base de las mediciones de NO_x también se representa gráficamente en la figura 2 como una medida relativa para observar las ventajas del nuevo diseño del quemador. El

FIGURA 2

Comparación de las emisiones de NO_x y partículas medidas en la chimenea con y sin la inyección de aire secundario.



valor medido de NO_x en las pruebas de línea base fue de 316 ppm. El beneficio de reducir la formación de NO_x suministrando parte del aire de combustión a través de los puertos laterales no fue satisfactoria para regiones cercanas al quemador debido a los altos niveles medidos de NO_x y partículas. Sin embargo, para los puertos del 5 al 11 existió una importante reducción de NO_x . La distribución de éstos indica que los efectos de los chorros de aire secundario en los niveles de NO_x son casi los mismos para los puertos del 6 al 11. En todas las pruebas los niveles medidos de CO fueron despreciables, indicando que la reducción de NO_x no se alcanzó al precio de altos niveles de CO. Las características globales de este diseño de quemador son verificadas por la determinación directa de la emisión de partículas y residuos. La figura 2 muestra también los niveles de emisión de partículas con y sin los chorros de aire secundario. Si se observa la gráfica de partículas, se infiere que un efecto adverso de la inyección de aire secundario prevalece en la producción de partículas.

Modelación de la combustión

Con el objeto de evaluar la aerodinámica del flujo de aire a temperatura ambiente, así como todas las mediciones de combustión, se hicieron simulaciones en un código comercial de dinámica de fluidos computacional llamado FLUENT (V4.42). El caso de línea base fue simulado en FLUENT, para el cual se reportaron mediciones experimentales de perfiles de temperatura. También se simuló el caso donde se inyectó aire secundario a través del puerto número 6 a 1 m de distancia de la salida del quemador. Los resultados

En todas las pruebas los niveles medidos de CO fueron despreciables, indicando que la reducción de NO_x no se alcanzó al precio de altos niveles de CO.

de los niveles de emisión de oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO) y bióxido de carbono (CO_2) a la salida del horno se compararon con los valores experimentales.

Para representar la distribución continua del *spray* se escogió un número finito de intervalos de tamaño de gotas.

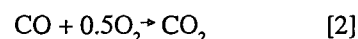
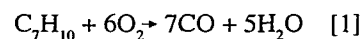
Las ecuaciones de transferencia de calor y masa para las gotas fueron resueltas por FLUENT en un marco de referencia lagrangiano de fase dispersa. Debido a la naturaleza estocástica del procedimiento, se escogieron cinco grupos de 6 gotas cada uno y un factor de relajación de 0.3, con el objeto de obtener una representación aceptable de la distribución promedio del *spray* en el horno. Las gotas se distribuyeron uniformemente en el ángulo del cono del *spray* medido experimentalmente. El diámetro de las gotas se midió usando la distribución Rosin-Rammler.

El mecanismo de reacción química de la combustión se escogió como un modelo de dos pasos, en el cual el carbono reacciona primero para formar CO y en un segundo paso el CO se oxida a CO_2 . Se supone que todo el contenido de hidrógeno se oxida para formar agua.

Los aceites pesados son hidrocarburos complejos difíciles de definir como mezclas de sustancias puras.

En este caso, se seleccionó una especie equivalente, considerando el análisis elemental del combustóleo y su poder calorífico. Un combustóleo típico contiene 84% de carbón y 10%

de hidrógeno en peso. Dividiendo por los pesos atómicos, se obtuvo el combustible con la fórmula molecular C_7H_{10} . La reacción química se consideró como:



La entalpía de formación para las especies del combustible se calculó como:

$$\Delta H = \sum h_p^0 v_p - \sum h_R^0 v_R \quad [3]$$

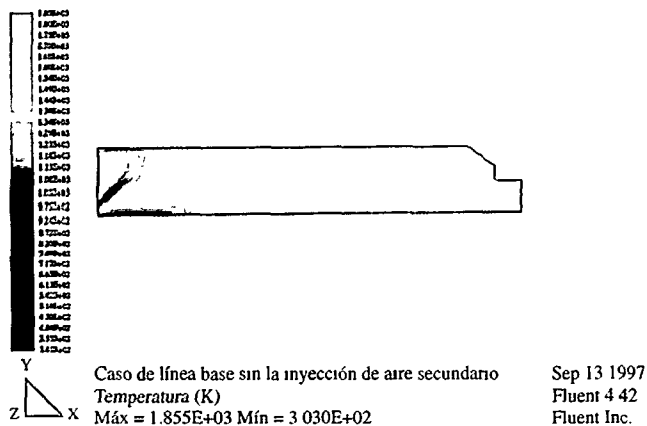
donde P representa los productos y R los reactantes, v es el coeficiente estequiométrico molar y h^0 es la entalpía de formación.

Análisis de resultados

La figura 3 muestra los contornos de temperatura para las condiciones de combustión de línea base (sin aire secundario). El valor mínimo de 303 K se calculó para la entrada del aire y el inicio de la flama. El valor más alto, 1855 K, fue para la zona externa de recirculación que es también la zona de más bajo flujo de gases de combustión, siguiendo su contorno hasta la salida del horno. La figura 4 muestra la comparación de los perfiles de temperatura medidos con los calculados por FLUENT. Se observa una buena aproximación para los primeros tres perfiles $x/d = 6.32, 7.77$ y 9.14 y una menos buena aproximación para los últimos tres perfiles $x/d = 10.5, 12.77$ y 17.64 . La máxima diferencia encontrada fue de 9.5% para el centro del horno en el último perfil de temperatura. Las figuras 5 y 6 muestran los contornos de O_2 y CO. La figura 5 muestra que la zona de la flama es la de más baja concentración de O_2 , mientras que la de más alta es la

FIGURA 3

Contornos de temperatura. Caso de línea base sin la inyección de aire secundario.



Los efectos de los chorros de aire secundario dirigidos al eje de la flama en forma perpendicular, en la combustión de combustóleo, mostraron una reducción significativa en la producción de NO_x medido en la chimenea. Se obtuvo 71% de reducción en NO_x cuando se inyectó el aire secundario por los puertos del 6 al 11.

zona de entrada del aire al horno. La fracción molar de O_2 a la salida del horno fue de 2.3%, comparada con el valor medido de 1.5%. La máxima concentración de CO es para la zona de la periferia de la flama, mientras que a la salida del horno el valor calculado fue de 9 ppm y el medido de 8 ppm.

Resultados para la combustión con aire secundario

Se hizo la modelación en tres dimensiones de la combustión con los chorros laterales de aire, usando los mismos esquemas y modelos empleados en el caso de la línea base. Las figuras 7, 8 y 9 muestran los resultados para la inyección del aire secundario a través del puerto 6. La figura 7 muestra los contornos de temperatura en el plano longitudinal del horno. La temperatura más alta fue de 1790 K y se alcanzó en la zona alrededor de la flama y de la zona de mezclado del aire secundario, rumbo a la salida del horno. La zona central de la flama, así como el aire secundario, alcanzaron una temperatura de 1000 K. Las figuras 8 y 9 muestran la distribución de O_2 y CO en el horno, respectivamente. Puede apreciarse que la zona de combustión es el romboide formado por el aire primario y secundario. En esta zona el contenido de O_2 es bajo, mientras que el CO es alto. El valor calculado

FIGURA 4

Comparación de perfiles de temperaturas medidos y calculados. Línea base.

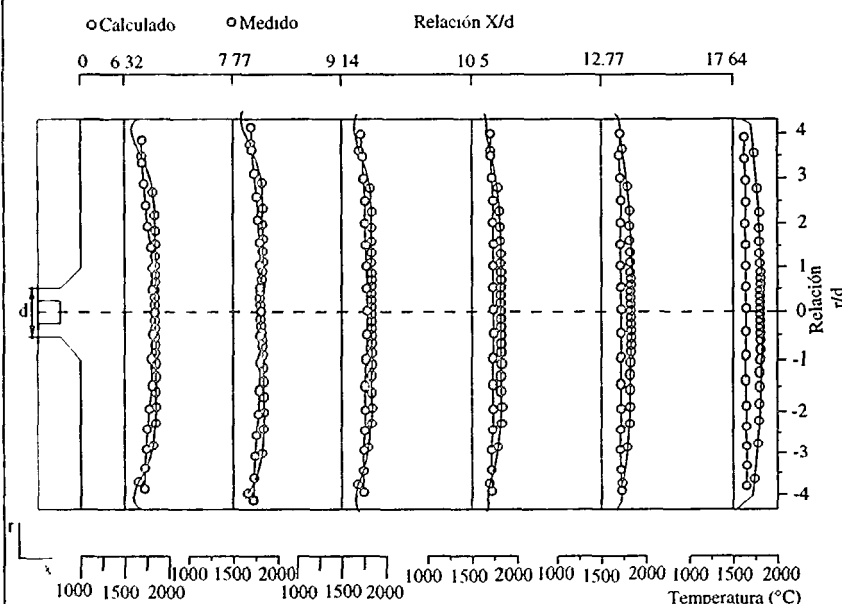


FIGURA 5

Concentración de oxígeno. Línea base.

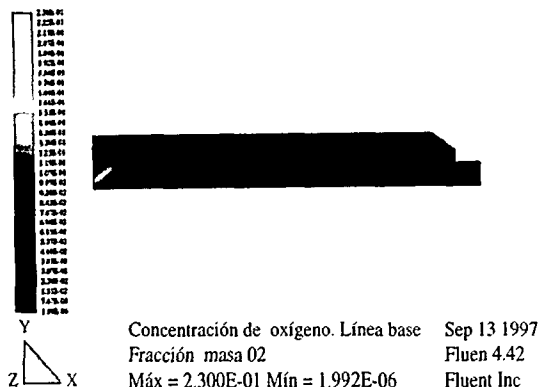


FIGURA 6

Concentración de monóxido de carbono. Línea base.

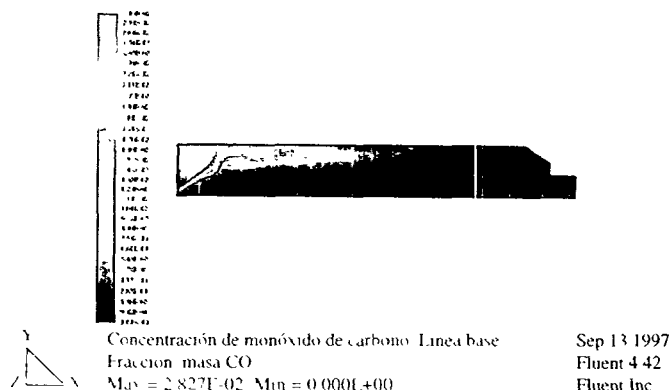


FIGURA 7

Contornos de temperatura. Inyección de aire secundario a través de la mirilla no. 6

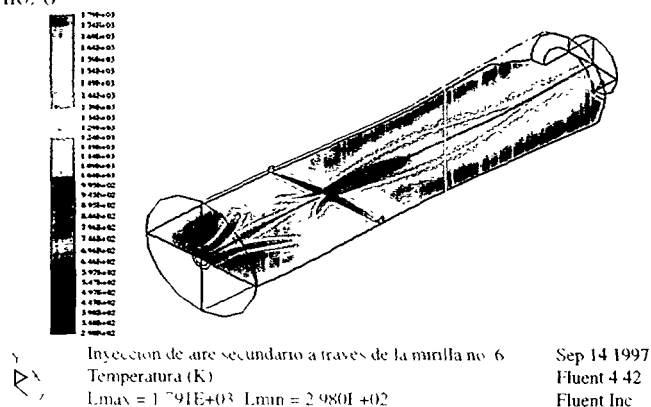
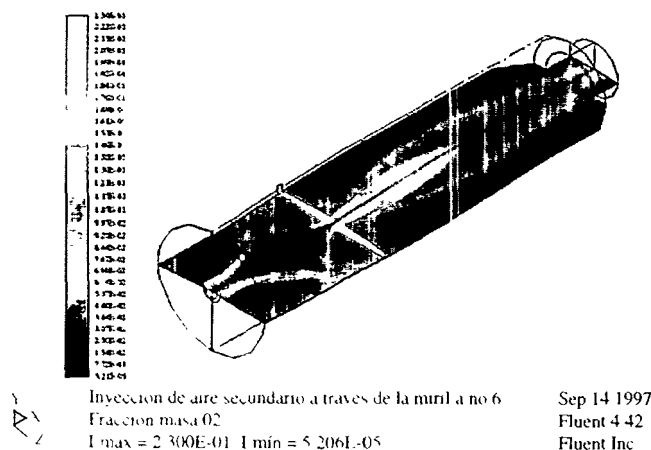


FIGURA 8

Concentración de oxígeno. Inyección de aire secundario a través de la mirilla no. 6.



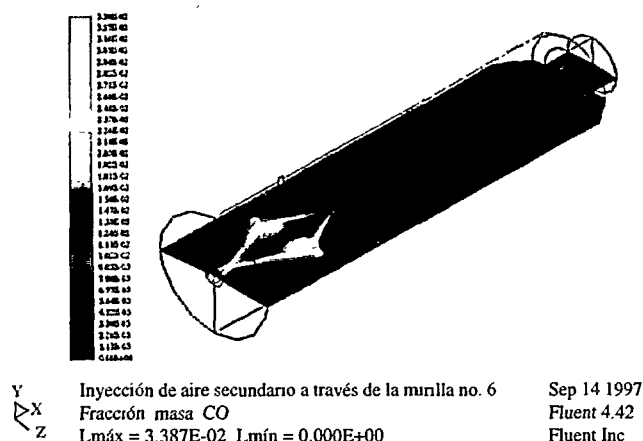
de contenido de O_2 a la salida del horno fue dos veces mayor que el valor medido de 1.5 %, mientras que el CO fue de 12 ppm, igual para ambas condiciones. Es importante observar el mezclado de los chorros de aire secundario con los gases calientes y la contribución del aire que se va hacia el quemador con la combustión. Las emisiones de NO_x en flamas de combustóleo tienen dos fuentes principales: el nitrógeno en el aire de combustión que produce los llamados NO_x térmico y rápido (prompt NO_x), y los compuestos de nitrógeno en el combustible, que producen el (fuel NO_x). De acuerdo con Barreiros *et al.*, (1993) existe consenso de que en flamas de combustóleo, como una primera aproximación, el NO_x rápido puede despreciarse. Por otro lado, Hampartsoumian *et al.*, (1993) sugieren que el NO_x del combustible es el contribuyente dominante en las emisiones totales de NO_x .

Conclusiones

Los efectos de los chorros de aire secundario dirigidos al eje de la flama en forma perpendicular, en la combustión de combustóleo, mostraron una reducción significativa en la producción de NO_x medido en la chimenea. Se obtuvo 71% de reducción en NO_x cuando se inyectó el aire secundario por los puertos del 6 al 11. La emisión de partículas y residuos no dio la tendencia deseada, de hecho, aumentaron 84% del valor de la línea base. Sin embargo, parece que puede obtenerse un valor menor de estas especies, manteniendo las características óptimas de combustión, redistribuyendo la entrada de los chorros de aire a cuatro puertos en lugar de dos, con el objeto de lograr el mejor mezclado con los gases de combustión.

FIGURA 9

Concentración de CO. Inyección de aire secundario a través de la mirilla no. 6.



La temperatura de la flama y el contenido de O_2 son dos de los parámetros principales que tienen mayor influencia en la producción del NO_x . Debido a la combustión subestequiométrica, se creó una combustión rica. Bajo esas condiciones el nitrógeno del combustible se redujo a nitrógeno molecular, y debido a la inyección de los chorros de aire secundario, las temperaturas fueron más bajas que las requeridas para la subsecuente formación del NO_x térmico.

Referencias

Barreiros, A., Carvalho, M.G., Costa, M. and Lockwood, F.C., "Prediction of the Near Burner Region and Measurements of NO_x and particulate Emissions in Heavy Fuel Oil Spray Flames", *Combustion and Flame*, vol. 92, 1993, pp. 231-240.

Beér, J.M. and N.A. Chigier, *Combustion Aerodynamics*, Printed and Published by Robert E. Krieger Publishing Company, Inc., Malabar, Florida, Estados Unidos, reprint edition, 1983.

Carvalho, M.G., M. Costa, F.C. Lockwood, and V. Semiao, *The prediction of SMD and droplet size distribution for different atomisers*, International Conference on Mechanics of Two-Phase Flows, Universidad Nacional de Taiwan, Taipei, Taiwan, 1989.

Costa, M., P. Costen, and F.C. Lockwood, "Combustion measurements in a heavy-fuel oil fired furnace", *Combustion Science and Technology*, vol. 75, 1991, pp. 129-154.

Costa, M., P. Costen, and F.C. Lockwood, "Detailed measurements in a heavy-fuel oil fired large-scale furnace", *Combustion Science and Technology*, vol. 77, 1991, pp. 1-26.

Eskinazi, D., E. Cichanowicz, A. Kokkinos, J. Stallings, and G. Offen, "Retrofit NO_x controls for utility boilers, a synthesis of technologies, issues, and CAAA Ozone attainment legislation". Electric Power Research Institute, Estados Unidos, TR-102012 final report, 1993.

Hampartsoumian, E., W. Nimmo, M. Pourkashanian, and A. Williams, "The prediction of NO_x emissions from spray combustion", *Combustion Science and Technology*, vol. 93, 1993, pp. 153-172.

Liu, F., E.S. Garbett, and J. Swithenbank., "The effects of a single high-velocity jet on the combustion of pulverised coal in a small-scale furnace", *J. Institute of Energy*, marzo de 1992, pp. 24-30.

Ruiz, G., et al., "Caracterización de combustóleos y gas natural utilizados en generadores de vapor", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México, IIE/12/1675/I 06/F/VI, reporte final, 1983.

Sefer and Moulton, "Residual Fuel Oil User's Guidebook", vol. 1: Residual Oil Fundamentals, EPRI AP-5826, final report, 1988.

Thompson, R.E., G.H. Shiomoto., and L.J. Muzio., "Residual Fuel Oil User's Guidebook", vol. 2: Residual Oil-Fired Boilers, EPRI AP-5826, final report, 1988.

Wood, S.C., "Select the Right NO_x Control Technology", *Chemical Engineering Progress*, Estados Unidos, vol. 90, núm. 1, pp. 32-38, 1994.

Zhou, L., W. Lin., J. Zhang., and Z. Wang., *Numerical modelling of three-dimensional flow field and two dimensional coal combustion in a cylindrical combustor of co-flow jets with large velocity difference*, 21st Symp. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, 1986, pp. 257-264.

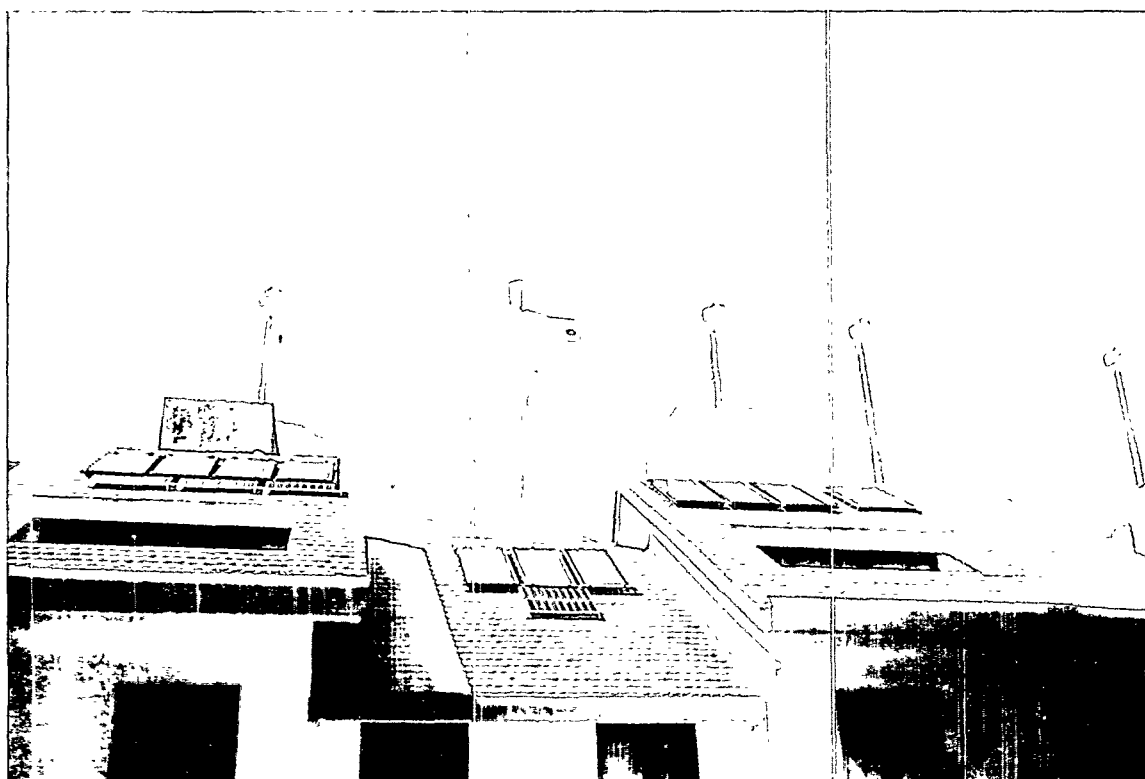
ROGELIO ESCALERA CAMPOVERDE



Ingeniero mecánico electricista (1977) y maestro en Ingeniería Mecánica (1983) por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); doctor en Tecnología de la Combustión (1997) por la Universidad de Salford, Inglaterra. De 1977 a 1985 fue profesor investigador de tiempo completo en el Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Desde 1985 es investigador de la Unidad de Resultados de Procesos Térmicos de la División de Sistemas Mecánicos. Su área de especialidad es el diseño de quemadores de baja emisión de contaminantes para combustibles fósiles. Ha publicado varios artículos técnicos y presentado trabajos relacionados con su especialidad en foros nacionales e internacionales.

Tecnología de sistemas híbridos solar-eólico para desarrollos ecoturísticos

Aplicaciones: *Iluminación*
Refrigeración
Aire acondicionado



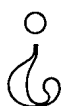
El *Parque Ecológico* en Playa del Carmen, Quintana Roo, primer desarrollo ecoturístico que satisface sus necesidades de energía eléctrica para iluminación con un sistema híbrido solar-eólico diseñado y construido por el IIE.

Mayores informes
Instituto de Energías No Convencionales del IIE
Teléfono (73) 18 38 11, extensión 7771.



Desarrollo piloto del almacén de datos corporativos de la CFE

Jorge González Sustaeta, Guillermo Rodríguez Ortiz,
Norma Elena Jácome Grajales y Miguel Pérez Ramírez



Qué es un almacén de datos?

Un almacén de datos se define como una colección integrada, orientada a entidades, variante en el tiempo y no volátil de datos que apoye la toma de decisiones gerenciales.

Los objetivos de un almacén de datos son permitir el acceso a datos organizacionales o corporativos, brindar datos congruentes, permitir separar o combinar datos desde los diversos puntos de vista de la empresa, proporcionar herramientas para

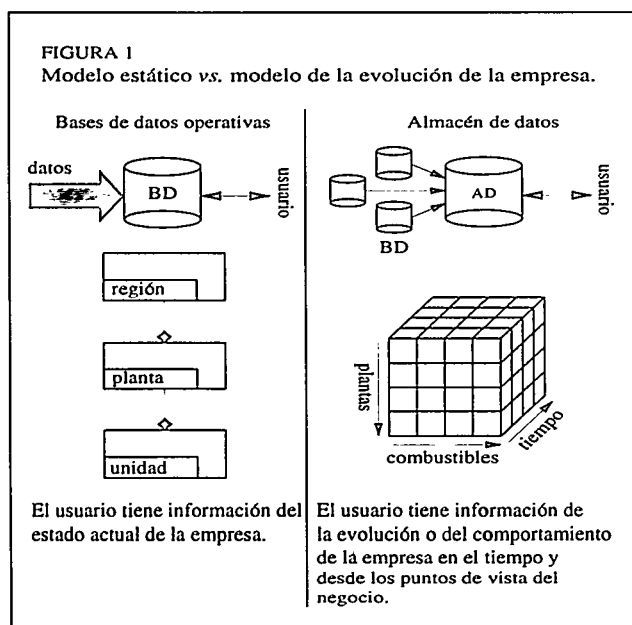
Los objetivos de un almacén de datos son permitir el acceso a datos organizacionales o corporativos, brindar datos congruentes, permitir separar o combinar datos desde los diversos puntos de vista de la empresa, proporcionar herramientas para interrogar, analizar y presentar información ágilmente y alimentar los criterios de reingeniería de la empresa.

interrogar, analizar y presentar información ágilmente y alimentar los criterios de reingeniería de la empresa.

Un almacén de datos es diferente tanto en intención como en extensión de una base de datos operacional, entendiendo por bases de datos operacionales aquellas cuyo objetivo es proporcionar información para la toma de decisiones tácticas en las empresas u organizaciones, siendo diferentes los usuarios, el contenido, la estructura de los datos, las computadoras, la administración, los ritmos de trabajo, las técnicas y los instintos de diseño (figura 1).

En las bases de datos operacionales la congruencia es microscópica; se procesa un gran número de transacciones pequeñas, atómicas, sin que se pierda ninguna. En un almacén de datos la congruencia se mide en forma global, como conjunto de datos completo; más que congruencia técnica, tenemos congruencia de datos juzgada por los ejecutivos.

Los usuarios de las bases de datos operacionales operan las ruedas de la organización; toman pedidos, abren y cierran cuentas, dan de alta nuevos clientes, etcétera; generalmente tienen acceso a registros



individuales y, si se detienen, detienen a la empresa.

Los usuarios de un almacén de datos observan las ruedas de la organización; quieren saber por qué se quejan los clientes, quieren saber cuántos nuevos pedidos se tienen en respuesta a cierta promoción, están interesados en respuestas y cambian continuamente los tipos de preguntas, navegan rápidamente a través del contenido del almacén y cuando requieren un reporte, éste no debe ser mayor de una página.

Las bases de datos operacionales contienen una foto instantánea de la empresa o negocio; varían constantemente.

Los almacenes de datos son series de tiempo; son un conjunto de instantáneas de los sistemas operacionales.

La figura 2 ilustra la diferente orientación en las bases de datos operacionales y en los almacenes de datos.

Lo anterior lleva a la necesidad de que los modelos de datos de los almacenes de datos sean diferentes a los de las bases de datos operacionales.

Un almacén de datos es diferente tanto en intención como en extensión de una base de datos operacional, entendiéndose por bases de datos operacionales, aquellas cuyo objetivo es proporcionar información para la toma de decisiones tácticas en las empresas u organizaciones, siendo diferentes los usuarios, el contenido, la estructura de los datos, las computadoras, la administración, los ritmos de trabajo, las técnicas y los instintos de diseño.

En las bases de datos operacionales, comúnmente y en el estado actual de la práctica se emplea el modelo entidad-relación, el cual tiene las siguientes características: ayuda a minimizar la redundancia en datos a través de técnicas de normalización; es muy simétrico (todas las tablas lucen igual, pero los diagramas son difíciles de visualizar, entender y aprender); y es complejo de navegar para formular consultas (puede haber trayectorias diferentes entre dos tablas, posiblemente con diferente semántica).

En los almacenes de datos generalmente se emplea el modelo

multidimensional o modelo de estrella, el cual cuenta con las siguientes características: tiene la estructura simple de un "cubo" de datos; es asimétrico (las tablas de dimensiones se enlazan con la tabla de hechos con un solo enlace (más adelante explicaremos las tablas de hechos y las dimensiones); y el "grano" de la tabla de hechos es el ritmo en el tiempo entre cada uno de sus renglones (diario, mensual, etcétera).

En la figura 3 se ilustran los componentes genéricos de un sistema de almacén de datos.

Los componentes genéricos de un sistema de almacén de datos se derivan de un modelo conocido como SMT, (por las siglas en inglés de Source-Move-Target), que establece un enfoque metodológico de análisis, diseño de arquitectura y desarrollo de los almacenes de datos, enfocándose primero a las fuentes de datos (Source), que son los sistemas operacionales de los cuales se requiere extraer datos, en seguida, a la transmisión de esos datos (Move), desde el lugar donde se encuentra cada fuente hasta el lugar donde se

FIGURA 2

Orientación diferente en las bases de datos operacionales y en los almacenes de datos.

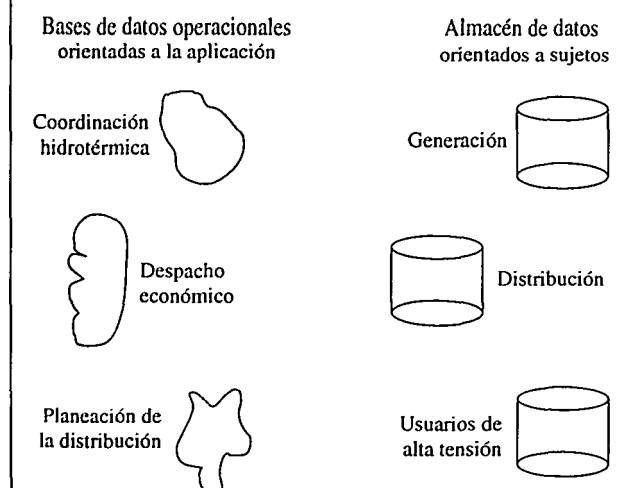
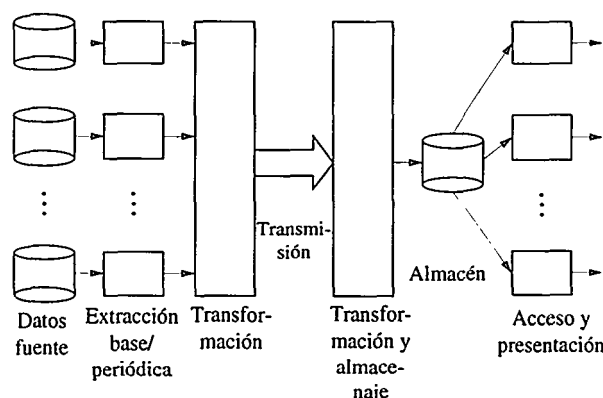


FIGURA 3

Componentes de un sistema de almacén de datos.



encuentra el almacén y, finalmente, en el almacén propiamente dicho (Target), donde se contempla la inserción de datos y sus mecanismos de explotación.

Para finalizar esta sección de explicación de lo que es un almacén de datos, cabe mencionar que se basan en tecnología disponible actualmente, como son las redes locales, las redes amplias, el modelo multidimensional, los manejadores de base de datos relacionales, los manejadores de bases de datos multidimensionales y la visualización de datos.

Lo novedoso en los almacenes de datos es la forma de combinar estas tecnologías para lograr los objetivos planteados en el inicio de esta sección.

Modelado de datos multidimensional o de estrella

Una base de datos multidimensional es un sistema de *software* diseñado para permitir el almacenamiento y la recuperación eficiente de grandes volúmenes de datos íntimamente relacionados y almacenados, vistos y analizados desde diferentes perspectivas (llamadas dimensiones).

El componente fundamental de una base de datos multidimensional es un arreglo o matriz de n dimensiones. Este componente se representa como una estrella (figura 4).

Una estrella o cubo multidimensional se compone de una tabla de hechos y de n tablas de dimensiones, donde n es la dimensión del cubo en cuestión.

Los principales beneficios de este modelo son su facilidad de presentación, navegación y mantenimiento, así como su rapidez de acceso.

Existe un conjunto de técnicas y consideraciones pertinentes en el diseño de una base de datos

Una base de datos multidimensional es un sistema de software diseñado para permitir el almacenamiento y la recuperación eficiente de grandes volúmenes de datos íntimamente relacionados y almacenados, vistos y analizados desde diferentes perspectivas.

multidimensional cuya exposición rebasa los límites y el objetivo de este artículo. La mayoría de estas técnicas se orientan a lograr los beneficios antes mencionados.

Cabe hacer notar, sin embargo, que la tecnología multidimensional no está orientada para tomar el lugar de la tecnología relacional. Ambas tienen ventajas y desventajas, al igual que campos de aplicación convenientes.

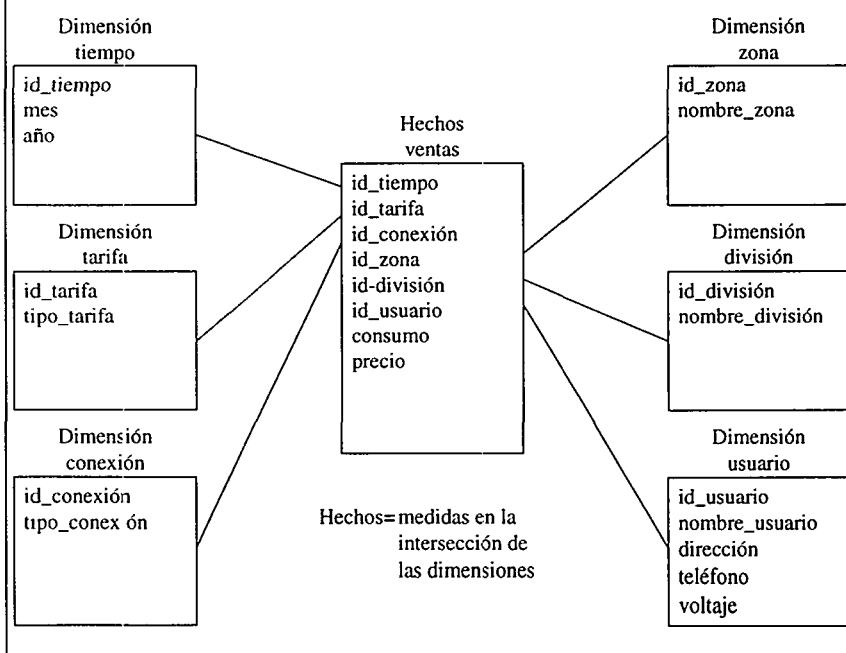
El campo de aplicación natural del modelo multidimensional de datos es el de los almacenes de datos.

Sistema de Información Corporativa

La globalización de las economías ha cambiado muchas de las prácticas de negocio de las empresas, y compañías como la CFE no pueden permanecer ajenas a estos cambios. El control de cualquier empresa requiere procesar grandes volúmenes de datos, convirtiéndolos en información útil para los ejecutivos que planean y toman decisiones estratégicas.

El nivel de competencia es cada día mayor y eso obliga a las empresas a contar con herramientas poderosas de análisis para llevar a buen término su gestión. La informática y las telecomunicaciones tienen el papel de proporcionar este tipo de herramientas y es por este motivo que la Gerencia de Informática y Telecomunicaciones de la CFE se propuso contar con un Sistema de Información Corporativa que cumpla precisamente con esa

FIGURA 4
Ejemplo de hechos y dimensiones en un modelo multidimensional.



función, mediante la aplicación de la tecnología de los almacenes de datos, con el fin de construir una base de información única para la concentración de datos históricos y actuales, enfocada al análisis y no a la operación de la empresa.

La consecución del proyecto del Sicorp está llevando a resolver problemas complejos, dada la dispersión geográfica y la desconcentración operativa de la paraestatal, aunado al gran volumen de datos que se generan a cada instante en los diferentes procesos técnicos y administrativos de producción y control relacionados con la generación, transmisión, transformación y distribución de la energía eléctrica.

El beneficio esperado de un sistema de esta naturaleza es contar con información certera y oportuna para definir con eficacia y eficiencia el rumbo de la empresa y corregir a tiempo las desviaciones de los objetivos.

Dada la novedad de los proyectos de desarrollo de almacenes de datos y la incertidumbre inherente a este tipo de proyectos por la inexistencia de personal con experiencia práctica en ellos, la Gerencia de Informática y Telecomunicaciones de la CFE, a través de su Departamento de Sistemas Corporativos, contrató a la Unidad de Sistemas Informáticos (USI) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para llevar a cabo un proyecto con dos objetivos principales: primero, desarrollar una versión piloto del almacén de datos corporativos, considerando datos provenientes de diversos sistemas operacionales en el proceso de generación de energía eléctrica; y, segundo, capacitar al personal de dicho Departamento en las metodologías y técnicas de

La Gerencia de Informática y Telecomunicaciones de la CFE contrató a la Unidad de Sistemas Informáticos del Instituto de Investigaciones Eléctricas para llevar a cabo un proyecto con dos objetivos principales: primero, desarrollar una versión piloto del almacén de datos corporativos, considerando datos provenientes de diversos sistemas operacionales en el proceso de generación de energía eléctrica; y, segundo, capacitar a su personal en las metodologías y técnicas de desarrollo de almacenes de datos, con el fin de prepararlos para la consecución del proyecto con sus propios recursos.

desarrollo de almacenes de datos, con el fin de prepararlos para la consecución del proyecto con sus propios recursos.

Resumen del proyecto

En los objetivos se planteó desarrollar una primera versión del almacén de datos corporativos de la CFE tomando en cuenta datos del proceso de generación, considerando los siguientes sistemas de información: Sistermo (índices de gestión de generación termoelectrónica), Sishidro (índices de gestión de generación hidroeléctrica) y CB (costos de combustibles).

En el desarrollo de la primera versión del almacén de datos corporativos se contempló el análisis de las bases de datos fuente, el modelado conceptual de las estructuras de datos del almacén, la especificación, diseño e implementación de los programas de extracción, transformación e inserción de datos de los sistemas fuente hacia el almacén, las pruebas de aceptación del sistema y la entrega de productos y de su documentación.

El modelado conceptual de las estructuras de datos del almacén se basó en el modelo conocido como modelo de estrellas o modelo multidimensional, el cual tiene la particularidad de facilitar las consultas de la base de datos, proporcionando flexibilidad para que un ejecutivo, con el empleo de herramientas disponibles en el mercado (OLAP), consulte datos siguiendo las dimensiones del negocio: el tiempo, los tipos de combustibles, la organización jerárquica de la empresa, etcétera.

Del modelo conceptual se derivó un modelo lógico relacional para ser implementado en el manejador de bases de datos Informix 7.

Se especificó, diseñó e implementó un extractor de datos general para sistemas fuente en Informix. Este programa, además de extraer datos de Sistermo, Sishidro y CB, servirá para extraer datos de cualquier sistema fuente en Informix 5 o posterior, que es el manejador de bases de datos estándar en la Comisión Federal de Electricidad.

Se especificaron, diseñaron e implementaron programas de transformación de datos y de inserción de datos al almacén para Sistermo, Sishidro y costos de combustibles.

El proyecto abarcó una primera etapa de un proyecto mucho más ambicioso, relacionado con la implementación en la CFE de un Sistema de Información Corporativa. El corazón de un sistema de ese tipo es el almacén de datos.

El resultado de este proyecto proporciona una primera versión del almacén de datos corporativos de la CFE y deja a personal del Departamento de Sistemas Corporativos capacitado para desarrollar, o en su defecto, supervisar el desarrollo futuro de este almacén de datos.

Un aspecto importante en el desarrollo del proyecto fue la estrecha colaboración entre los participantes del IIE y de la CFE, estos últimos, especialistas tanto en informática y computación como en los sistemas de datos fuente. Se tuvo una interacción muy estrecha tanto personalmente (juntas y reuniones de trabajo) como a distancia (a través de medios proporcionados por Internet).

Organización y actividades

El proyecto se desarrolló en cuatro etapas:

- a) Curso de almacenes de datos.
- b) Análisis de sistemas fuente.
- c) Modelado conceptual y lógico del almacén de datos.
- d) Especificación, diseño, implementación y prueba de programas.

A continuación se describe el trabajo llevado a cabo en estas etapas del proyecto.

Curso de almacenes de datos

En la primera etapa se contempló la preparación y la impartición de un curso sobre almacenes de datos a personal del Departamento de Sistemas Corporativos.

Los objetivos de este curso fueron establecer un lenguaje o una terminología común entre los participantes en el proyecto, tanto por parte del IIE, como por parte de la CFE, y establecer, a grandes rasgos, una metodología de desarrollo de almacenes de datos, enfatizando las diferencias entre este tipo de sistemas orientados a la toma de decisiones estratégicas en las empresas *versus* las bases de datos "comunes", enfocadas a la toma de decisiones tácticas u operativas en las mismas empresas.

Análisis de sistemas fuente

La segunda etapa abarcó el análisis

El modelado conceptual de las estructuras de datos del almacén se basó en el modelo conocido como modelo de estrellas o modelo multidimensional.

de los sistemas de información operacionales de los que se iban a extraer datos para llevarlos al almacén de datos corporativos.

El análisis englobó la comprensión y documentación de los esquemas de datos de los sistemas fuente, la determinación, en conjunto con la CFE, de los datos que debían ser llevados al almacén de datos; el estudio de los sistemas operativos en los que se ejecutan los sistemas fuente, así como de los medios de comunicación con el sistema del almacén y la documentación de los resultados del análisis.

Los productos de análisis tienen la siguiente estructura:

- Se realiza una introducción donde se presentan algunas generalidades, los objetivos y el alcance del análisis.
- En la documentación del análisis propiamente dicha se hace una introducción al sistema o a los sistemas que se analizan: Sisterno y Sishidro en un caso, CB en el otro.
- Se documenta el esquema de la base de datos en un diagrama entidad-relación y se presenta un diccionario de datos de dicho esquema.
- Se especifican los datos que se sacan del sistema fuente y que se llevan al almacén.
- Se documenta la plataforma en la que reside el sistema fuente (computadora, sistema operativo, manejador de bases de datos, principalmente) y se documentan el o los medios de transporte de datos disponibles.

Modelado conceptual y lógico del almacén de datos

La tercera etapa se enfocó al modelado conceptual y lógico de las estructuras de la primera versión del almacén de datos corporativos.

El modelo conceptual se compone de la definición de un conjunto de estrellas.

Una estrella se compone de una tabla de hechos y de un cierto número de tablas de dimensiones.

Las tablas de hechos contienen datos de una parte de la empresa, generalmente de un proceso de la misma, en este caso, del proceso de generación.

Los hechos generalmente se acumulan en el tiempo. Se dice que una tabla de hechos tiene un cierto grano o una cierta granularidad, que es el tiempo transcurrido entre dos hechos (por ejemplo diario, mensual, etcétera).

Las tablas de dimensiones proporcionan datos de los puntos de vista de la empresa desde los que se pueden observar los hechos.

Una dimensión obvia es el tiempo; otras son, en nuestro caso, la estructura jerárquica organizacional de la CFE, los tipos de generación, los tipos de combustibles.

Del modelo conceptual de las estrellas del almacén de datos se derivó un modelo relacional, expresado en SQL (Structured Query Language), que define en un lenguaje declarativo estándar las tablas y las relaciones entre éstas para un manejador de bases de datos relacional. La CFE definió que el manejador para el almacén de datos es Informix 7 y en éste se implementaron las estructuras de datos del almacén en una computadora Sun Ultra 6000 bajo el sistema operativo Solaris.

A continuación se describen los productos de esta fase del proyecto:

En generación termoeléctrica se contemplan tres estrellas, una para datos de unidades de generación, otra para datos de plantas generadoras y otra para datos de subgerencias de generación.

El grano de las tablas de hechos es mensual; estas tablas almacenan hechos, tanto de Sisterno, como de combustibles.

En generación hidroeléctrica también se contemplan tres estrellas, una para datos de unidades de generación, otra para datos de plantas generadoras y otra para datos de subgerencias de generación.

El grano de las tablas de hechos de generación hidroeléctrica también es mensual.

Para cada una de las estrellas tanto de generación termoeléctrica como hidroeléctrica se documentan las dimensiones de los procesos de generación. Es claro que varias dimensiones son comunes a distintas estrellas.

Por otra parte, se documentan diversos metadatos, o sea información sobre los datos almacenados, que se mantienen con el propósito de facilitar las consultas o darle más "inteligencia" a las mismas.

En cuanto al modelo lógico del almacén de datos, no se hizo un documento del mismo, dado que prácticamente se deriva uno a uno del modelo conceptual: cada una de las tablas de hechos se define como una tabla en el modelo relacional; cada una de las dimensiones se define como una tabla en el modelo relacional y se liga con la o las tablas de hechos que dimensiona a través de una llave externa en la tabla de hechos.

A continuación se incluye, como ejemplo, una de las estrellas del modelo del almacén de datos: la estrella unidad termoeléctrica, que

integra datos de los sistemas operacionales Sisterno y de combustibles (figura 5).

En la figura 5 se observa que la tabla de hechos "unidad termoeléctrica" forma un cubo de cinco dimensiones: tiempo, jerarquía_CT (central termoeléctrica), unidad_T, tipo generación y fórmulas.

Los hechos almacenados para las unidades termoeléctricas tienen un grano mensual y corresponden a los índices de gestión manejados en Sisterno para cada unidad generadora y a los datos de consumo de combustible correspondientes manejados en costos de combustibles.

En el cuadro 1 se presenta un extracto de la especificación de la tabla de hechos de unidades termoeléctricas.

El cuadro de hechos de unidades termoeléctricas (cuadro 1) contiene del orden de 70 atributos, además de las llaves foráneas de sus tablas de dimensión.

Como dijimos, las unidades termoeléctricas pueden observarse desde cinco dimensiones (puntos de vista de la empresa). En el cuadro 2 se presenta la especificación de la dimensión tiempo y en el cuadro 3, la de la dimensión jerarquía_CT.

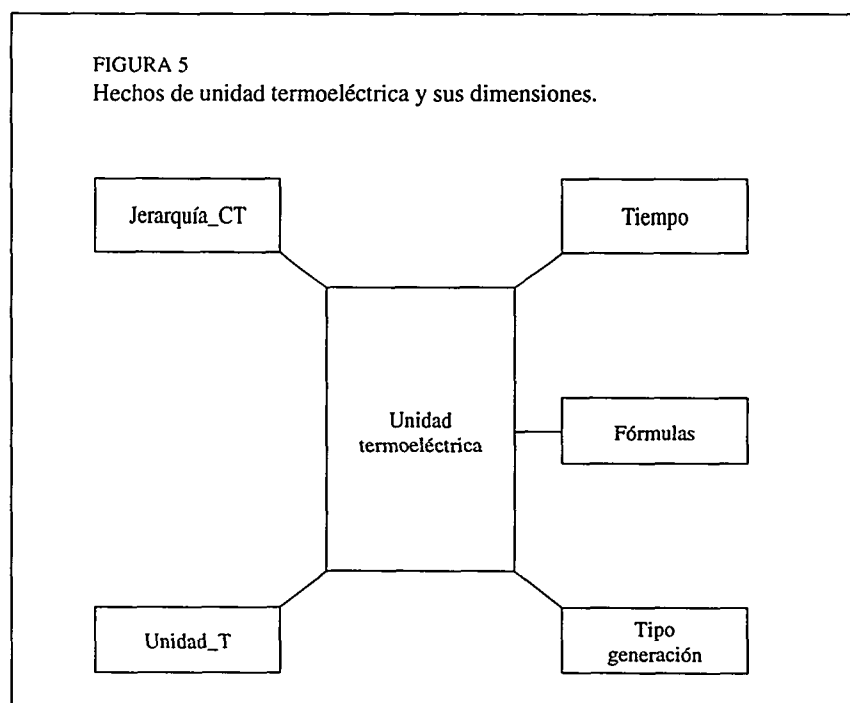
Por ejemplo, la dimensión tiempo nos permite ver los índices de gestión de las unidades en el tiempo y contestar preguntas del tipo: ¿Cuál fue el promedio de horas equivalentes fuera de servicio por causas ajenas en el primer semestre de 1996?

La dimensión jerarquía_CT nos permite ver los índices de gestión de las unidades generadoras dentro de la estructura jerárquica de la empresa y contestar preguntas como: ¿Cuál es el promedio de horas fuera de servicio por causas ajenas en el Área de Control Occidente?

Combinando las dimensiones tiempo y jerarquía_CT, podemos contestar otras preguntas: ¿Cuál fue el promedio de horas fuera de servicio por causas ajenas en el Área

FIGURA 5

Hechos de unidad termoeléctrica y sus dimensiones.



CUADRO 1

Extracto de la tabla de hechos de unidades termoeléctricas.

Tabla de hechos de unidades termoeléctricas				
Ref.	Atributo	Tipo	Descripción	Unidades
	id_tiempo	int	Referencia a dimensión tiempo	
	id_jerarquia	int	Referencia a dimensión jerarquía_CT	
	id-unidad	int	Referencia a dimensión unidad	
	id_tipo	int	Referencia a dimensión tipo generación	
	id-fórmulas	int	Referencia a dimensión fórmulas	
	validez_a	boolean	Validez de datos básicos: congelados/no congelados	
1	hefsfa	decimal (16)	Horas equivalentes fuera de servicio por falla	h
2	heds	decimal (16)	Horas equivalentes disponibles a sistema	h
3	hefsca	decimal (16)	Horas equivalentes fuera de servicio por causas ajenas	h
4	hefspm	decimal (16)	Horas equivalentes fuera de servicio por mantenimiento	h

CUADRO 2

Tabla de dimensión tiempo

Dimensión tiempo			
Atributo	Tipo	Descripción	Unidades
id_tiempo	int	Llave de la dimensión tiempo	
año	int	Año (entero de cuatro dígitos)	
t_mes	int	Mes (1 - 12)	
c_mes	char (10)	Mes (enero - diciembre)	
t_semestre	int	Semestre (1 - 2)	
c_semestre	char (8)	Semestre (primero, segundo)	
t_trimestre	int	Trimestre (1 - 4)	
c_trimestre	char (8)	Trimestre (primero - cuarto)	
t_calor	boolean	Temporada de calor/frío	
t_lluvia	boolean	Temporada de lluvia/estío	
calor	boolean	Presencia de ciclón	

CUADRO 3

Tabla de dimensión jerarquía_CT

Dimensión jerarquía_CT			
Atributo	Tipo	Descripción	Unidades
id_jerarquia	int	Llave de la dimensión jerarquía_CT	
c_central	char (3)	Clave de central (Cenace)	
c20_central	char (5)	Clave normalizada de central	
central	char (30)	Nombre oficial de central	
proyecto	char (30)	Nombre común de central	
region	char (20)	Nombre de región	
c20_region	char (5)	Clave normalizada de región	
gerencia	char (20)	Nombre de gerencia	
c20_gerencia	char (5)	Clave normalizada de gerencia	
n_area	small int	Núm. de área de control (Cenace)	
area	char (12)	Nombre de área de control (Cenace)	

de Control Oriental, en presencia de ciclón, entre 1987 y 1997?

Especificación, diseño, implementación y prueba de programas

El desarrollo de los programas para el almacén siguió el ciclo convencional de desarrollo de *software*, conocido como modelo de cascada, y se documentó con base en los estándares de especificación, diseño y documentación de usuario ANSI/IEEE Std 830-1984, ANSI/IEEE Std 1016-1987 e IEEE Std 1063-1987, respectivamente.

Sin embargo, la arquitectura del sistema se fundamentó en el modelo SMT, que clasifica las funciones de un sistema de almacén de datos en la fuente, el movimiento de datos (transporte desde la fuente hasta el almacén) y lo que es propiamente dicho el almacén.

Cabe señalar que la programación correspondiente al movimiento de datos fue responsabilidad de la CFE. La Comisión desarrolló un robot para automatizar el trabajo de tomar los datos extraídos de un sistema fuente, llevarlos a una computadora para un proceso de filtrado y transformación y, finalmente, llevar el resultado a la computadora del almacén de datos.

Asimismo, la explotación de los datos del almacén fue responsabilidad de la CFE, para lo cual usó herramientas disponibles en el mercado.

El IIE se concentró en desarrollar los programas para extraer datos, filtrarlos y transformarlos y, finalmente, insertarlos en el almacén.

A continuación se describen los productos de esta fase del proyecto.

Una especificación es un postulado de un conjunto de capacidades esenciales que debe

satisfacer un producto de *software*. En este proyecto se buscó hacer especificaciones con las siguientes características:

- Que no fueran ambiguas, o sea que cada requerimiento especificado sólo tuviera una interpretación; que fueran completas, esto es que contuvieran todos los requerimientos significativos; que fueran verificables (con algún proceso y con un costo/beneficio razonable una persona o algún mecanismo pudieran constatar que el *software* satisfacía sus requerimientos); que fueran consistentes, lo que significa que ningún requerimiento fuera conflictivo con otro u otros; que fueran modificables y tuvieran una organización coherente y sin redundancias; que fueran rastreables, o sea que el origen y los cambios de todos los requerimientos fueran claros y se pudieran seguir.

- Establecer los resultados que deben obtenerse y no los medios para adquirirlos.

- Funcionalidad, rendimiento, restricciones de diseño e interfaces externas.

En cuanto a los documentos de diseño, todos tienen la siguiente estructura:

- Se establece el propósito y el alcance del documento, así como las definiciones y los acrónimos empleados.

- Se hace una descripción de descomposición tanto de módulos como de datos, identificando con ello las entidades del diseño.

- Se documentan las dependencias entre las entidades de diseño y se hace una descripción detallada de las interfaces.

- Se hace el diseño detallado de cada módulo y de cada entidad de datos.

Los programas se escribieron en C con SQL inmerso; a la CFE se le entregó el código fuente del extractor de datos de los transformadores de

índices de gestión y de combustibles, y los insertores de índices de gestión y de combustibles.

La implementación y pruebas se hicieron de acuerdo con lo establecido en el contrato del proyecto: el IIE hizo la instalación y prueba del *software* y lo puso a disposición de la CFE durante dos semanas. Ese lapso sirvió para que la CFE constatará que los programas desarrollados satisfacían sus especificaciones y que el almacén de datos contenía las estructuras definidas en su modelo.

Los programas producto de este proyecto se acompañaron de sus respectivos manuales de usuario. Se proporcionaron cuatro manuales de usuario:

- Manual de usuario del extractor de datos para el almacén de datos corporativos de la CFE.

- Manual de usuario del insertor de datos de índices de gestión al almacén de datos corporativos de la CFE.

- Manual de usuario del insertor de datos de combustibles al almacén de datos corporativos de la CFE.

- Manual de usuario de programas de mantenimiento de las dimensiones del almacén de datos corporativos de la CFE.

Fin de la primera etapa del Sicorp

El trabajo realizado abarca una primera etapa de implementación en la Comisión Federal de Electricidad de un Sistema de Información Corporativa, herramienta para la toma de decisiones estratégicas en la empresa, cuyo corazón es el almacén de datos corporativos objeto de este proyecto.

Un aspecto importante en el desarrollo del proyecto fue la utilización de controles de versiones de las especificaciones y diseños. El orden impuesto por estos controles obligó a meditar cuidadosamente las

sugerencias iniciales y las modificaciones a éstas, teniendo un desarrollo con menos sorpresas.

Como consecuencia, actualmente se cuenta con un extractor de datos para bases de datos en Informix, programas de transformación e inserción de datos del proceso de generación y un robot o agente para el movimiento de datos entre computadoras en la red de la Comisión Federal de Electricidad.

Se observó la importancia vital de contar con información oportuna sobre los sistemas operacionales de la empresa, así como con la participación en el proyecto de los futuros involucrados en el desarrollo, operación y mantenimiento del almacén de datos.

Reconocimiento

En el proyecto que se documenta en este artículo participaron muy activamente los siguientes ingenieros del Departamento de Sistemas Corporativos de la Gerencia de Informática y Telecomunicaciones de la CFE: Francisco Cortez, Laura Herrera, Normann Maza, Óscar Miranda y Salvador de la Mora. Expresamos nuestro especial reconocimiento al ingeniero Salvador de la Mora por la promoción y el apoyo al proyecto durante su desarrollo.

Referencias

Brackett, Michael H., *The data warehouse challenge*, John Wiley & Sons, Inc., tomo C, 1996, 579 páginas.

Data Warehousing Institute, *Ten mistakes to avoid*.

Data Warehousing Tools Bulletin, "What is metadata", enero, 1996.

Date, C.J., *An introduction to database systems*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Filipinas, tomo C, 1981, 574 páginas.

Eckerson, Wayne, "Building the legacy

systems of tomorrow, part I", en *Open Information Systems*, noviembre-diciembre, 1995.

Eckerson, Wayne, "Building the legacy systems of tomorrow, part II", en *Open Information Systems*, noviembre-diciembre, 1995.

Hackathorn, Richard, "Data warehousing: energizes your enterprise", en *Datamation*, 1º de febrero, 1995.

Inmon H., W., "What is a data warehouse", en *Prism Solution, Inc.*, 1:1, 1995.

Hufford, Duane, "Data warehouse quality", en *Data Management Review*, febrero-marzo, 1996.

Kenan Systems Corporation, *An introduction to multidimensional database technology*, 1993-1995, pp. 1-29.

Kimball, Ralph, "Dangerous preconceptions", en *DBMS Magazine*, agosto, 1996.

Kimball, Ralph, "Dealing with dirty data", en *DBMS Magazine*, septiembre, 1996.

Kimball, Ralph, "Mastering data extraction", en *DBMS Magazine*, junio, 1996.

Kimball, Ralph, *The data warehouse toolkit*, John Wiley & Sons, Inc., tomo C, 1996, 388 páginas.

McElreath, Jack, "Data warehouses: an architectural perspective", en *Perspectives*, octubre, 1995.

Meredith, Mary Edie y Aslam Khader, "Divide and aggregate: designing large warehouses", en *Database Programming and Design*, junio, 1996.

Raden, Neil, "Modeling the data warehouse", en *Archer Decision Sciences, Inc.*, 29 de enero de 1996.

Shah, Arvind D. y Barney M. Milstein, *Data warehousing: practical tips for successful implementation*.

JORGE GONZÁLEZ SUSTAETA

Ingeniero electrotécnico por la Universidad de Grenoble, Francia y maestro en ciencias de la computación por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Morelos. Trabajó para ASEA AB, en



Suecia, en el desarrollo e integración de sistemas de control supervisorio para sistemas de potencia. Ingresó al IIE en 1980 al Departamento de Análisis de Redes, donde se desempeñó como jefe de proyecto y coordinador de especialidad de software para centros de control de energía. En 1990 trabajó para Tandem Computers, en Cupertino, California, como desarrollador de software. En 1991 reingresó al IIE en la Unidad de Sistemas Informáticos como coordinador de especialidad de ingeniería de software. Su interés se centra en la ingeniería de software, la interacción humano-computadora y las bases de datos. Ha dirigido diversos proyectos de investigación y desarrollo, así como tesis de licenciatura y maestría. Es autor de una treintena de artículos publicados en foros nacionales e internacionales.

GUILLERMO RODRÍGUEZ ORTIZ

Ingeniero mecánico electricista por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Monterrey, maestro en ciencias por el Instituto Tecnológico de Massachusetts y doctor en ciencias de la computación por la Universidad de California, Los Ángeles. Es investigador nacional y miembro fundador de la ANIAC; pertenece a la ACM y al IEEE. Es autor de un libro y de diversos artículos sobre el desarrollo de programas, bases de datos y sistemas expertos.



*Investigador de la Unidad de
Sistemas Informáticos.*

**NORMA ELENA JÁCOME
GRAJALES**

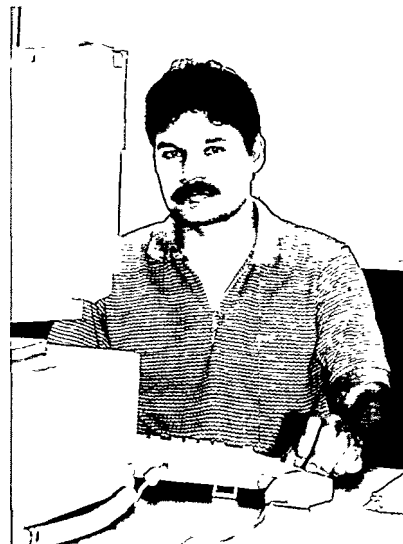
*Licenciada en informática por la
Universidad Veracruzana en 1993. En*



*ese mismo año ingresó al IIE y
actualmente es investigadora en la
Unidad de Sistemas Informáticos. Sus
áreas de especialidad son las bases de
datos y la ingeniería de software.*

MIGUEL PÉREZ RAMÍREZ

*Licenciado en computación por la
Universidad Autónoma de Puebla,
Escuela de Ciencias Físico-
Matemáticas (1992) y maestro en
ciencias computacionales por el
Centro Nacional de Investigación y*



*Desarrollo Tecnológico (Cenidet)
(1996). En 1992 ingresó al IIE,
actualmente es investigador de la
Unidad de Sistemas Informáticos. Se
especializa en ingeniería de software
y bases de datos.*

UNIDAD DE INFORMACIÓN TECNOLÓGICA

La Unidad de Información Tecnológica (UIT) busca promover y facilitar competitivamente el uso de información tecnológica y estratégica que impulse el desarrollo del sector eléctrico, así como el de sus proveedores y usuarios. Ofrece los siguientes servicios:

Búsqueda bibliográfica

- El cliente plantea el tema o problema técnico mediante carta, oficio, fax, teléfono, correo electrónico o personalmente.
- Se recopila, analiza y selecciona información tecnológica disponible en el mundo sobre el tema o problema planteado por el usuario a través de la consulta a bases de datos nacionales y extranjeras, o en forma manual recorriendo a obras de consulta.
- La información se procesa, se evalúa y se presenta en forma accesible. En algunos casos se pueden incluir los datos de fabricantes, especialistas e instituciones relacionadas.

Pregunta-respuesta

Se da respuesta a preguntas concretas planteadas por el usuario mediante información disponible en el país o en el extranjero sobre constantes físicas y químicas; propiedades de materiales; procedimientos de pruebas de equipo y materiales; datos de especialistas, empresas, instituciones. La pregunta puede hacerse mediante carta, oficio, fax, teléfono, correo electrónico o de manera personal. En algunos casos, la respuesta será por teléfono o fax (dato específico).

Recursos bibliográficos

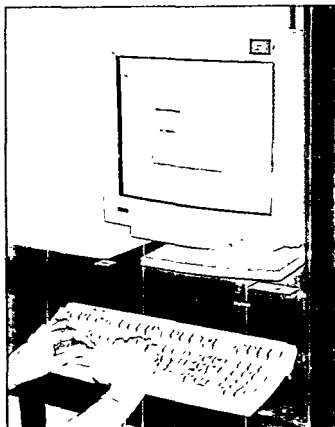
- Colección de libros, manuales, tesis, memorias de conferencias, directorios y enciclopedias con un total de 49 915 volúmenes.
- Colección de informes técnicos

con un total de 17 745 volúmenes.

- Colecciones de normas técnicas de interés para el sector: IEEE, ANSI, IEC, ASTM, IES.
- Colección de publicaciones periódicas con 395 títulos vigentes.
- Acceso a 11 bases de datos en disco óptico (CD-ROM).
- Acceso a más de 600 bases de datos nacionales e internacionales.
- Convenios de préstamo interbibliotecario con 112 centros de información tanto nacionales como internacionales.
- Acceso a la red Internet.

Mayor información

Unidad de Información Tecnológica, IIE
Teléfono (73) 18 24 60 o 18 38 11,
extensión 7132, fax (73) 18 24 61
Correos electrónicos: pmr@iie.org.mx,
hbs@iie.org.mx, pjfn@iie.org.mx



Sistemas integrales de información en tiempo real

Presentación

Hoy en día, la supervisión y el control de las centrales generadoras de energía eléctrica se apoya en buena medida en sistemas automatizados de adquisición y registro de datos.

Éstos permiten conocer oportunamente las condiciones de operación de las centrales y así prevenir fallas o localizar su origen con la rapidez necesaria, evitando un desgaste innecesario de equipos y el desperdicio de combustible; los operadores ya no dependen exclusivamente de los tableros de

Un sistema de información y registro de eventos es un instrumento que ante todo posibilita una evaluación objetiva de las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso y, en consecuencia, permite tomar decisiones más adecuadas y oportunas.

control en los que deben supervisar varios cientos de señales que sólo les permiten conocer las condiciones de operación en un momento dado y que no siempre proporcionan la información sobre la evolución de todas las variables involucradas.

Un sistema de información y registro de eventos es un instrumento que ante todo posibilita una evaluación objetiva de las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso y, en consecuencia, permite tomar decisiones más adecuadas y oportunas; facilita además la identificación de áreas susceptibles de mejorarse. Estas características redundan en un aumento global en la eficiencia y disponibilidad de las centrales generadoras, lo que a su vez reduce costos y mejora la calidad y la entrega de energía eléctrica.

Desde 1982 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha contribuido en forma significativa al diseño y la construcción de este tipo de sistemas en nuestro país dentro de una línea de investigación que se ha denominado Sistemas Integrales de Información en Tiempo Real (SIITR). Todos los proyectos se han realizado a la medida de las necesidades del cliente y cumpliendo con los estándares internacionales de calidad. En cada caso se han contemplado tanto el diseño, la



SADRE instalado en el simulador del Centro de Adiestramiento de Operadores de Ixtapantongo.



Campos electromagnéticos producidos por líneas de transmisión y la compatibilidad electromagnética en derechos de vía compartidos

Hugo Pérez Rebolledo, Moisés Zavala
Silva y Arturo Galván Diego

Resumen

Este artículo describe los diferentes tipos de interferencia electromagnética producida por líneas de potencia en derechos de vía. Se muestran los cálculos de los campos electromagnéticos obtenidos bajo una línea de potencia, con la intención de establecer los límites aceptables de interferencia. Estos cálculos se efectuaron para diferentes configuraciones de líneas de transmisión. Se obtuvo una buena correlación entre los campos magnéticos medidos y el calculado bajo una línea de transmisión. Para casos de corrientes de falla a tierra se determinaron los potenciales a tierra, a fin de obtener la distancia mínima en donde se pueden instalar las tuberías enterradas para operar de manera segura.

Introducción

El ambiente electromagnético creado por las líneas de transmisión de potencia es bastante complejo, ya

El uso de corredores comunes para líneas de transmisión de potencia y otros sistemas de transmisión huéspedes (cables de telecomunicaciones, tuberías de gas, vías de ferrocarril, etcétera) pueden tener problemas debido al acoplamiento electromagnético.

que intervienen diferentes factores como la disposición geométrica de los conductores y sus retornos por tierra. Los campos creados a la frecuencia nominal de 60 Hz son los predominantes en cuanto a magnitud y duración, aunque en la línea de potencia circulan otras corrientes con frecuencias armónicas que también producen campos electromagnéticos, por lo que los campos electromagnéticos creados por líneas de transmisión se clasifican como campos de extra baja frecuencia (Extremely Low Frequency, ELF).

Existen otros tipos de fuentes dentro de la misma línea de transmisión que producen campos electromagnéticos en otros anchos de banda, por ejemplo, corona en líneas de transmisión.

El uso de corredores comunes para líneas de transmisión de potencia y otros sistemas de transmisión huéspedes (cables de telecomunicaciones, tuberías de gas, vías de ferrocarril, etcétera) pueden tener problemas debido al acoplamiento electromagnético. En la figura 1 se muestra una línea aérea de potencia de doble circuito y

los sistemas a los que se les pueden inducir corrientes.

Campo magnético creado por las líneas de transmisión

Las corrientes que circulan en los conductores de fase son la fuente de los campos magnéticos creados alrededor de las líneas de transmisión. Estas corrientes tienen una variación estadística, considerando la magnitud y duración, que depende de la fluctuación de la carga durante el día. El retorno por tierra de las líneas de potencia y el sistema de transmisión

huésped forman un lazo con un área efectiva por la cual existe un flujo magnético neto variable en el tiempo. Esto resulta en un voltaje magnéticamente inducido en el lazo, a consecuencia de la ley de Faraday, donde el voltaje inducido depende de la densidad de flujo magnético, tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$fem = \frac{d\phi}{dt}$$

Dos de los factores importantes en la creación del campo magnético a nivel de tierra son la ubicación de

Dos de los factores importantes en la creación del campo magnético a nivel de tierra son la ubicación de las trayectorias de circulación de retorno por tierra y sus magnitudes de corriente.

las trayectorias de circulación de retorno por tierra y sus magnitudes de corriente.

Normalmente los derechos de vía se comparten con tuberías enterradas u otros objetos que pueden desviar las trayectorias de las corrientes de retorno, haciendo más complejo el análisis de los campos producidos.

Si se considera que la corriente en el conductor de fase (fuente de corriente) debe tener una corriente de retorno, esta corriente debe ser igual a las corrientes que circulan en la tierra, conductor neutro, hilo de guarda, líneas telefónicas, tuberías metálicas enterradas u otros objetos metálicos que comparten el mismo derecho de vía.

El voltaje inducido en sistemas que comparten un mismo derecho de vía con líneas de potencia es el resultado de la superposición del efecto de la corriente de cada conductor de línea. Como ejemplo tenemos en la figura 2(a) una línea

FIGURA 1

Sección transversal de una línea aérea de transmisión con doble circuito y los sistemas en los que puede inducir corrientes.

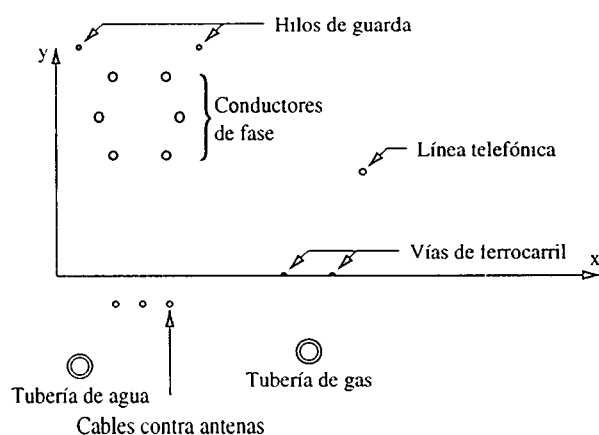


FIGURA 2(a)

Configuración horizontal de una línea de transmisión de 115 kV.

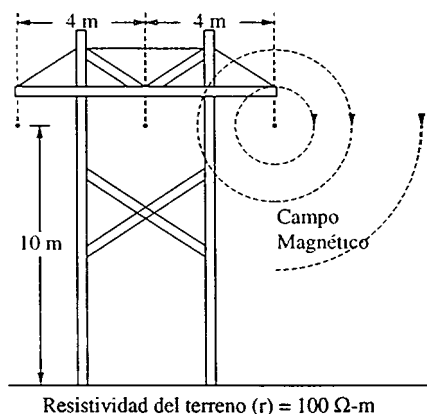
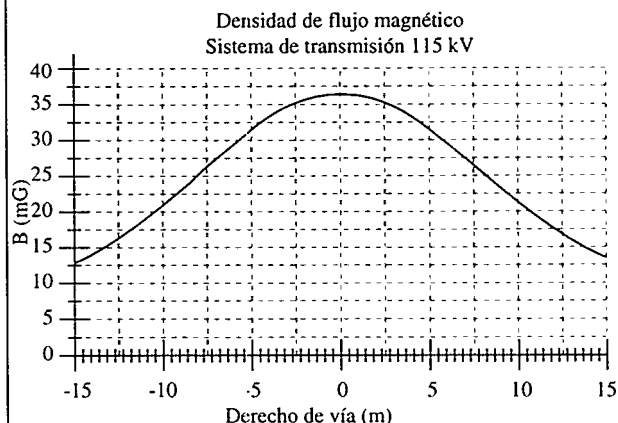


FIGURA 2(b)

Densidad de flujo magnético (B) generado por la línea de transmisión de 115 kV y calculado a una altura de 0.3 m.



trifásica con configuración horizontal de 115 kV, con una corriente balanceada de 300 A (magnitudes iguales y desfasadas 120 grados); en la figura 2(b) se muestra la distribución del campo magnético calculado a 0.3 m sobre el nivel de tierra.

Es claro que la corriente circulante por el retorno de tierra a una profundidad piel (aproximadamente 1 000 m), tiene un efecto mínimo en el campo magnético, a menos que la corriente sea considerablemente alta, entonces se tendría un campo magnético importante entre la línea y la tierra de retorno de corriente, por lo que se puede decir que la trayectoria de la corriente de retorno por tierra es trascendente en la magnitud del campo magnético.

Es necesario hacer notar que la proporción de la corriente que circula por la tierra es función de la trayectoria a lo largo de la línea y del número y la ubicación de los conductores enterrados. Estos conductores enterrados (tuberías u otro tipo de conductor) pueden concentrar el flujo de corriente cerca de la superficie de la tierra, incrementando el flujo magnético.

Cualquier sistema huésped que comparta el mismo corredor o derecho de vía con una línea de transmisión de potencia será excitado por el campo eléctrico longitudinal creado por las corrientes de fase.

Campo eléctrico longitudinal

Cualquier sistema huésped que comparta el mismo corredor o derecho de vía con una línea de transmisión de potencia será excitado por el campo eléctrico longitudinal creado por las corrientes de fase. En la figura 3 se muestra la geometría del problema.

La corriente que fluye en el sistema y el voltaje inducido puede variar con la posición longitudinal del sistema (figura 3).

En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos del cálculo del campo eléctrico longitudinal para diferentes configuraciones de una línea de 115 kV.

Acoplamiento de energía electromagnética

Las líneas de potencia pueden inducir corrientes en los hilos de guarda o de blindaje, conductores de

telecomunicaciones, cables usados como contra antenas de tierras, vías de tren y tuberías subterráneas que comparten el mismo derecho de vía con las líneas de potencia. La solución al problema principal se puede plantear atendiendo a dos objetivos:

- Seguridad del personal de mantenimiento en el sistema huésped (telecomunicaciones, ferrocarril y sistema de tuberías).
- Compatibilidad de operación de los sistemas eléctrico y electrónico de los sistemas huéspedes.

No existe una regla o norma para la regulación de límites de los efectos de inducción en este tipo de problemas, por lo que se tiene que acordar un criterio límite para cada caso. Las medidas de mitigación del problema se toman de acuerdo con los criterios de protección de personal, con los criterios de limitación de voltaje inducido magnéticamente en cualquier equipo y según la corriente disponible por inducción electrostática.

En líneas de alto voltaje normalmente se tienen corrientes mejor balanceadas en las tres fases, comparadas con las líneas de distribución o de bajo voltaje. Este

FIGURA 3

Geometría para el análisis de inducción por el campo eléctrico longitudinal $E(z)$ en una tubería enterrada.

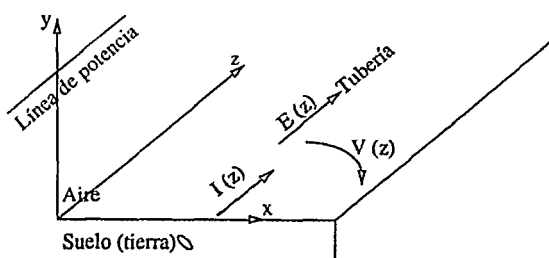
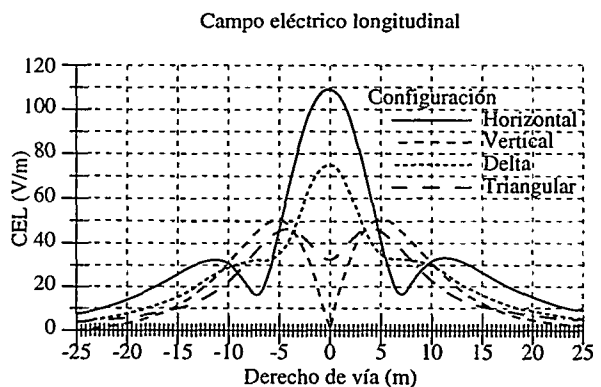


FIGURA 4

Distribución de la intensidad de campo eléctrico longitudinal (CEL) calculado a una distancia de 0.3 m sobre el nivel de suelo y obtenido para diferentes configuraciones de líneas de 115 kV.



desbalance puede producir flujos magnéticos altos en líneas de bajo voltaje comparados con los generados en líneas de alto voltaje.

El análisis del voltaje inducido, en cualquiera de los sistemas mencionados anteriormente y que comparten el mismo derecho de vía con líneas de potencia, depende de la corriente que circule en los conductores.

El voltaje inducido en estos sistemas puede existir en una longitud considerable del elemento receptor, por lo que se hace necesario el uso de procedimientos para la reducción de estos voltajes a niveles aceptables. Aun en sistemas donde el voltaje inducido es despreciable, es necesario analizar tanto al sistema receptor como a la línea de potencia en caso de que se pretendan realizar modificaciones.

Tipos de interferencia en el medio ambiente electromagnético

Los campos electromagnéticos producidos por líneas de potencia en derechos de vía compartidos se evaluaron con la finalidad de obtener límites de interferencia. Se analizaron varias causas de interferencia para el caso de una tubería enterrada, éstas comprenden las siguientes áreas:

- Corrientes en los conductores de fase de la misma línea de transmisión.
- Corrientes de falla en la línea de transmisión.
- Inyección de corrientes en el tubo que pueden resultar de fallas a tierra de las líneas de transmisión cercanas a la tubería.

Corrientes en las líneas de transmisión

Las líneas de transmisión producen un campo magnético de baja frecuencia asociado con las

Se realizaron cálculos de la densidad de flujo magnético en el ambiente del derecho de vía compartido con la finalidad de obtener los límites máximos a los que se ven sometidos los sistemas huéspedes (como pueden ser las tuberías enterradas), y compararlos con las mediciones obtenidas en campo.

corrientes en los conductores. Si se conocen las corrientes en los conductores es posible calcular el campo magnético usando la ley de Biot-Savart, la cual establece que el campo magnético en un punto p debido a una diferencia de corriente $I dl$, es directamente proporcional al producto de la corriente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r entre el punto y la corriente. Esta ley se puede expresar matemáticamente como:

$$H = \int \frac{I dl \times a_r}{4 \pi r^2}$$

Se realizaron cálculos de la densidad de flujo magnético en el ambiente del derecho de vía

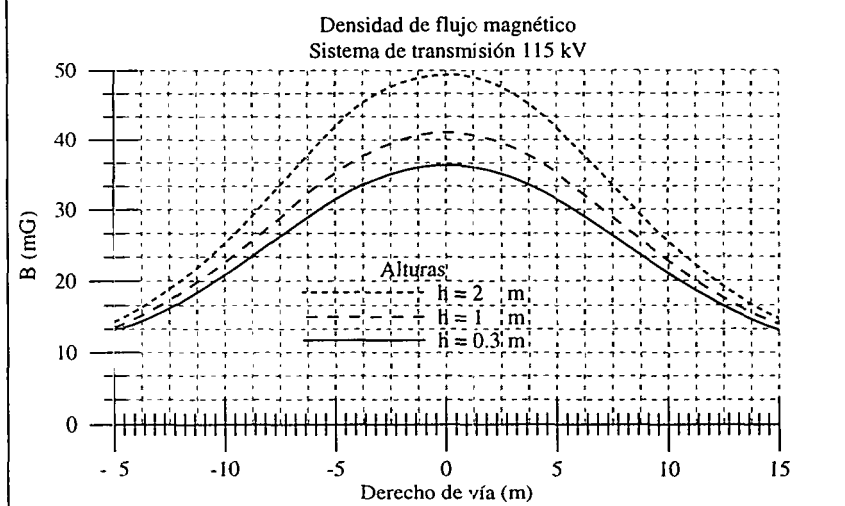
compartido con la finalidad de obtener los límites máximos a los que se ven sometidos los sistemas huéspedes (como pueden ser las tuberías enterradas), y así compararlos con las mediciones obtenidas en campo. El cálculo del campo magnético se obtiene por cada fase de la línea involucrada; en nuestro caso se simuló una corriente igual para cada una de las fases, suponiendo las corrientes de la línea balanceadas. La contribución de cada corriente de fase se suma al campo magnético total por superposición.

En el cálculo de la densidad de flujo magnético se involucran las características magnéticas del medio, en este caso del aire y de la tierra.

Las líneas de fuerza magnética varían con la distancia a la fuente (la línea de transmisión), por lo que la magnitud del flujo magnético variará, aumentando con la altura sobre el nivel de tierra. En la figura 5 se muestran los resultados al calcular la densidad de flujo magnético para la misma línea de 115 kV (figura 2a) a tres diferentes alturas sobre el nivel

FIGURA 5

Distribución de la magnitud de la densidad de flujo magnético (B) producido por una línea de 115 kV con corrientes de fase de 300 A, para una resistividad de terreno de 100 Ω -m y a diferentes alturas sobre el nivel del suelo: 0.3 m, 1 m y 2 m.



de tierra: 0.3 m, 1 m y 2 m.

Otra causa de campo magnético en el derecho de vía, que podría dar valores superiores a los discutidos anteriormente, es el desfaseamiento en el voltaje de la línea de potencia, mismo que normalmente se tiene en líneas de distribución de energía.

Los resultados de ambas simulaciones muestran valores muy bajos de campos magnéticos generados por las líneas de potencia y estos valores se confirman con las mediciones realizadas en campo. Es posible medir el campo magnético producido por las líneas con un medidor de densidad de flujo magnético. Se realizaron mediciones de la densidad de flujo magnético producido por las líneas de transmisión a lo largo de un derecho de vía compartido por la línea de energía eléctrica de 115 kV (Comisión Federal de Electricidad, CFE) y un gasoducto de Petróleos Mexicanos (Pemex) [IIE, septiembre de 1995].

Las mediciones de campo magnético se tomaron en diferentes áreas localizadas a lo largo del corredor común en intervalos de 1.5 m, siguiendo una trayectoria perpendicular y cruzando la

Los límites obtenidos hasta ahora no se han considerado en el diseño de los derechos de vía compartidos, pero deben tomarse en cuenta para la operación adecuada de sistemas huéspedes y para la protección del personal de mantenimiento.

trayectoria del gasoducto y de la línea de energía eléctrica. Se obtuvieron a una altura sobre el nivel del suelo de 0.3 m con el fin de evaluar los niveles de exposición a que se encuentra sometido el gasoducto; se iniciaron aproximadamente a una distancia de 7 metros de la fase externa de la línea de energía eléctrica y finalizaron en la fase externa de la línea cruzando el gasoducto.

El campo magnético puede calcularse o medirse en campo. Las mediciones de los campos magnéticos a través del derecho de vía se realizaron con la finalidad de obtener los niveles máximos a los que normalmente se encuentra el ambiente electromagnético.

Las mediciones mostraron bajos niveles de densidad de flujo magnético a través del derecho de vía.

En general, los valores de las

amplitudes medidas son bastante similares a los valores calculados.

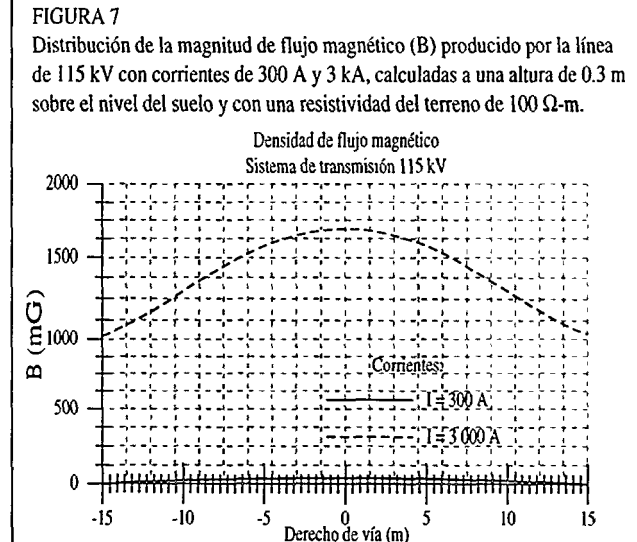
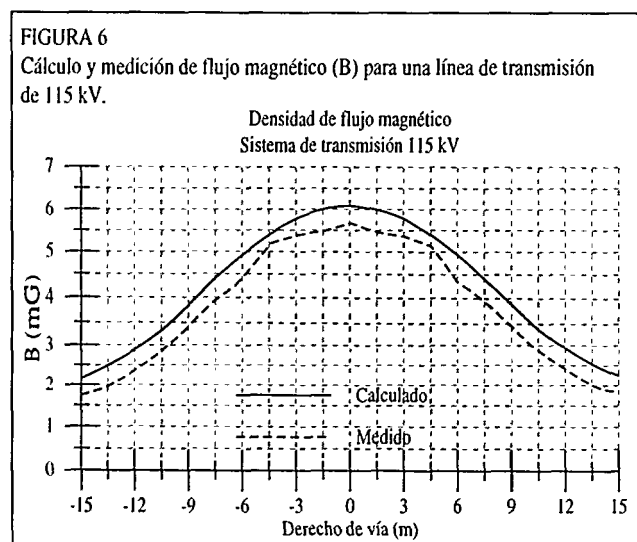
Como se aprecia en la figura 6, estas mediciones se pueden considerar como mediciones con cargas promedio en las líneas de transmisión.

Corrientes de falla en las líneas

En el caso de corrientes de falla en la línea, es posible producir campos magnéticos superiores al que resultan de las corrientes nominales de carga.

Para el caso de circulación de corrientes en las fases o conductores de la línea de potencia, se simuló las corrientes de falla para calcular los campos magnéticos en el derecho de vía.

En la figura 7 se muestran los resultados al simular una corriente de falla de 3 kA en las tres fases de la línea de 115 kV, con 100 Ω -m de resistividad y calculado a una altura del nivel de tierra de 0.3 m. También se muestran los máximos valores de densidad de flujo magnético obtenidos con la corriente nominal de 300 A en las tres fases de la línea. Como se aprecia, la magnitud de la densidad de flujo magnético se eleva en proporción a la corriente de falla.



Inyección de corrientes a tierra

Uno de los modos de acoplamiento en derechos de vía compartidos se puede presentar por conducción a través del terreno. Existe la posibilidad de que las corrientes de falla a tierra ocurran en torres cercanas a tuberías enterradas, con la consecuencia de generar potenciales cerca de la superficie del tubo. Estos potenciales son capaces de romper el dieléctrico de la cubierta aislante del tubo.

Consideremos un medio infinito y homogéneo con una conductividad, permitividad y permeabilidad. La fuente de corriente se considera monopolar situada en el eje cartesiano. El punto fuente inyecta una corriente I al medio. El campo eléctrico a cierta distancia y la densidad de corriente están relacionadas por:

$$J = \sigma E + \epsilon \frac{\delta E}{\delta t} = (\sigma + j\omega\epsilon) E$$

donde se considera la conductividad compleja $(\sigma + j\omega\epsilon)$. Por la ley de Gauss se tiene que:

$$I = 4\pi Rj u = 4\pi(X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} J u$$

donde R es la distancia al punto de referencia y u es el vector unidad en

la misma dirección. Asumiendo condiciones de baja frecuencia (cuasiestáticas), donde las distancias deben ser mucho menores que la longitud de onda en el medio, el vector de campo eléctrico puede derivarse de un potencial escalar V como sigue:

$$E = -\Delta V$$

De esta manera se satisface la ecuación de Laplace:

$$\Delta^2 V = 0$$

donde ∇ es el operador laplaciano. Con la solución clásica de esta ecuación podemos calcular los potenciales en un medio con las condiciones referidas anteriormente; las condiciones límites no se incluyen, donde un medio homogéneo conductivo a mitad de espacio tendría otra solución.

El análisis de los potenciales de tierra debido a inyección de corrientes en la tierra, considera sólo corrientes de cortocircuito que podrían presentarse en torres cercanas a la tuberías. Los potenciales se producirían en la tierra

tomando la distancia desde el punto de inyección de corriente, considerada como un punto fuente. Se puede tomar un valor típico de entre 2 a 3 kV de rompimiento del dieléctrico de la cubierta del tubo con fines de evaluación de daño por este tipo de corrientes.

Se evaluó el efecto de la inyección de corriente de cortocircuito en la tierra, con un valor de 1 000 A, considerando diferentes conductividades del terreno. En la figura 9 se muestra la gráfica con las curvas de los potenciales calculados a diferentes valores de conductividad del terreno y con una corriente de 1000 A inyectada a tierra. Se tomaron dos diferentes valores de conductividad del terreno: 0.01 Siemens/metro y 0.002 S/m (terrenos típicos), estos valores corresponden a 100 y 500 Ω -m de resistividad del terreno. El análisis consideró una profundidad del terreno de 1 m y 100 m de distancia máxima del punto de inyección de corriente. Tomando el caso extremo de un terreno con una conductividad de 0.002 S/m, los valores del potencial cercanos al punto de inyección alcanzan valores altos, llegando a disminuir hasta los

FIGURA 8

Fuente de corriente puntual en un medio infinito y homogéneo.

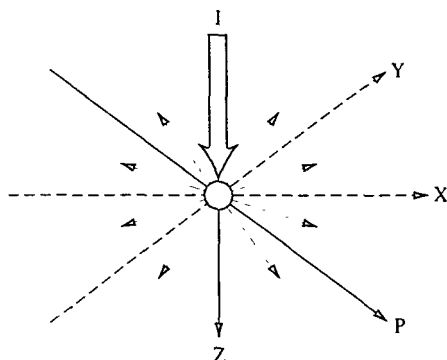
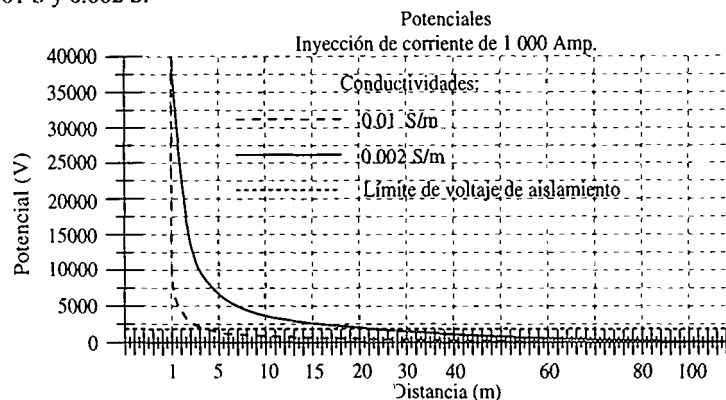


FIGURA 9

Curvas de potenciales a tierra calculados con la inyección de corriente a tierra de 1 kA, calculada a una profundidad de 1 m y a una distancia de 100 m desde el punto de inyección de corriente, y a diferentes conductividades de terreno: 0.01 S y 0.002 S.



2.5 kV cerca de la distancia de 20 m (figura 9).

Conclusiones

En este artículo se dan los límites de interferencia electromagnética creados en diferentes situaciones de operación de las líneas de potencia.

Los límites obtenidos hasta ahora no se han considerado en el diseño de los derechos de vía compartidos, pero deben tomarse en cuenta para la operación adecuada de sistemas huéspedes y para la protección del personal de mantenimiento.

Uno de los factores importantes que influyen en la magnitud del campo magnético creado por las líneas de potencia es la presencia de tuberías metálicas u otros sistemas conductores en el derecho de vía. Estos conductores concentran en conjunto el flujo de corriente de retorno cerca de la superficie, lo cual incrementa el flujo magnético.

Las medidas de mitigación del problema en derechos de vía compartidos deben realizarse para proteger al personal y estar de acuerdo con los criterios de limitación del voltaje inducido magnéticamente en cualquier equipo y con la corriente de cortocircuito.

El análisis de potenciales a tierra debido a inyección de corrientes de falla a tierra muestra los potenciales a los que se ve sometido el sistema huésped, en este caso una tubería enterrada. Los potenciales a tierra dependen de las características del terreno y del diseño de los sistemas de tierra.

Referencias

C.R. Paul y S.A. Nasar, *Introduction to electromagnetic fields*, McGraw-Hill, Inc., 1982.

Diagnóstico sobre la presencia de campos magnéticos permanentes en el gasoducto de 30 pulgadas de diámetro sitio grande-entronque, septiembre de 1995, IIE.

Frazier, M., H. Robertson, J. Dunlap, P. Thomas y T. Morgan, "Transmission line, railroad and pipeline common corridor study", *IEEE, Trans. Power Delivery*, vol. PWRD-1, núm. 3, julio, 1986.

Kraus, J.D. y K.R. Carver, *Electromagnetics*, segunda edición, McGraw-Hill, Inc., 1973.

Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements, a report of the IEEE Magnetic Fields Task Force of the AC Fields Working Group of the Corona and Fields Effects Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee, Members: Olsen, R.G., D. Deno y R.S. Baishiki, *IEEE, Transaction on Power Delivery*, vol. 3, núm. 4, octubre, 1988.

Master, M.J. y M.A. Uman, "Lightning induced voltages on power lines: theory", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, núm. 9, septiembre, 1984.

"Power line fault current coupling to nearby natural gas pipelines", *Analytical Methods and Graphical Techniques*, vol. 1, EPRI EL-5472, agosto, 1988.

Power lines-induced AC potential on natural gas pipelines for complex rights of way configurations, EPRI, final report EL-3106, mayo de 1983 a abril de 1987.

HUGO PÉREZ REBOLLEDO

Ingeniero mecánico electricista egresado de la Unidad Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana. Obtuvo los grados de



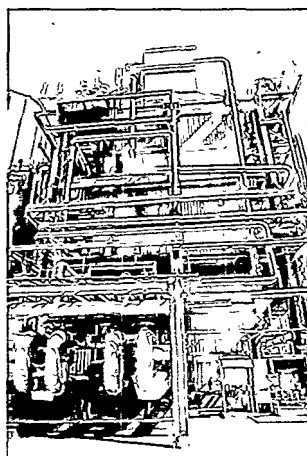
maestría y doctorado en la Universidad de Uppsala, Suecia, en las áreas de alto voltaje y compatibilidad electromagnética. En 1981 se integró al IIE, en la hoy Unidad de Transmisión y Distribución, desarrollando proyectos en las áreas de protección de líneas contra descargas atmosféricas y control de armónicas en sistemas de distribución; actualmente se desarrolla en las áreas de compatibilidad electromagnética y calidad de la energía.

MOISÉS ZAVALA SILVA

Estudió la licenciatura y la maestría en el Instituto Tecnológico de la Laguna, sección de graduados. Fue becario de maestría en la Unidad de Transmisión y Distribución.

ARTURO GALVÁN DIEGO

Ingeniero electricista egresado del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Obtuvo el grado de maestría en ingeniería eléctrica en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), actualmente estudia el doctorado en la Universidad de Uppsala, Suecia, en el área de compatibilidad electromagnética.



Ahorro en el consumo de auxiliares por bombas de agua de circulación optimando el régimen térmico

Roni Orozco Martínez

Resumen

Se propone una metodología que debe seguirse en cualquier central termoeléctrica para determinar el valor de la carga en la cual una unidad requiere de la segunda bomba de agua de circulación sin afectar el régimen térmico y evitándose un excesivo consumo de auxiliares en cargas parciales. Al aplicar este método la central tendría un ahorro de energía equivalente al consumo de auxiliares durante una hora cuando la unidad está generando su máxima carga.

Introducción

Una central termoeléctrica está basada en el funcionamiento de los siguientes tres equipos principales: el generador de vapor, la turbina y el generador eléctrico. En el caso de la turbina, su desempeño depende de las condiciones de entrada del vapor principal a la turbina de alta presión y del vapor que escapa en el último paso de la turbina de baja presión, de tal manera que su eficiencia aumenta al disminuir la presión absoluta de escape y al aumentar la presión y la temperatura del vapor principal. La presión absoluta de escape (o vacío)

Debido a la creciente necesidad social de adoptar medidas de ahorro de energía en las centrales térmicas de la Comisión Federal de Electricidad, el personal de operación involucrado debe buscar alternativas adecuadas que eleven la eficiencia térmica del ciclo y que disminuyan el consumo de energía por los equipos auxiliares propios.

depende del funcionamiento del condensador principal al condensar el vapor que abandona la turbina y su rendimiento es afectado por los siguientes factores: el ensuciamiento interno o externo de la superficie de intercambio de calor, las entradas de aire, el flujo y la temperatura de entrada del agua de circulación que se utiliza como refrigerante. Si la temperatura de entrada del agua de circulación aumenta, se incrementa la temperatura de saturación en el condensador principal, haciendo que suba la presión absoluta (o que disminuya el vacío) en el escape de la turbina de baja presión.

Las unidades de generación termoeléctrica normalmente requieren de la operación de dos bombas de agua de circulación para el funcionamiento del condensador principal en cualquier carga, pero dependiendo de la carga y de la temperatura de entrada de agua de circulación, una o las dos bombas se pueden requerir para mejorar las condiciones de operación de la unidad, evitando un consumo excesivo de auxiliares debido a la operación innecesaria de la segunda bomba de agua de circulación.

El criterio para definir si se requiere o no de la segunda bomba se describe mediante el siguiente

ejemplo: si a una carga determinada se pone fuera de servicio la segunda bomba de agua de circulación y esto representa un aumento en el régimen térmico de 18.73 kcal/kWh debido a la disminución del vacío en el condensador principal, pero a cambio se logra bajar el consumo de auxiliares en una cantidad equivalente a 33.52 kcal/kWh, entonces se tiene una ganancia neta de 14.79 kcal/kWh.

Para desarrollar esta metodología se utilizó como herramienta de trabajo el simulador II del Centro de Adiestramiento de Operadores Ixtapantongo (CAOI), que simula el proceso de generación termoeléctrica de la unidad 2 de 350 MW de la central termoeléctrica Manzanillo II.

Requerimientos

Para determinar en qué valor de carga se requiere poner en servicio (o fuera de servicio) la segunda bomba de agua de circulación se necesita la siguiente información:

a) Curva de desviación al régimen térmico por vacío en el condensador principal a diferentes cargas. Esta desviación se calcula al capturar en el SCORT los datos de las variables correspondientes a cualquier carga.

b) Formulario básico. Se utilizarán las siguientes fórmulas:

1. Fórmula para calcular el régimen térmico declarado neto en cualquier carga.

$$X = \frac{(Fac) (Pcs)}{Pns} \quad [1]$$

donde:

X = régimen térmico declarado neto en kcal/kWh.

Fac = flujo de combustible (aceite o carbón) en kg/h.

Pcs = poder calorífico superior del combustible en kcal/kg.

Pns = potencia neta de salida del generador eléctrico en kWh. Potencia de salida - consumo de auxiliares propios.

2. Fórmula para calcular el consumo térmico unitario neto en cualquier carga.

$$V = \frac{(E) (X)}{100} \quad [2]$$

donde:

V = consumo térmico unitario neto en kcal/kWh.

E = eficiencia del generador de vapor en %.

X = régimen térmico declarado neto en kcal/kWh.

3. Fórmula para calcular el consumo térmico unitario equivalente a la potencia consumida por la bomba de agua de circulación adicional en cualquier carga.

Se propone una metodología que debe seguirse en cualquier central termoeléctrica para determinar el valor de la carga en la cual una unidad requiere de la segunda bomba de agua de circulación sin afectar el régimen térmico y evitándose un excesivo consumo de auxiliares en cargas parciales.

$$Y = \frac{(W) (V)}{Pns} \quad [3]$$

donde:

Y = consumo térmico unitario equivalente a la potencia consumida por la bomba de agua de circulación adicional en kcal/kWh.

W = potencia consumida por la bomba de agua de circulación adicional en kWh. El valor utilizado para este caso es de 1 236 kWh.

V = consumo térmico unitario neto en kcal/kWh.

Pns = potencia neta de salida del generador eléctrico en kWh. Potencia de salida - consumo de auxiliares propios.

4. Fórmula para calcular el incremento total al régimen térmico debido al vacío teniendo en servicio una sola bomba de agua de circulación.

$$Z = (U) - (D) \quad [4]$$

donde:

Z = incremento total al régimen térmico por vacío en kcal/kWh.

U = desviación al régimen térmico por vacío teniendo en servicio una sola bomba de agua de circulación en kcal/kWh.

D = desviación al régimen térmico por vacío teniendo en servicio ambas bombas de agua de circulación en kcal/kWh.

Los valores de U y D deben obtenerse para la misma carga y temperatura de entrada de agua de circulación.

Los datos en la fórmula 4 deben restarse algebraicamente, es decir, respetando el signo del resultado que arroje la base de datos SCORT. Ejemplos:

Caso 1

Datos:

$U = + 20.38$ kcal/kWh y $D = -20.23$ kcal/kWh

Fórmula: $Z = U - D$

Sustituyendo:

$Z = (+20.38) - (-20.23) = 20.38 + 20.23$

Resultado:

$$Z = +40.61 \text{ kcal/kWh}$$

Caso 2

Datos:

$$U = -11.22 \text{ kcal/kWh y } D = -24.11 \text{ kcal/kWh}$$

$$\text{Fórmula: } Z = U - D$$

Sustituyendo:

$$Z = (-11.22) - (-24.11) = -11.22 + 24.11$$

Resultado:

$$Z = +12.89 \text{ kcal/kWh}$$

c) Graficación de resultados. Graficando los valores de Y y Z en función de la carga de la unidad (figura 1), se observará que existe un valor de carga en la cual ambos parámetros se igualan (punto de equilibrio), indicando que en esa carga se debe poner en servicio (unidad subiendo carga) o fuera de servicio (unidad bajando

Al aplicar este método la central tendría un ahorro de energía equivalente al consumo de auxiliares durante una hora cuando la unidad está generando su máxima carga.

carga) la segunda bomba de agua de circulación sin afectar el régimen térmico neto de la unidad, pero consiguiéndose un ahorro en el consumo de auxiliares.

Para que el operador y el jefe de turno tengan una referencia más rápida se debe conocer el punto de equilibrio para diferentes temperaturas de entrada del agua de circulación, tal como se muestra en la figura 2. Por ejemplo, si la temperatura del agua de circulación es de 30°C , la segunda bomba de agua de circulación se pondrá en servicio (o fuera de servicio) cuando la carga de la unidad sea de 89 MW.

FIGURA 1
Representación del punto de equilibrio a una temperatura de agua de circulación de 24°C en el simulador II de 350 MW.

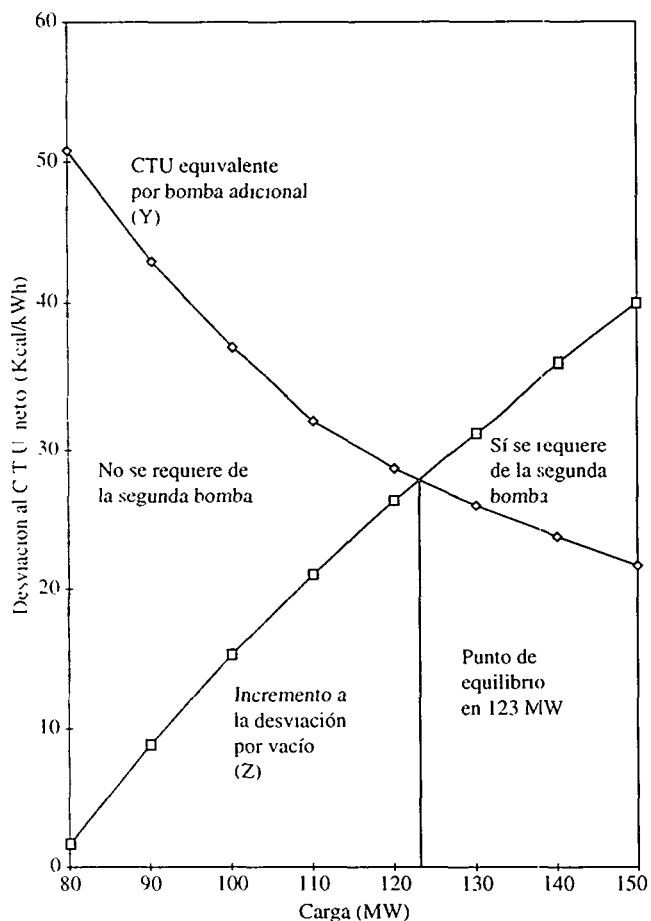
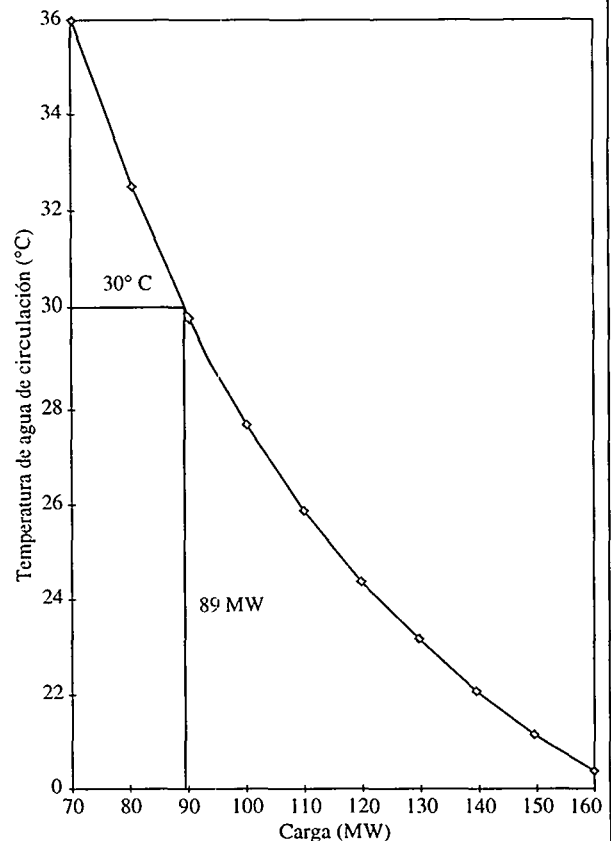


FIGURA 2
Comportamiento del punto de equilibrio a diferentes temperaturas del agua de circulación del Simulador II de 350 MW.



Procedimiento para realizar las pruebas

Antes de aplicar este procedimiento se requiere leer y comprender el apartado de Recomendaciones para una mejor coordinación de las actividades involucradas.

1. Medir la potencia consumida por ambas bombas de circulación.

2. Teniendo estable la temperatura del agua de circulación y en servicio ambas bombas de circulación, estabilizar la unidad en el valor de carga correspondiente.

3. Con la unidad estable, tomar las lecturas para el cálculo del régimen térmico y la eficiencia del generador de vapor.

4. Poner fuera de servicio la segunda bomba de circulación y, en caso de requerirse, realizar la maniobra para inundar la caja de agua correspondiente.

5. Estabilizar la carga de la unidad en el mismo valor que en el paso 2 y tomar las mismas lecturas que en el paso 3.

6. Calcular el consumo térmico unitario equivalente a la potencia consumida por la bomba de circulación adicional (Y) utilizando la fórmula 3 con los datos obtenidos en los pasos 1 y 3.

7. Calcular el incremento al régimen térmico debido a la pérdida de vacío (Z) utilizando la fórmula 4 con los datos obtenidos en los pasos 3 y 5.

8. Comparar los datos Y y Z considerando los criterios siguientes:

a) Si Y es mayor que Z , realizar la siguiente prueba a una carga mayor, procurando un incremento de 10 a 15MW.

b) Si Y es menor que Z , realizar la siguiente prueba a una carga menor, procurando una disminución de 10 a 15MW.

Se recomienda utilizar este procedimiento cuando la unidad se encuentre en proceso de aumento o disminución de carga debido a un arranque o paro.

En ambos casos se recomienda utilizar la misma condición estable obtenida en el paso 5 para evitarle varios arranques consecutivos a la bomba de circulación. Después de estabilizar la unidad y de tomar las lecturas correspondientes, proceder a poner en servicio la segunda bomba de circulación, estabilizar la unidad en la misma carga y tomar las lecturas nuevamente.

9. Una vez concluida la prueba derivada del paso anterior, elaborar la gráfica similar a la figura 1, verificando lo siguiente:

a) Ubicar y unir los dos puntos de prueba, tanto para los valores de Y como para los de Z .

b) Si ambas curvas se intersectan, se ha encontrado la carga correspondiente al punto de equilibrio.

c) Si no hay punto de intersección, aplicar nuevamente los criterios del paso 8 hasta encontrar el punto de equilibrio correspondiente.

10. Repetir los pasos del 2 al 9 para encontrar la carga correspondiente al punto de equilibrio a diferentes temperaturas de agua de circulación.

11. Cuando se tengan suficientes puntos de prueba, elaborar la gráfica similar a la de la figura 2.

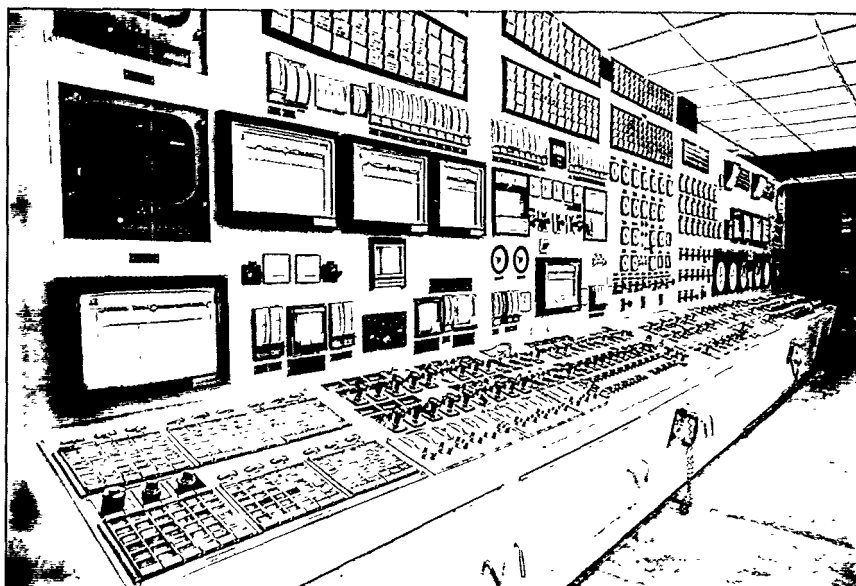
Recomendaciones

Se recomienda utilizar este procedimiento cuando la unidad se encuentre en proceso de aumento o disminución de carga debido a un arranque o paro. Con base en lo anterior, se sugiere que se realicen las siguientes tres pruebas dependiendo de la temperatura del agua de circulación:

a) Si la temperatura del agua de circulación es la más baja, por ejemplo 20°C, conviene realizar la prueba a una carga próxima a 45%.

b) Si la temperatura del agua de circulación es la más alta, por ejemplo 36°C, se recomienda realizar la prueba a una carga próxima a 20%.

c) Si la temperatura del agua de circulación es el valor promedio, por ejemplo 28°C, es conveniente realizar



El método que se propone en este artículo permite ahorrar la energía que se consume al operar innecesariamente una segunda bomba de agua de circulación en el rango de carga conveniente.

la prueba a una carga próxima a 30%.

Cabe mencionar que estos tres criterios pueden ajustarse dependiendo del comportamiento del condensador principal propio de cada unidad.

Con los tres puntos de equilibrio anteriores se elabora una gráfica similar a la figura 2, la cual podría utilizarse como una buena referencia para evitar demasiadas pruebas.

Se debe tomar en cuenta que los motores no pueden arrancarse más de dos veces en un periodo de 60 minutos. Para una mejor referencia consultar las especificaciones del fabricante.

Los datos obtenidos para la gráfica de temperatura de agua de circulación contra carga (similar a la figura 2) deben actualizarse después de cada mantenimiento que se realice al sistema de agua de circulación, con el fin de absorber las variaciones debidas a la limpieza del haz de tubos, cantidad de tubos taponados por rotura, desgaste de impulsores de las bombas de agua de circulación, variación del flujo de agua debido a restricciones en el sistema, etcétera.

Esta propuesta puede aplicarse en aquellas unidades cuyas bombas de agua de circulación descarguen a la vez en ambas cajas de agua (cajas de agua interconectadas en el cabezal de entrada) y también en las unidades que utilizan el sistema de retrolavado/choque térmico (cajas de agua interconectadas en el cabezal de salida). En estos casos se asegura la circulación de agua por ambas cajas. Las unidades que no cumplan con esta condición tendrán que realizar las pruebas correspondientes para verificar la factibilidad de este método.

Los resultados obtenidos con cualquiera de las bombas de agua de circulación pueden aplicarse a ambas bombas.

Conclusiones

Debido a la creciente necesidad social de adoptar medidas de ahorro de energía en las centrales térmicas de la

Comisión Federal de Electricidad, el personal de operación involucrado debe buscar alternativas adecuadas que eleven la eficiencia térmica del ciclo y que disminuyan el consumo de energía por los equipos auxiliares propios.

El método que se propone en este artículo permite ahorrar la energía que se consume al operar innecesariamente una segunda bomba de agua de circulación en el rango de carga conveniente. Para dar una idea del ahorro que podría conseguirse basta considerar que si se opera con una sola bomba de agua de circulación durante las 14 horas que se abarcan desde que se enciende el generador de vapor hasta tomar una carga del 25%, el ahorro de energía equivale al consumo de auxiliares durante una hora de la propia unidad generando su máxima carga. Los datos que se consideran están referidos a la unidad de 350 MW simulada en el Centro de Adiestramiento de Operadores de Ixtapantongo.

Referencias

C. Julovich, George, "Optimizing circulating water pump operation", *Power Engineering*, marzo de 1986, pág. 29.

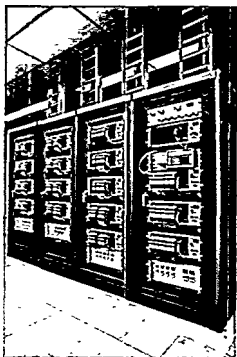
Instituto de Investigaciones Eléctricas, *Optimización en la operación de la bomba de circulación de agua del condensador*, referencia V-0816.

RONI OROZCO MARTÍNEZ



Ingeniero industrial en química por el Instituto Tecnológico de Oaxaca (1989), ingresó a la CFE en 1990 desempeñándose como superintendente de turno en la central termoeléctrica Altamira. Sus áreas de especialidad son la operación de centrales termoeléctricas y la capacitación y adiestramiento con simuladores. Actualmente es superintendente de turno II e instructor del Centro de Adiestramiento de Operadores de Ixtapantongo.

dos décadas de
investigación

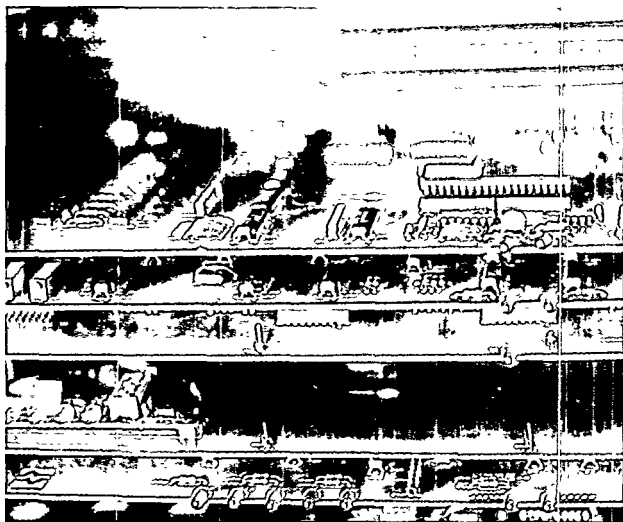


Control de quemadores de la
unidad 4 de la central
termoeléctrica de
Valle de México.

Sistemas integrales de control

Presentación

Casi las dos terceras partes de la generación eléctrica en México se obtienen a partir de hidrocarburos, de ahí que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) haya puesto especial empeño en modernizar la operación de las centrales termoeléctricas de combustibles fósiles. En el logro de este objetivo los sistemas de control desempeñan un papel fundamental: de ellos depende en buena parte la confiabilidad y la eficiencia en el proceso de generación de energía



Línea SAC (Sistema de Adquisición y Control), base para el desarrollo de varios sistemas de control.

La confiabilidad de los sistemas digitales de control es muy alta; se ha encontrado que el tiempo medio entre fallas de los sistemas digitales es 10 veces superior al de otros sistemas y se estima que su disponibilidad es superior a 99%.

eléctrica, así como la prolongación de la vida útil de los equipos. Desde 1984, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha trabajado, a solicitud de la CFE, en el desarrollo de sistemas digitales de control. A la fecha se han diseñado e implantado un sistema de control lógico de quemadores de gas y dos sistemas de control distribuido para dos centrales de ciclo combinado.

La confiabilidad de los sistemas digitales de control es muy alta; se ha encontrado que el tiempo medio entre fallas de los sistemas digitales es 10 veces superior al de otros sistemas y se estima que su disponibilidad es superior a 99%.

Sistema lógico para control de quemadores

El primer desarrollo del IIE en el área de control de procesos se inició en 1984. Ese año la CFE encargó al Instituto un sistema digital para controlar los 32 quemadores de la caldera de la unidad 4 de la central de generación Valle de México. El Instituto estaba preparado para hacer frente a este reto tecnológico, ya que contaba con la línea SAC (Sistema de Adquisición y Control), una línea de controladores de uso general que funciona por medio de tarjetas electrónicas, desarrollada por lo que en

ese tiempo era el Departamento de Electrónica, el cual ahora forma parte de la Unidad de Control e Instrumentación.

La unidad básica o controlador de la línea SAC está constituida por una tarjeta de procesamiento, una de comunicaciones, y tarjetas de entradas y salidas que adquieren la información del proceso y envían las señales de control, todas ellas conectadas entre sí y alojadas en un gabinete o "canasta". Con base en esta unidad pueden configurarse distintos tipos de control aplicables a una gran variedad de procesos, cambiando solamente los programas o el *software* que se instala en la tarjeta de procesamiento. El *software* contiene las instrucciones de operación y funciona en respuesta a las señales que se obtienen del proceso.

Partiendo, entonces, de la línea SAC, los especialistas de la Unidad de Control e Instrumentación del Instituto desarrollaron los programas y las bases de datos necesarios para controlar los quemadores de la caldera de la unidad 4; este trabajo tomó dos años y el sistema lógico de control digital se entregó en 1986. El término "lógico" se refiere a que en este tipo de control solamente se toman las señales de estado del

La característica más importante de un sistema de control distribuido es que la capacidad de control se halla distribuida en toda la planta, mientras que la función de supervisión está centralizada.

proceso y no sus valores en unidades de ingeniería.

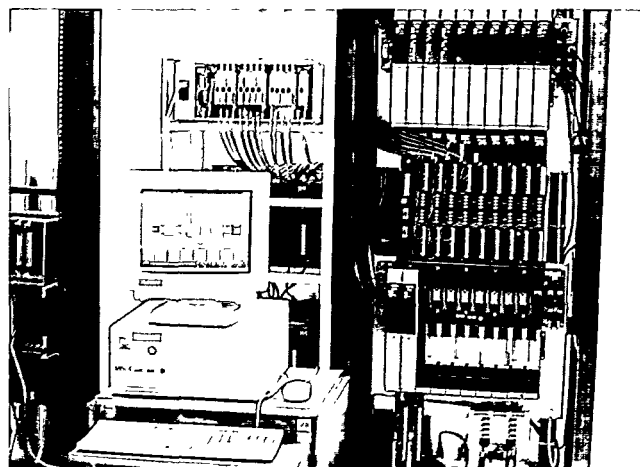
El sistema sustituyó a un control de quemadores que funcionaba con base en relevadores electromecánicos y presentaba, entre otros problemas, dificultades de mantenimiento y la falta de refacciones. Las tareas del sistema digital comprenden la protección general de la caldera y de las válvulas principales de combustibles y venteo, así como las funciones de arranque y paro de quemadores. La labor del operador es iniciar el proceso y supervisarlos con la información que le entrega el sistema a través de luces indicadoras en el tablero de control. Hasta la fecha el sistema funciona satisfactoriamente.

La modernización de la central de Dos Bocas

El siguiente proyecto del IIE en materia de control de procesos de generación de energía eléctrica, que

se inició en 1987, fue el desarrollo de un sistema de control distribuido para la central de ciclo combinado de Dos Bocas, Veracruz, el primero en su tipo diseñado en México. Este sistema fue instalado en 1991 y controla la operación de dos paquetes de ciclo combinado, cada uno compuesto por dos turbinas de gas, dos recuperadores de calor y una turbina de vapor. La función de los recuperadores es extraer el calor de los gases de salida de la turbina de gas y transferirlo al agua para convertirla en vapor; la energía de este último se emplea para mover la turbina de vapor, la que a su vez genera más electricidad. Al sistema se le denomina de control distribuido porque cuenta con un controlador dedicado para cada tipo de función; de esta manera, si un controlador llegara a fallar sólo afectaría a la función correspondiente. A diferencia del sistema de control para quemadores que se mencionó anteriormente, el de control distribuido, además de registrar las señales de estado del proceso, evalúa los valores de las distintas variables.

El control distribuido es un tipo de sistema que recibe las señales de cada parte del proceso, ejecuta cálculos en forma digital y produce



Sistema de control distribuido de la central de ciclo combinado de Dos Bocas, Veracruz.



Pruebas simuladas en el IIE del sistema de control distribuido de la central de ciclo combinado de Gómez Palacio, Durango.

señales de control que se comunican a los elementos actuadores, por ejemplo abrir o cerrar válvulas, operar interruptores, parar o arrancar motores, etcétera. Este sistema regula todas las variables que es preciso controlar en una planta.

Constantemente supervisa que esas variables no pasen de los límites establecidos y si existe la tendencia de que esto pueda ocurrir, genera primero una alarma para indicarlo al operador; si el límite es sobrepasado, el sistema puede parar el equipo para protegerlo.

El sistema procesa la información y la comunica con un área central donde el operador puede manipular todos los sistemas de control; la interfaz hombre-máquina está constituida por teclados y monitores. La característica más importante de un sistema de este tipo es que la capacidad de control se halla distribuida en toda la planta, mientras que la función de supervisión está centralizada.

La central de Dos Bocas tenía dos computadoras de control e información que fueron instaladas desde que la central entró en operación en 1974; para 1986 la tecnología de esas computadoras ya era obsoleta, el proveedor había

La experiencia adquirida con el sistema de control distribuido de la central de Dos Bocas permitió que el Instituto ganara el concurso internacional convocado por la CFE, en 1990, para desarrollar un sistema similar destinado a la central de Gómez Palacio, en Durango.

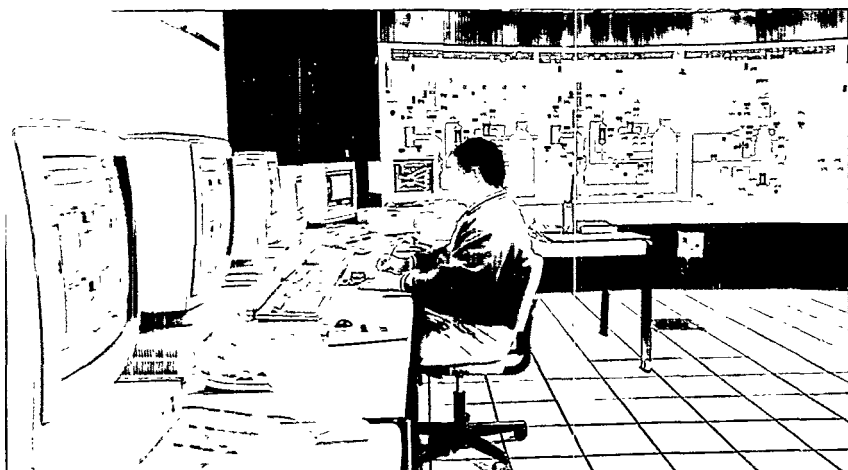
dejado de proporcionar mantenimiento y no existían refacciones. El IIE las sustituyó por controladores de la línea SAC, agrupados en módulos, cada uno con tarjeta de procesamiento, comunicaciones y de entradas y salidas; todos los módulos están interconectados. Se colocaron además seis módulos adicionales para dotar al sistema de una redundancia de 100%. Los circuitos de protección de las turbinas de gas, que se habían implantado con relevadores electromagnéticos, también se sustituyeron por módulos SAC.

En lo que se refiere a la información del proceso, se instalaron programas de adquisición de datos basados en minicomputadoras, dos impresoras y un generador de despliegues para cuatro monitores de

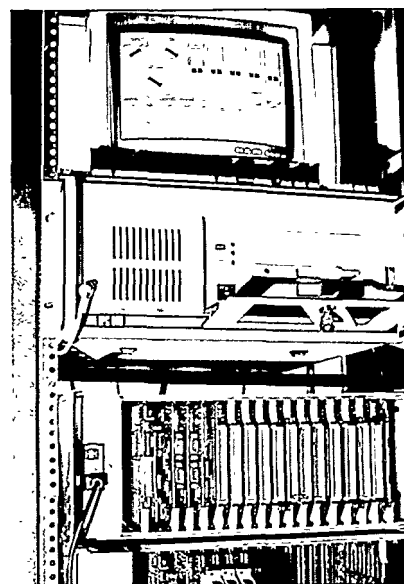
alta resolución. En todo momento está disponible la información de las condiciones de operación y pueden obtenerse reportes del régimen térmico, memoria de eventos, consumo de combustible, generación, etcétera. Así, el operador puede visualizar el comportamiento de toda la planta a través de los monitores y verificar el funcionamiento de cada equipo en particular.

A fin de que el cambio en el sistema de control no resultara tan drástico para los operadores de la central, en Dos Bocas se conservó el tablero de control original, pero además la información del proceso se muestra en las pantallas de las computadoras.

Entre los beneficios de este sistema de control distribuido destaca un aumento en la eficiencia de la central, que se deriva de una mayor supervisión de los parámetros operativos, una mayor confiabilidad en el arranque y un diagnóstico de fallas más rápido gracias a la memoria de eventos. Todo ello



Sistemas de control distribuido de la central de ciclo combinado de Gómez Palacio, Durango. El uso de este sistema permite operar la planta en forma automatizada y, con ello, mejorar su eficiencia y disponibilidad.



El IIE ganó un concurso internacional convocado por la CFE para desarrollar el sistema de control distribuido de la central de Gómez Palacio, Durango.

redunda en ahorros significativos para la CFE en gastos de operación y mantenimiento, además de que da una mayor continuidad al servicio de generación de la central.

La principal ventaja de que el sistema de control se haya contratado con el IIE y no con un proveedor comercial es que el sistema fue diseñado específicamente para la central de Dos Bocas, considerando la experiencia del personal que allí labora y de acuerdo con los requerimientos de la CFE; un proveedor comercial entrega un producto estandarizado al cual debe adaptarse el usuario. El IIE, además, se ha encargado de capacitar al personal en el uso del sistema digital y da el soporte técnico necesario para su mantenimiento.

El sistema de control distribuido de la central de Gómez Palacio

La experiencia adquirida con el sistema de control distribuido de la central de Dos Bocas permitió que el

Con los desarrollos para Dos Bocas y Gómez Palacio, el IIE se inscribe en la tendencia mundial de implantar sistemas de control distribuido para la modernización de centrales termoeléctricas. Además, este tipo de sistemas tienen aplicación en una variedad de industrias, como la petroquímica, la farmacéutica, la papelería y la alimenticia.

Instituto ganara el concurso internacional convocado por la CFE, en 1990, para desarrollar un sistema similar destinado a la central de Gómez Palacio, en Durango, la cual tiene un solo paquete de ciclo combinado.

El sistema entró en operación en 1996 y se basa, como el de Dos Bocas, en controladores de la línea SAC. Sin embargo, los esquemas de control son diferentes debido a que en el tiempo transcurrido entre uno y otro proyecto hubo considerables avances en la tecnología de las computadoras y de la programación. En la central de Gómez Palacio se modificó totalmente el

cuarto de control; todo el equipo original se sustituyó por controladores SAC y estaciones de trabajo. Como respaldo se colocó un tablero mímico que muestra los equipos principales y constantemente despliega la información del estado de las variables más importantes; con este tablero el operador o jefe de turno puede operar la central en caso necesario.

El sistema de Gómez Palacio está integrado por 14 módulos de control (siete principales y siete de respaldo) y dos de información. Cada módulo consta de 15 tarjetas electrónicas con capacidad para recibir en total 240 señales. Todos los módulos están comunicados con el subsistema de interfaz hombre-máquina. La interfaz se compone de cinco estaciones de trabajo interconectadas por una red de alta velocidad; en esta red radican los programas de manejo y presentación de la información del proceso. Así, el control de toda la central de Gómez Palacio es digital y automático, las intervenciones del operador son mínimas y consisten principalmente

Sistemas digitales de control distribuido desarrollados por el IIE		
Central	Duración del proyecto	Beneficios
Dos Bocas, Veracruz. Dos paquetes de ciclo combinado.	1987-1991	• Prevención de fallas y paros forzados.
Gómez Palacio, Durango. Un paquete de ciclo combinado.	1990-1996	• Mayor durabilidad de los equipos de generación. • Ahorro de combustible. • Mayor eficiencia en los procesos de generación. • Mayor disponibilidad de la central.

en indicar al sistema cuál debe ser la generación de energía eléctrica de acuerdo con el plan de operación del Centro Nacional de Control de Energía (Cenace).

Si bien es pronto para evaluar los ahorros derivados del uso del sistema digital, las estimaciones hechas para la central de Dos Bocas permiten suponer que la reducción de costos por concepto de mantenimiento, fallas y óptimo aprovechamiento del combustible en la central de Gómez Palacio también es significativa.

Perspectivas

Con los desarrollos para Dos Bocas y

Gómez Palacio, el IIE se inscribe en la tendencia mundial de implantar sistemas de control distribuido para la modernización de centrales termoeléctricas. Además, este tipo de sistemas tienen aplicación en una variedad de industrias, como la petroquímica, la farmacéutica, la papelera y la alimenticia.

Entre los proyectos que preparan actualmente los especialistas de la Unidad de Control e Instrumentación del IIE destaca el de la programación de controladores comerciales para dos tipos de turbinas de gas, que se realiza en colaboración con una empresa privada que fabrica controladores.

Por otra parte, se está elaborando un proyecto para la especificación de la modernización de los sistemas de control y definición de estrategias de control avanzado para procesos en refinerías de Petróleos Mexicanos (Pemex), como el de la hidrodesulfuración de combustóleo y de integración catalítica.

Redacción de Estrella Burgos, colaboradora del Departamento de Difusión. Asesoría técnica, ingeniero Rafael Chávez Trujillo, gerente de la Unidad de Control e Instrumentación, e ingeniero Octavio Gómez Camargo, coordinador de especialidad de integración de sistemas de control digital de la Unidad de Control e Instrumentación.

Tecnología de sistemas híbridos solar-eólico para desarrollos ecoturísticos

Aplicaciones: *Iluminación*
Refrigeración
Aire acondicionado



Villas Carrousel en Playa del Carmen, Quintana Roo, primer desarrollo ecoturístico que satisface sus necesidades de energía eléctrica para iluminación con un sistema híbrido solar-eólico diseñado y construido por el IIE.

Mayores informes
Unidad de Energías No Convencionales del IIE
Teléfono (73) 18 38 11, extensión 7771.



Actividades de investigación en el uso de la energía eléctrica

Rogelio Covarrubias y Francisco García

Introducción

El uso de la energía está íntimamente relacionado con el desarrollo y se encuentra en las actividades humanas de todo tipo: sociales, recreativas y productivas, de tal suerte que podríamos decir que a mayor uso debe corresponder un mayor beneficio. Por ejemplo, la aplicación de más energéticos en el sector industrial debe tener como consecuencia un mayor volumen de producción y, en el sector doméstico, un nuevo aparato de televisión, de sonido o de iluminación, un horno de microondas, el acondicionamiento del clima interior, etcétera; debe producir una mejor calidad de vida para los residentes de ese hogar.

La demanda de energía ha impulsado el desarrollo de diversas fuentes de energía y la producción de diversos energéticos para satisfacer todos los usos.

La principal fuente de energía es el Sol. Nosotros la usamos ya sea directamente o transformada, principalmente en forma potencial en caídas de agua o química, en los combustibles como la leña, el carbón y el petróleo (figura 1).

La creciente demanda de energía

En 1973, los países industrializados, que son, por ende, grandes consumidores de energía, iniciaron diversas acciones para hacer un menor uso de energéticos sin perder los beneficios económicos y sociales y, a la vez, proteger y mejorar el medio ambiente.

llegó a producir, como efecto de las fuerzas de mercado, que el precio del petróleo se elevara y que se mantuviera una tendencia a la alza hasta niveles insostenibles.

Simultáneamente, el uso intensivo de los energéticos estaba produciendo un serio deterioro del medio ambiente debido a las emisiones, producto de la combustión de los energéticos de origen fósil.

En 1973, los países industrializados, que son, por ende, grandes consumidores de energía, iniciaron diversas acciones para hacer un menor uso de energéticos sin perder los beneficios económicos y sociales y, a la vez, proteger y mejorar el medio ambiente.

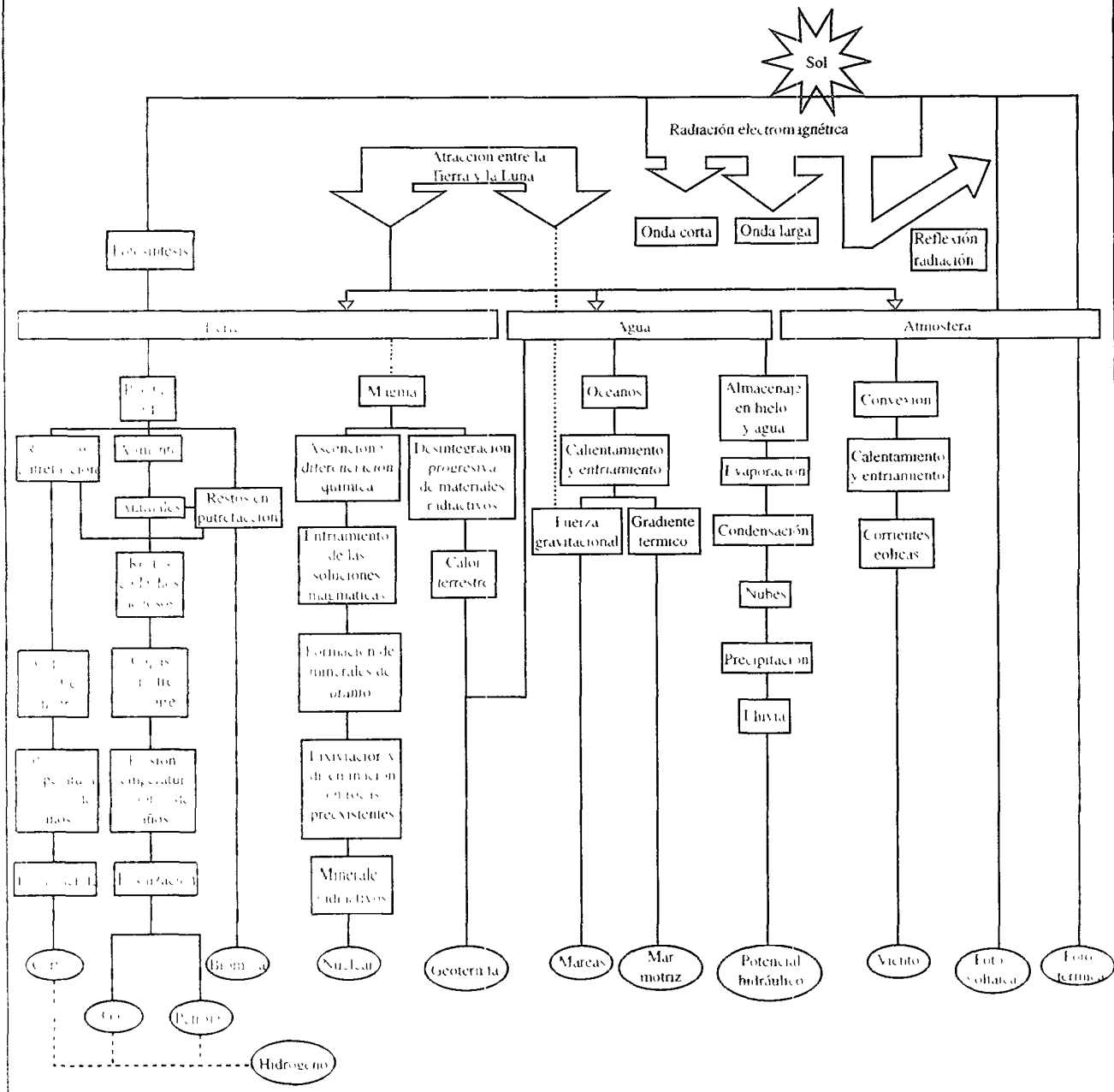
Estas acciones detonaron una gran cantidad de estudios para conocer las formas de uso de la energía y el posterior desarrollo de tecnologías, productos y prácticas que en conjunto integran lo que hoy podríamos llamar ciencias y técnicas de la eficiencia energética.

Hay diversas formas de analizar el impacto que tiene el uso de la energía, ya sea en el ámbito internacional, nacional, regional, sectorial o incluso a escala individual. En cuanto a países, se hace comparando la relación:

$$\text{Intensidad energética} = \frac{\text{Consumo total de energía}}{\text{Producto Interno Bruto}}$$

El análisis comparativo de la eficiencia energética en

FIGURA 1
Fuentes de energía



México contra países industrializados muestra que mientras nuestro país indica una tendencia creciente, en los países industrializados la tendencia es a la baja, signo inequívoco de un mejor uso de los energéticos (figura 2).

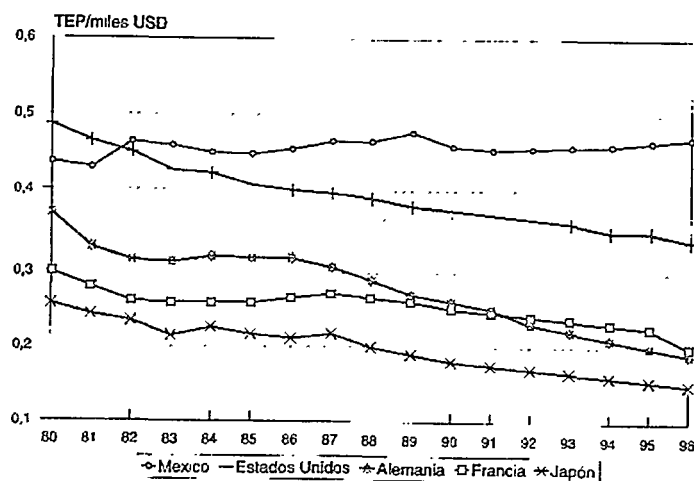
En México se está desarrollando la infraestructura requerida para emprender acciones y proyectos de ahorro de energía; se cuenta con

diversos organismos, instituciones financieras, cámaras industriales, cámaras de comercio, empresas de ingeniería, centros de investigación centros de enseñanza superior con capacidad para apoyar acciones de difusión y promoción, así como para realizar proyectos sobre ahorro de energía.

La energía se produce y consume en seis grandes sectores: energía,

El análisis comparativo de la eficiencia energética en México contra países industrializados, muestra que mientras nuestro país indica una tendencia creciente, en los países industrializados la tendencia es a la baja, signo inequívoco de un mejor uso de los energéticos.

FIGURA 2
Eficiencia energética en varios países.



Nota: valores del periodo 1988-1995 son estimados.

Fuente: Agencia Internacional de Energía, 1996.

transporte, industria, comercio, servicios y residencial o doméstico (figura 3).

En el sector productivo podemos medir la eficiencia energética comparando en diferentes empresas del mismo ramo su intensidad energética, es decir, la cantidad de energía requerida para obtener una unidad de producción. Esta comparación permite hacer un mapa de la posición relativa e identificar los factores que dan las ventajas competitivas a unas empresas sobre

otras. Asimismo, es posible establecer metas y estrategias para alcanzar niveles de eficiencia energética que, además de la ventaja derivadas del menor uso de los energéticos, tienen la virtud de posicionar a las empresas en niveles comparables de calidad y competitividad en los mercados globales (figura 4).

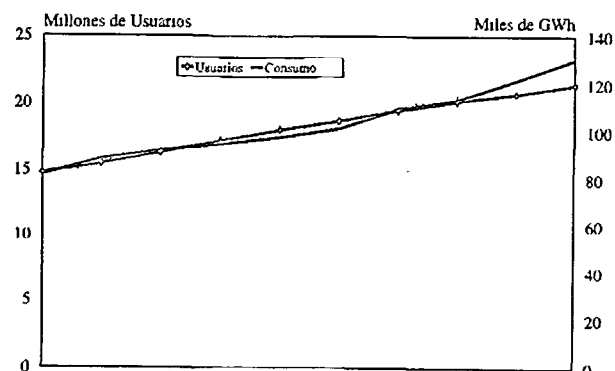
Consumo de energía

El sector energía es el principal consumidor de energía primaria en el país. En 1996 tuvo un consumo total

de 45.4 millones de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) que significan 33.1% del consumo nacional de energía, desglosado en lo siguiente: autoconsumo, 15.8 millones de TEP (10.9%); transformación, 26.9 millones de TEP (18.6%), y pérdidas por distribución, 2.9 millones de TEP (2.0%).

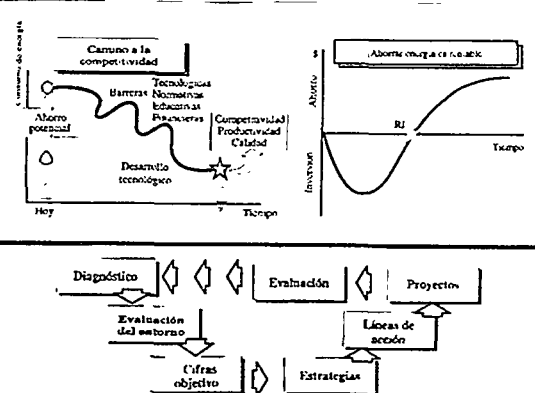
El sector industrial hasta el momento ha sido un importante consumidor de energía, al que se destina un poco más de la tercera parte del total nacional. En términos generales, el consumo de energía en 1996 fue de 33.38 millones de TEP, teniendo una variación de 8.2% respecto a 1995. En el consumo de energía del sector industrial se observan variaciones similares a las que presentan el producto interno bruto (PIB) nacional y el PIB de la industria. Esto se debió en los primeros años a la abundante oferta de energía a precios subsidiados, lo que provocó el uso ineficiente de los recursos; sin embargo, en 1996 se aprecia un aumento del consumo de energía que se puede atribuir al crecimiento de la industria en México, así como a la apertura de los mercados en América del Norte, que en los últimos años propició un cambio en el patrón de consumo energético.

FIGURA 3
Evolución del mercado eléctrico.



	1977	1979	1981	1983	1985	1987	1989	1991	1993	1995	1996
Usuarios	4773	15470	16126	17154	17775	18690	19734	20441	21008	21744	22554
Consumo	81705	82551	95123	107658	119770	131277	140419	151565	162575	172554	182554

FIGURA 4
Estrategia para la eficiencia energética



Durante 1996 el sector comercial, residencial y de servicios públicos representaron 15.1% del consumo energético total utilizado a escala nacional (20.80 millones de toneladas equivalentes de petróleo) (figura 5).

Durante 1996, el consumo de combustible y de electricidad de los diferentes medios de transporte utilizados en el país ascendió a 35.28 millones de TEP, cifra 2.6% superior a la registrada en 1995, representando 25.7% del consumo energético nacional (cuadro 1 y figura 6).

Sector energía

El sector energía está integrado principalmente por Petróleos Mexicanos (Pemex) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Estos organismos prácticamente son los únicos que producen energéticos primarios para abastecer al mercado nacional. El consumo de energía es un indicador del nivel económico, social, científico y tecnológico de los países. En México, Pemex y la CFE cubren un área estratégica y fundamental de la economía, y sustentan en forma importante el nivel de vida de la población. Además de abastecedores de energéticos, también son grandes usuarios de energía y sujetos a la aplicación de medidas para mejorar su

eficiencia energética y ofrecer productos de mejor calidad y competitivos en el mercado.

Pemex consume energía principalmente en transformación de petrolíferos, consumo propio y pérdidas diversas.

La CFE consume energía en la producción de energía eléctrica. Este consumo comprende la propia generación, así como las pérdidas en transmisión y distribución. Las centrales de generación de la CFE son principalmente termoeléctricas que usan combustóleo, gas natural y carbón, además, cuenta con centrales hidroeléctricas, geotérmicas y nucleoeeléctricas (figura 7).

En el sector eléctrico, el consumo propio tiende a reducirse debido a la aplicación de programas de ahorro de energía y del incremento de eficiencia energética.

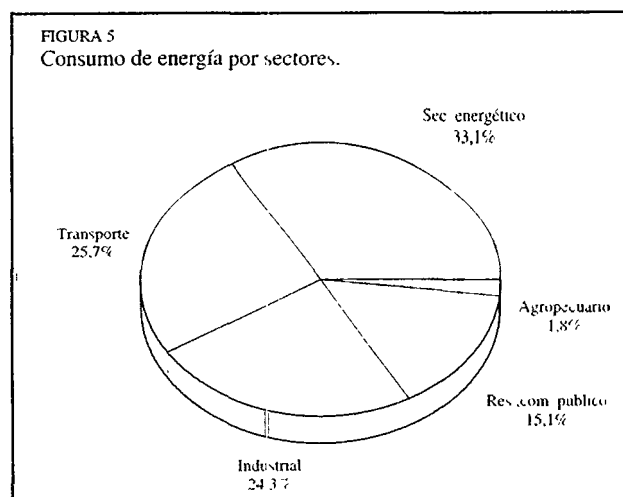
Sector industrial

En la industria se observan dos tendencias fundamentales: la creciente

El sector energía es el principal consumidor de energía primaria en el país. En 1996 tuvo un consumo total de 45.4 millones de toneladas equivalentes de petróleo, que significan 33.1% del consumo nacional de energía.

participación de la electricidad y un cambio en la utilización de combustóleo; el primero se explica por una mayor electrificación dada por nuevos procesos productivos; el segundo es provocado por el proceso de sustitución de gas natural por combustóleo, lo que se debe a la evolución de los precios relativos de ambos combustibles (figura 8).

El sector industrial es uno de los tres sectores consumidores de energía



CUADRO 1

Consumo nacional total de energía por sectores en millones de TEP

Sector	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Industrial ⁽¹⁾	31.3	29.3	31.5	28.7	30.8	29.3	31.5	30.33	30.34	30.03	30.36	31.67	33.16	35.86
Energéticos	36.6	37.2	36.7	37.0	38.1	39.8	41.6	38.7	38.52	38.90	36.57	40.17	40.49	45.41
Servicios	16.0	16.7	17.2	17.3	17.8	18.2	18.5	16.85	18.28	19.29	19.91	19.27	20.06	20.80
Transporte	24.5	25.9	26.1	26.0	26.6	26.9	29.7	30.32	32.35	32.64	33.37	34.73	34.39	35.28
Total ⁽²⁾	108.4	109.1	111.5	109.0	113.3	114.2	121.3	116.2	119.49	120.86	120.21	125.84	128.10	137.35
Total ⁽³⁾	118.9	118.9	121.6	119.1	124.0	125.8	133.4	125.53	128.75	130.81	128.80	134.41	134.87	145.08

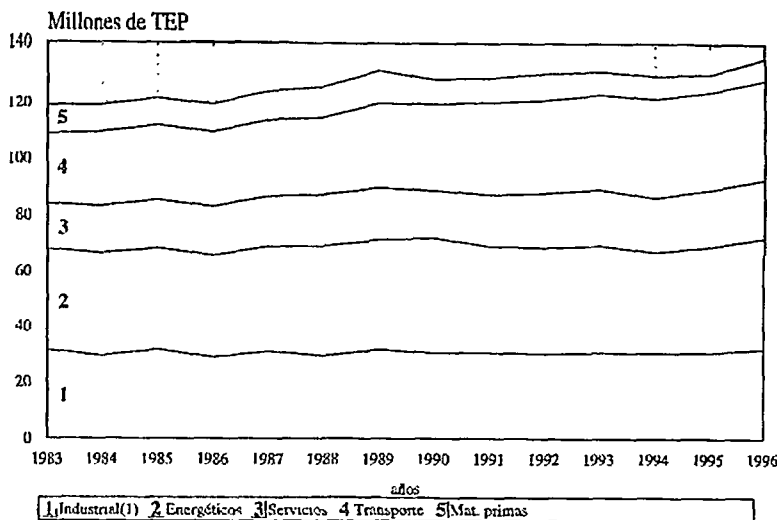
(1) Incluye agroindustria y el consumo energético de petroquímica básica

(2) No incluye el consumo de materias primas para la industria petroquímica básica

(3) Incluye el consumo de materias primas para la industria petroquímica básica

Fuente: SE, Balance Nacional de Energía, 1996

FIGURA 6
Consumo nacional total de energía por sectores.



NOTAS
1. Incluye agroindustria.

Fuente: Balance nacional de energía, 1996.

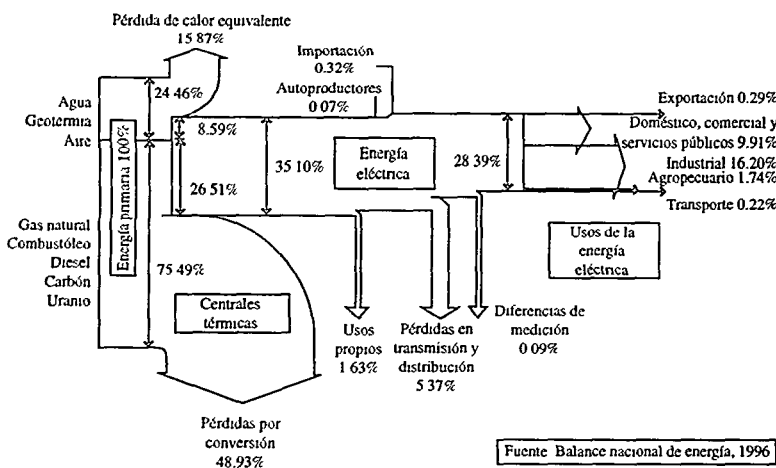
El sector industrial hasta el momento ha sido un importante consumidor de energía, al que se destina un poco más de la tercera parte del total nacional de energía.

y papel, del vidrio y de fertilizantes, aunque dentro de otras ramas se encuentran agrupadas varias industrias que en conjunto consumen alrededor de la sexta parte del total del sector.

Sectores comercial y de servicios

Los sectores comercial y de servicios son consumidores de energía en edificios públicos, hospitales, hoteles y centros deportivos, sitios en los que con frecuencia podemos detectar oportunidades de mejora en el uso de la energía en sus diversas formas, no sólo en los usos directos como son la iluminación, la calefacción y el acondicionamiento del aire, la cocción de alimentos, etcétera, sino también en las edificaciones tanto por su capacidad de absorción térmica como por la de proporcionar iluminación y ventilación natural. En este grupo se incluyen también los servicios públicos, alumbrado público, bombeo de agua residual, potable y para usos agrícolas (figura 9).

FIGURA 7
Balance de energía eléctrica



más importantes. La eficiencia en el uso de la energía en la industria puede mejorarse sustancialmente a través de una combinación de medidas técnicas, institucionales y financieras. El sector industrial manifiesta un requerimiento creciente de servicios energéticos asociados con su proceso de modernización y por la necesidad de alcanzar mayores niveles de eficiencia, productividad y calidad.

Respecto a la industria, se puede mencionar que el consumo de energía

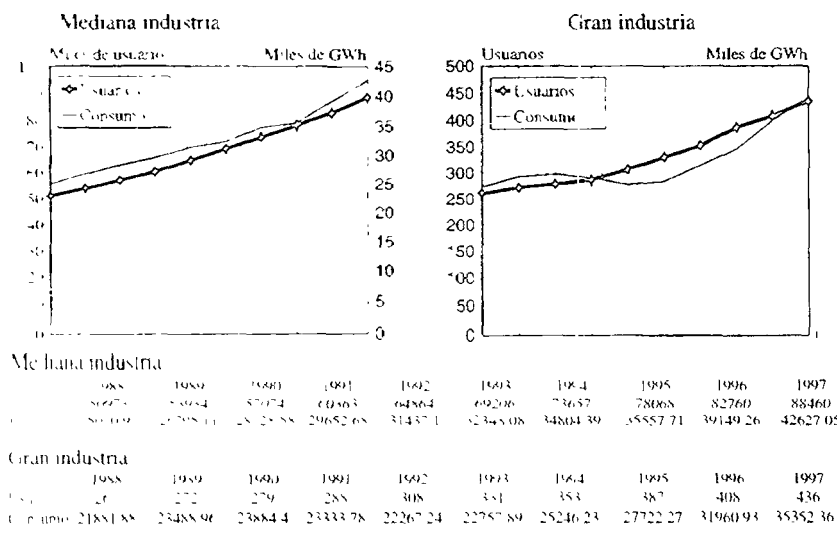
está influenciado por muchos factores como: el tamaño de la población, el producto interno bruto per cápita, los precios de los energéticos, la estructura de la economía, la intensidad energética y el tipo de clima.

El consumo energético desagregado del sector industrial indica que las ramas con mayor consumo son las siguientes: siderúrgica, petroquímica, química, del cemento, del azúcar, de la celulosa

Sector transporte

El ahorro y uso racional de energía en el sector transporte es más que una respuesta a una situación obvia de baja eficiencia en la utilización de los energéticos. Una combustión eficiente y un transporte "cero emisiones" automáticamente reducen la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera y contribuyen al bienestar de la población y al sostenimiento del equilibrio ecológico. El concepto de uso racional orienta la problemática de la energía hacia el análisis y la transformación del sistema energético

FIGURA 8
Evolución del sector industrial.



Durante 1996 el sector comercial, residencial y de servicios públicos representaron 20.4% del consumo energético total utilizado a escala nacional (20.80 millones de toneladas equivalentes de petróleo). En el sector transporte, entre 1995 y 1996 hubo un crecimiento de 34.39 a 35.28 millones de TEP.

con esquemas óptimos de bienestar general.

En el sector transporte, entre 1995 y 1996 hubo un crecimiento de 34.39 a 35.28 millones de TEP; respecto a años anteriores se observa una tendencia casi constante, lo cual indica que, de mantenerse dicha tendencia, para el año 2000, si no se aplican medidas de conservación, se tendría un consumo del orden de cuarenta millones de toneladas equivalentes de petróleo.

Sector residencial

Debido al crecimiento demográfico y al incremento de costos de producción, así como a la reducción de las reservas petrolíferas del país, cada día es más costosa la adquisición, producción y distribución de los energéticos que se consumen en el sector residencial, representado por casas habitación, edificios de departamentos y unidades habitacionales. Si no se repercute el costo real del energético, será difícil, que la población en su conjunto aprecie el valor de la energía en su vida diaria y, por ende, participe activamente en las campañas que se emprenden con la finalidad del uso racional y el ahorro de energía (figura 10).

En el sector residencial, comercial y de servicios, en los años 1995 a 1996 hubo un incremento de 20.06 a 20.80 millones de toneladas equivalentes de petróleo.

FIGURA 9
Evolución del sector comercial, de servicios y agrícola

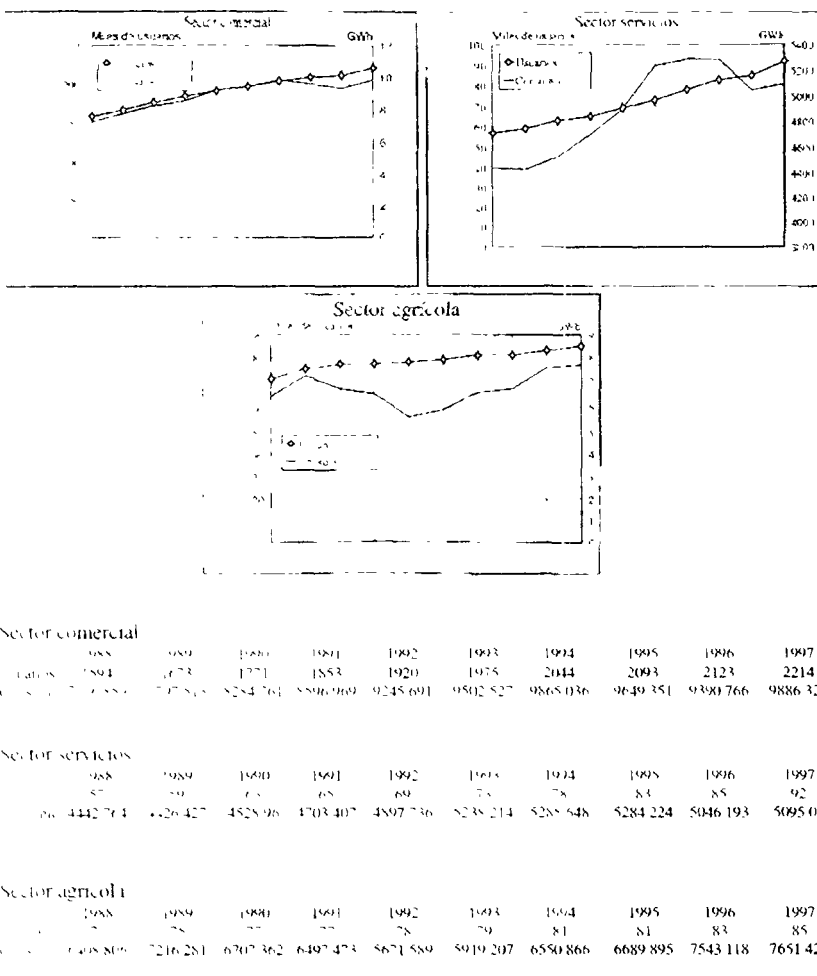
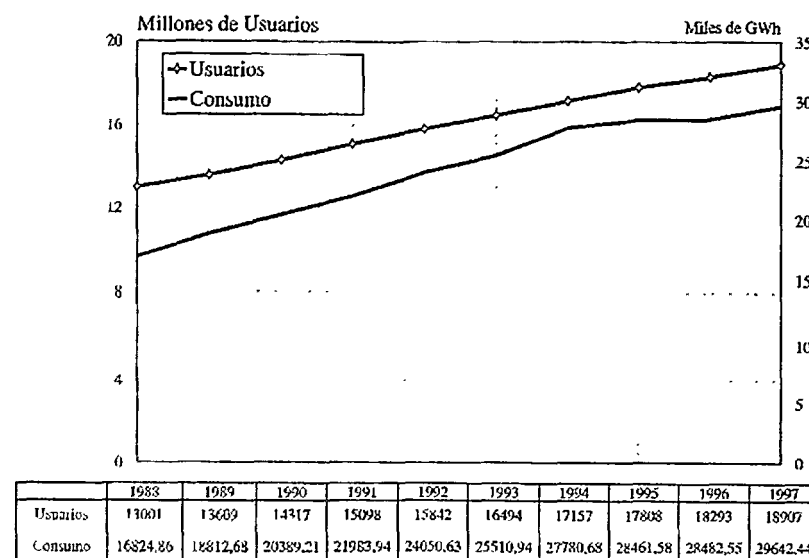


FIGURA 10
Evolución del sector doméstico.

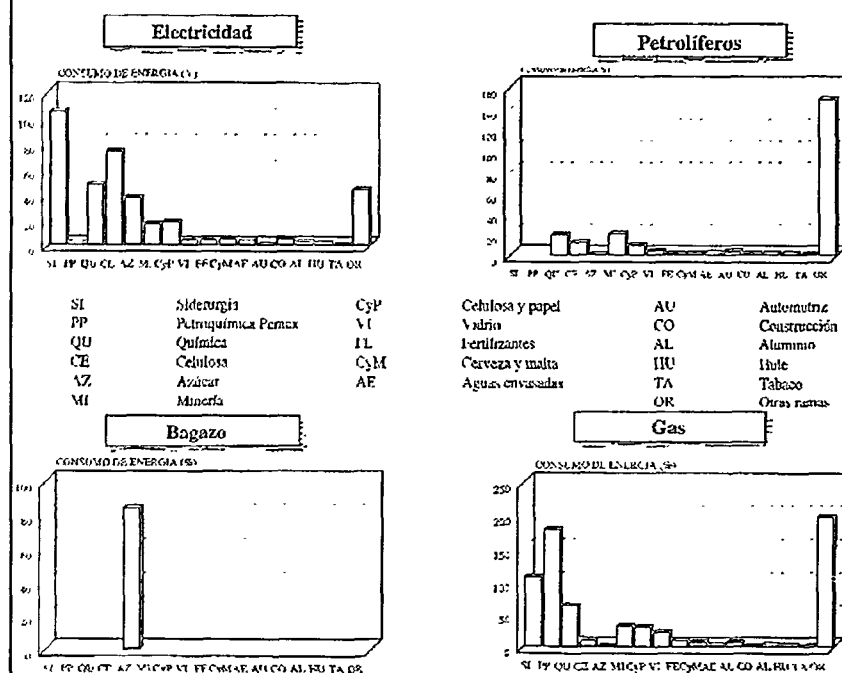


Los energéticos consumidos en el sector residencial, comercial y de servicios se utilizan principalmente en iluminación, preparación de alimentos y acondicionamiento del ambiente, siendo la leña (seis millones de TEP), el gas LP (8.9 millones de TEP) y la electricidad (3.79 millones de TEP) los de mayor consumo.

De los energéticos empleados por el sector transporte, 99.8% son productos petrolíferos y el resto es electricidad, relación que se ha mantenido en los últimos cinco años.

Alrededor de 89.8% del consumo de productos petrolíferos está compuesto por gasolina y diesel, combustibles que se utilizan mayormente en el subsector autotransporte.

FIGURA 11
Consumo por rama industrial 1996.



Administración de la demanda

Tradicionalmente, el crecimiento del sector eléctrico se ha enfocado en satisfacer, con la anticipación y márgenes necesarios, el crecimiento de la demanda, utilizando técnicas de proyección con base en los parámetros tradicionales: tendencia de crecimiento, crecimiento demográfico, número de usuarios, desarrollo industrial y comercial, PIB, etcétera.

Por otra parte, hay factores que se han vuelto importantes en la planeación de la oferta de energía eléctrica, como por ejemplo, el incremento en el precio de los energéticos, el cuidado del medio ambiente y la incertidumbre en el comportamiento de los costos financieros de las inversiones en generación. Esta situación ha despertado el interés de los planeadores por integrar al proceso factores que influyen en la demanda, al considerar que una reducción de la demanda automáticamente se refleja en un alivio a la oferta.

Los objetivos de administrar el

Tipo de energético y características de uso

El análisis de los energéticos empleados indica que la industria consume tres energéticos principalmente: el gas, el combustóleo y la electricidad, que en conjunto representan más de 80%

del consumo energético del sector. Asimismo, la industria azucarera y la de celulosa y papel consumen la totalidad del bagazo de caña, y la industria siderúrgica utiliza el coque. Otros combustibles complementarios son el gas licuado, kerosinas y diesel (figura 11).

comportamiento de la demanda son crear una mayor conciencia y convencer a los usuarios para que modifiquen sus hábitos de uso, remodelen o renueven sus instalaciones productivas, coordinen sus procesos de producción en forma eficiente, cambien sus equipos y aparatos por aquellos que ofrezcan mayor eficiencia energética y, en general, mantengan un programa continuo de administración de la energía dentro de sus instalaciones, integrado a sus planes de mejora continua y a sus estrategias para alcanzar o mantener su competitividad en el mercado (figura 12).

El concepto de planeación integral de los recursos (IRP, por sus siglas en inglés), actualmente en práctica en muchos países, considera dos aspectos en forma integrada: los recursos aplicables al suministro de energía eléctrica y la administración de la demanda. La administración de la demanda busca el equilibrio entre la oferta y la demanda (figura 13).

Se entiende por administración de la oferta las inversiones en infraestructura eléctrica, la operación y el mantenimiento de dichas instalaciones.

Se entiende por administración de la demanda la reducción de la

demanda pico, la adecuación de las tarifas eléctricas a las condiciones reales, la conservación y el ahorro de los energéticos, y el crecimiento estratégico de la carga.

En consecuencia, la relevancia para el sector es la optimación y el diferimiento de las inversiones, la reducción de pérdidas, el uso eficiente de la energía y la disminución de emisiones contaminantes, entre otros.

La administración de la demanda de energía ya ha sido aplicada durante varios años en diversos países, incluyendo a México. Se han desarrollado diversos métodos para identificar las oportunidades, así como procedimientos para evaluar el diseño, el desarrollo, la evaluación, el seguimiento, el costeo, etcétera, de programas en los distintos usuarios y sus sectores.

Por ejemplo, en los Estados Unidos, las empresas eléctricas han venido incorporando aspectos de administración de la demanda en las últimas dos décadas y éstas han crecido exponencialmente en los últimos cinco años. Desde la crisis energética en 1973, la intensidad energética, es decir, la cantidad de energía necesaria para producir un dólar de producto nacional bruto en los Estados Unidos, ha disminuido en

2000 las empresas eléctricas en ese país gastarán anualmente seis mil millones de dólares en programas de administración de la demanda, lo cual resultaría en un ahorro de energía eléctrica del orden de 6 a 12%, en relación con la proyección nacional de uso de la energía.

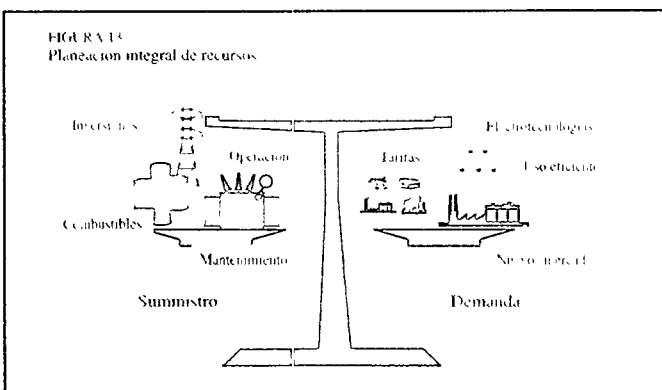
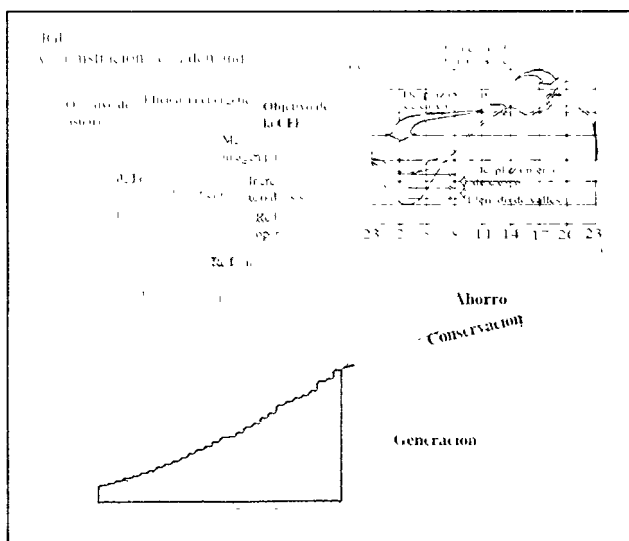
En el caso de México, desde hace varios años se han iniciado proyectos asociados con el uso eficiente de la energía como una forma de racionalizar el uso de los energéticos y conservar el ambiente; sin embargo, la aplicación de la administración de la demanda como una mejor opción para la aplicación de los recursos de inversión está en su inicio.

Respecto a los tipos de programas, los principales son aire acondicionado, alumbrado y su control, aislamiento térmico, refrigeración, tarifas especiales, equipos y aparatos eficientes, control de carga de motores, motores eficientes y procesos industriales.

Promoción de la eficiencia energética en México

Con la publicación del Programa Nacional de Modernización Energética, en donde se establecen las prioridades nacionales en materia de energía y se orientan las acciones hacia el ahorro y uso racional de la energía, se crea la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) en septiembre de 1989, con la misión de

28%. Las proyecciones actuales indican que para el año



promover y apoyar los programas gubernamentales para facilitar, estimular y regular el ahorro de energía a escala nacional.

Por otra parte, la Comisión Federal de Electricidad integra en enero de 1990 el Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE) como una manifestación acorde con el interés por impulsar este tipo de acciones en forma vigorosa.

Se establece, además, el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (Fide) con la participación del sector privado, representado por las empresas ligadas a la producción y consumo de electricidad, y del sector público, representado por la Comisión Federal de Electricidad, Luz y Fuerza del Centro (LyFC) y el Sindicato Único de Trabajadores Electricistas de la República Mexicana (SUTERM), cuyo objetivo es apoyar con recursos económicos la realización de proyectos de interés social y proyectos piloto o demostrativos, con el fin de lograr un efecto multiplicador y lograr así inducir la participación de la sociedad civil en los programas de ahorro y uso eficiente de la energía.

Paralelamente, en el aspecto normativo, se crea en el seno de la Ley de Metrología y Normalización, el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, bajo la presidencia de la Conae y la Secretaría de Energía.

Actividades en el IIE

Por su parte, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) como integrante del sector eléctrico nacional se ha hecho partícipe de los programas antes mencionados para el ahorro y uso eficiente de la energía, creando la Unidad de Uso de Energía dentro de la División de Sistemas Eléctricos cuya misión es: "Impulsar y promover el ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica, brindando el apoyo tecnológico necesario para que las instalaciones del sector eléctrico y de los usuarios de energía eléctrica logren reducir el consumo, la demanda pico y la tasa de crecimiento de la demanda de energía eléctrica, y, en consecuencia, conservar el medio ambiente y los recursos del sector eléctrico".

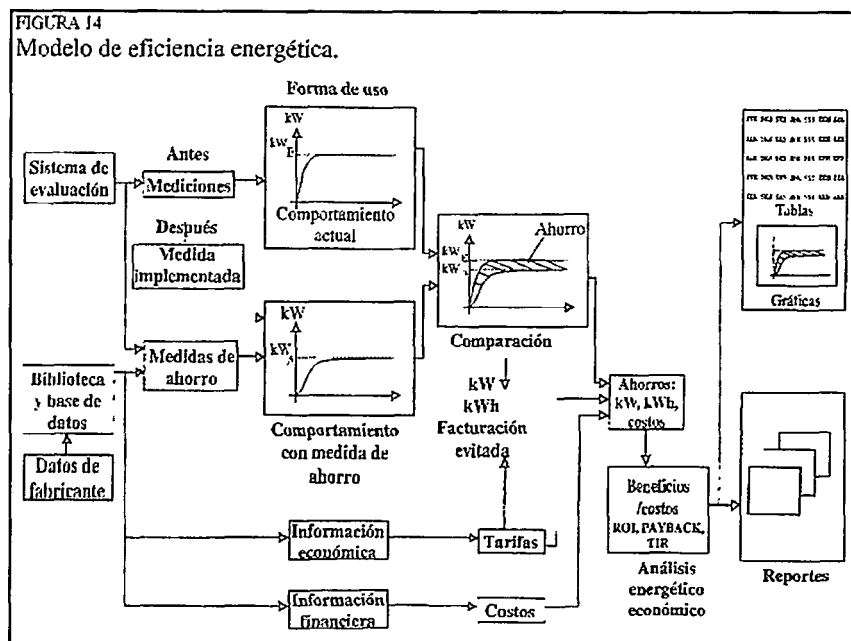
Entre sus objetivos principales están el apoyo a la CFE en cuanto a la mejora de su eficiencia energética interna y la evaluación de la demanda de energía de sus usuarios como base para la planeación del suministro en el mediano y largo plazos; coadyuvar en la consecución de niveles de eficiencia energética óptimos en los sectores residencial, comercial, industrial, de servicios y transporte, desarrollando métodos para evaluar la aplicación de medidas de ahorro con base en la utilización de tecnologías modernas y limpias; apoyar a otras entidades (Conae, PAESE, Fide, etcétera) en la integración de organismos regionales de ahorro de energía, en la detección de oportunidades de ahorro de energía y en el desarrollo de normas y guías que promuevan el uso eficiente y racional de la energía.

Dentro de las áreas de oportunidad que se han identificado y que tienen especial importancia no sólo por su carácter social sino también por su clara contribución a la reducción de la demanda máxima de energía eléctrica destaca el sector doméstico, en donde se han identificado tres áreas de particular interés: iluminación residencial, acondicionamiento ambiental de la vivienda y normalización de la eficiencia energética de aparatos electrodomésticos.

En el ámbito industrial, se ha llevado a cabo un número importante de auditorías energéticas que nos permiten trabajar actualmente en el desarrollo de metodologías que con el apoyo de programas de cómputo sean una herramienta importante para consultores, administradores de energía y grandes usuarios en el diseño y evaluación de programas de eficiencia energética (figura 14).

Líneas de desarrollo

Las actividades de la Unidad están



agrupadas en dos líneas de desarrollo:

- Administración del lado de la demanda (ALD).
- Sistemas eléctricos industriales.

Se considera que el transporte eléctrico ofrece un campo muy importante a mediano plazo, por lo que se tiene en preparación un amplio programa de actividades con lo que se abrirá una nueva línea de desarrollo.

Administración del lado de la demanda

El objetivo de esta línea es analizar, evaluar y modelar el consumo y la demanda de energía en redes eléctricas y del sector eléctrico para identificar y cuantificar potenciales de ahorro, e instrumentar la conservación y el uso eficiente de energía eléctrica.

Las actividades que se realizan en este grupo de trabajo se traducen en asesorías y estudios relacionados con:

- Estudios de eficiencia energética.
- Apoyo a programas nacionales y regionales de ahorro de energía.
- Integración de sistemas computacionales.
- Monitoreo y evaluación de medidas de ahorro de energía.
- Normalización de la eficiencia energética.
- Diagnósticos energéticos.
- Demostración de usos finales de la energía eléctrica.

Los proyectos que se han realizado en esta línea de actividad son:

- Colaboración con el Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA) de la República de Colombia en la primera fase de normalización, certificación y etiquetado de equipos electrodomésticos. El programa de normalización en Colombia se continuará en 1999 con apoyo financiero del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Estimación del tiempo de uso de la

energía eléctrica utilizada en iluminación artificial en los sectores residencial y comercial.

- Análisis del comportamiento de la demanda de energía eléctrica (ALD).
- Desarrollo de la infraestructura para la aplicación de la administración de la demanda en México.
- Apoyo para la implantación en 1996 del cambio de horario en México.
- Evaluación del ahorro de energía debido al cambio de horario en México en 1996.
- Formulación de bases para normas de ahorro de energía para aparatos domésticos e industriales.
- Bases para normas de eficiencia energética para equipos electrodomésticos.
- Elaboración de anteproyectos de Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética para equipos y aparatos de uso residencial e industrial: refrigeradores electrodomésticos, aire acondicionado tipo ventana, motores trifásicos de 0.746 a 149.2 kW, motores monofásicos de 0.18 a 1.5 kW, alumbrado para edificios no residenciales, alumbrado para vialidades y exteriores de edificios, sistemas de techos y muros en edificaciones residenciales.
- Integración de especificaciones para el sello Fide.
- Anteproyecto de norma de eficiencia energética para alumbrado de edificios no residenciales.
- Anteproyecto de norma de eficiencia energética en sistemas de alumbrado para vialidades y exteriores de edificios.
- Formulación de anteproyectos de norma de eficiencia energética de equipos de aire acondicionado central.
- Revisión de anteproyecto de norma de sistemas de techos y muros en edificaciones residenciales.
- Revisión NOM-074-SCFI-1994, motores eléctricos.

- Revisión NOM-072-SCFI-1994, refrigeradores electrodomésticos.

- Metodología para la aplicación de la NOM-007-ENER-1995.

Proyectos en desarrollo:

- Programa de cómputo para evaluar y analizar el impacto del uso de la energía eléctrica en el sector doméstico.
- Sistema de diagnóstico energético-económico de programas de ahorro de energía en Mexicali, Baja California.
- Evaluación y apoyo logístico para la implantación del horario de verano en la república mexicana en 1997 y 1998.
- Evaluación del impacto de las normas de eficiencia energética.

Sistemas eléctricos industriales

El objetivo de esta línea es:

“Promover el uso eficiente, la confiabilidad y calidad de la energía eléctrica en los sectores energético, industrial, comercial y de servicios, con el propósito de reducir el consumo y la demanda de energía eléctrica y conservar el medio ambiente, así como promover la aplicación de electrotecnologías en la industria para mejorar la eficiencia energética y abatir la contaminación ambiental”.

Las actividades que se realizan en este grupo de trabajo se traducen en asesorías y estudios relacionados con:

- Confiabilidad de sistemas eléctricos de distribución: estudios de cortocircuito, coordinación de protecciones, ajuste y calibración de dispositivos de protección, flujos de carga, estudios de estabilidad, transitorios electromagnéticos, armónicas (enfoque a problema armónico), armónicas (efectos), redes de tierras.
- Calidad de la energía eléctrica: impulsos, picos de sobretensiones; distorsión armónica; ruido eléctrico; sobre o bajo voltaje; depresión o

distensión de voltaje; transitorios; interrupción.

- Interconexión de generadores al sistema eléctrico nacional: oscilación de potencial real, absorción de reactivos, esquemas de protección, estabilidad transitoria y dinámica, limitación de la potencia exportada.

- Metodología y herramientas para el análisis del uso de energía en equipos y procesos industriales: iluminación, motores, bombas, compresores, variadores de velocidad, procesos, electrotecnologías.

Principales proyectos que se han realizado en este grupo de trabajo:

- Factibilidad de aplicar vehículos eléctricos o vehículos eléctricos híbridos en el sistema de transporte de la ciudad de México.

- Desarrollo de la metodología para mediciones en campo y realización de diagnósticos energéticos

- Eficiencia energética para edificios.

- Revisión del Programa Nacional de Ahorro de Energía 1ª y 2ª etapas.

- Sistemas para la demostración de los usos finales de la energía, incluyendo el diseño conceptual de centros tecnológicos de energía.

- Diseño conceptual de exposición móvil con demostración de ahorro de energía para enseñanza básica y media.

- Análisis de la calidad de la energía.

- Modernización del área de generadores de la terminal marítima Dos Bocas, Tabasco.

- Asistencia técnica en Nohoch, Akal C. y Akal J., Campeche.

- Asistencia técnica en la terminal marítima Dos Bocas, Tabasco.

- Desarrollo de ingeniería básica de las salas de Energía, Energía Eléctrica, Otros Usos de la Energía y Exhibiciones Exteriores del Museo Tecnológico de la Comisión Federal de Electricidad.

- Auditoría del sistema eléctrico de TV Azteca.

- Desarrollo de la metodología para la administración de la demanda y el ahorro de energía en sistemas eléctricos industriales

- Determinación de áreas de oportunidad para el ahorro de energía en Pemex, distritos de Agua Dulce, Comalcalco, Ocosingo y Reforma.

- Asistencia técnica y evaluación del sistema eléctrico de la planta de Cuichapa, Veracruz.

- Asistencia técnica y evaluación del sistema eléctrico de la estación Tuzandépetl, Veracruz.

- Estudios de áreas de oportunidad para el ahorro de energía de la central de abastecimiento y bombeo Cunduacán, Tabasco.

Proyectos en desarrollo

- Diagnósticos energéticos de cien edificios del sector privado.

- Elaboración del proyecto y bases para el nivel de iluminación en Samaria II, Tabasco.

- Ingeniería del Centro Técnico Administrativo Tabasco 2000.

- Estudios de cortocircuito de la estación Giraldas, ubicada en el Distrito Reforma.

- Elaboración de los proyectos de norma de eficiencia energética en edificios no residenciales y en edificaciones para uso habitacional hasta de tres pisos.

- Estudios de coordinación de protecciones para la terminal marítima Dos Bocas, Tabasco.

- Estudio de flujos de carga y compensación de reactivos del sistema eléctrico de la terminal marítima Dos Bocas, Tabasco.

ROGELIO COVARRUBIAS RAMOS

Ingeniero electricista (1958) egresado del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Durante 18 años colaboró en la industria privada. Ingresó al IIE en 1977. Actualmente es el gerente de la



Unidad de Uso de Energía. Ha dirigido proyectos nacionales en colaboración con organismos internacionales y es coordinador nacional para la implementación del horario de verano en México y miembro del CIME, del IEEE, de la SAE y de la AIUME.

FRANCISCO GARCÍA JUÁREZ



Ingeniero industrial en eléctrica (1994) por el Instituto Tecnológico de Oaxaca. En 1994 ingresó al IIE. Actualmente es investigador en la Unidad de Uso de Energía. Se especializa en el ahorro de energía eléctrica en el área de iluminación. Ha trabajado en diversos proyectos relacionados con este tema tanto para la Conae como para Pemex y la CFE.



Actualidad y perspectivas del programa de normalización de la eficiencia energética en México

Henry Anli Chu Pulido e Itha Sánchez Ramos

Introducción

Las acciones para el uso racional de la energía han hecho que la opinión pública tome conciencia de la relación entre consumo de energía y medio ambiente. Estas actividades comenzaron en Estados Unidos de América y de ahí se difundieron a Canadá y Europa Occidental; a principios de esta década tomaron fuerza en Latinoamérica y Asia.

Algunos de los principales hechos para un uso racional de la energía son

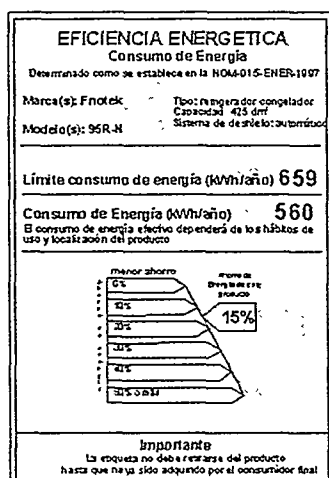
Las primeras normas de eficiencia energética de tipo obligatorio se implantaron en algunos estados de Estados Unidos, y en 1990 las adoptó el gobierno federal de ese país; a partir de entonces se han difundido por todo el mundo.

los programas de normalización de las eficiencias energéticas, los incentivos económicos, distintos mecanismos como la administración de la demanda y el etiquetado de productos que, en conjunto, han generando un mercado de productos eficientes que ayudan a disminuir la tasa de crecimiento de la demanda de energía [Landa, R. et al., 1996].

Lo anterior se reconoce como las estrategias más importantes para mejorar el uso de la energía en los sectores residencial, comercial e industrial.

Antecedentes de los programas de eficiencia energética en el mundo

Las primeras normas de eficiencia energética de tipo obligatorio se implantaron en algunos estados de Estados Unidos y en 1990 las adoptó el gobierno federal de ese país, el cual ha establecido la normativa de eficiencia energética para aparatos electrodomésticos e industriales [Code of Federal Regulations, 1991]. A partir de entonces se han difundido por todo el mundo. Esta normativa incluye valores de consumo límite, eficiencia y eficacia mínima, así como los métodos de prueba para la



Etiquetado de las NOM.

determinación de los valores especificados.

Por ejemplo, Green Lights, Energystars y el Golden Carrots son programas creados en Estados Unidos para promover e impulsar el ahorro de energía y que incentivan el uso de equipos de mayor eficiencia, al igual que la competitividad entre fabricantes.

En otros países se llevan a cabo programas similares como el Power Smart en Canadá; Green Seal y Eco Label en Estados Unidos; Sello Fide, Ilumex y Fipaterm en México; y programas de etiquetado en Brasil, Jamaica, Costa Rica, India, Korea, Filipinas, Tailandia, Australia y la Unión Europea. En algunos de estos países las etiquetas son obligatorias y en otros, voluntarias, pero todas persiguen un mismo fin: informar a los usuarios sobre el comportamiento energético del aparato etiquetado para que tal información influya en su decisión de compra.

México

En el marco del Programa Nacional de Modernización Energética (1990-1994) y del Plan Nacional de Desarrollo (1995-2000) se consideran como prioridad el uso racional de

Las normas de eficiencia energética incluyen valores de consumo límite, eficiencia y eficacia mínima, así como los métodos de prueba para la determinación de los valores especificados.

energía, la conservación de recursos energéticos y la protección al medio ambiente.

Dentro de estos lineamientos, la Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía (Conae) y el Fideicomiso de Apoyo al Programa del Sector Eléctrico (Fide) han desarrollado acciones para incentivar la conservación de energía en la industria, como programas de ahorro de energía dirigidos a los usuarios finales y un programa de normalización encabezado por la Secretaría de Energía (SE) [DUEE- IIE, 1993] para incrementar la eficiencia energética en aparatos domésticos e industriales

Particularmente, el programa de normalización de eficiencia energética que se ha desarrollado incluye la especificación del límite de consumo energético o eficiencia del equipo, un método de ensayo para determinar el rendimiento energético y la descripción de la etiqueta que informará a los usuarios sobre el comportamiento energético del equipo.

El punto de partida de la normalización en eficiencia energética

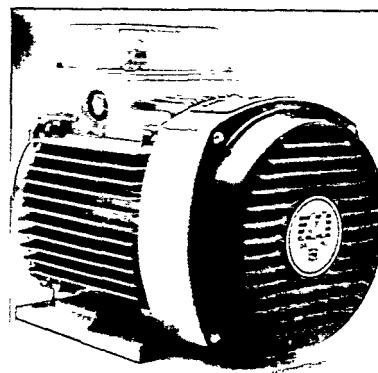
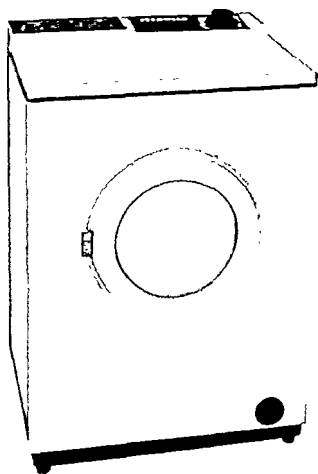
A partir de 1991, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), por encargo de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, ha desarrollado los soportes técnico-económicos para determinar los valores límite de eficiencia o consumo en los equipos y aparatos de uso doméstico e industriales, así como la formulación de los

proyectos de normas de eficiencia energética en el área eléctrica.

Este soporte técnico se desarrolló a partir de la recopilación de la información técnica y comercial que proporcionaron los fabricantes de equipos, las empresas suministradoras de electricidad y las entidades promotoras del propio programa; además, se realizó un análisis de la vanguardia tecnológica (conocida comúnmente como "estado del arte") en el mundo, lo que permitió revisar la base técnica de referencia y establecer las metas potenciales hacia las cuales se podría mover la fabricación nacional.

Se plantearon las barreras técnicas, económicas y sociales, y se analizó la factibilidad técnica y económica (estudio de beneficio costo) para establecer los valores viables de eficiencia energética en el entorno nacional. Estos valores de eficiencia y el método de prueba se concertaron con los distintos sectores involucrados en el proceso, dando lugar a los proyectos de norma de eficiencia energética (NOM).

Los proyectos de NOM mencionados se sometieron a su etapa de publicación para comentarios públicos de acuerdo con la Ley de Metrología y Normalización. La norma de eficiencia energética se adecua a los comentarios recibidos y se publica



en el *Diario Oficial de la Federación* como Norma Oficial Mexicana de Eficiencia Energética NOM-ENER.

A la fecha se han desarrollado normas para refrigeradores electrodomésticos, motores trifásicos (éstas ya cuentan con una segunda revisión), acondicionadores de aire tipo cuarto y tipo central, lavadoras de ropa electrodomésticas, bombas de uso doméstico, centrífugas,

verticales y sumergibles, sistemas de bombeo agrícola y sistemas de alumbrado en edificios (cuadro 1).

La implementación de estas normas ha ofrecido ventajas y beneficios al sector industrial, al usuario final y a las compañías suministradoras de energía eléctrica: ha mejorado la competitividad y la participación en mercados extranjeros para los industriales; los

En el marco del Programa Nacional de Modernización Energética (1990-1994) y del Plan Nacional de Desarrollo (1995-2000) se consideran como prioridad el uso racional de energía, la conservación de recursos energéticos y la protección al medio ambiente.

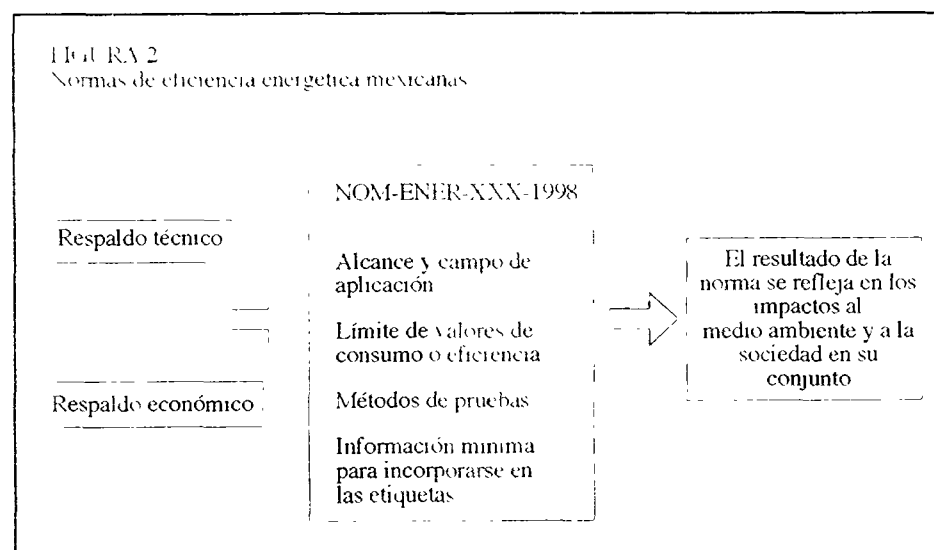
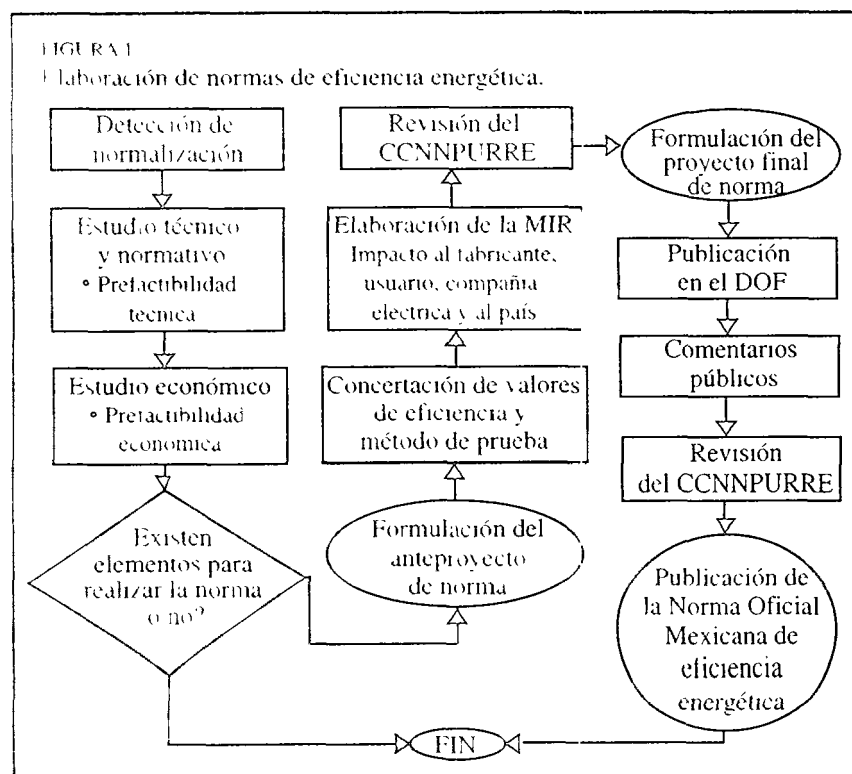
usuarios finales obtienen ahorros económicos en el pago de facturas de consumo; y para las compañías suministradoras de energía existe una disminución del crecimiento de la demanda que permite posponer o reprogramar inversiones en instalaciones de generación, liberando capacidad de generación eléctrica con base en el ahorro de energía. También el país se ha beneficiado al reducir las emisiones contaminantes y al disminuir el consumo de energéticos primarios.

Perspectivas del programa de normalización

A fines de 1997, la Conae solicita al IIE llevar a cabo una evaluación del programa de normalización de eficiencia energética de equipos y aparatos para conocer, identificar y evaluar el impacto real obtenido

hasta la fecha, los ahorros económicos y energéticos logrados, y el cumplimiento que se ha tenido. También se pretenden identificar las barreras y oportunidades que se han presentado en este proceso y, por tanto, brindar recomendaciones para su optimación.

A través de este estudio, la Conae obtendrá las bases reales para planear su política de normalización y emprender acciones preventivas y correctivas dentro de su programa de normalización que



CUADRO 1

Proyecciones de ahorro de los equipos y aparatos con la implementación de normas de eficiencia energética mexicanas (NOM), Conae.

<i>Aparato/características de mejora</i>	<i>Crecimiento de producción</i>	<i>Producción anual (unidades)</i>	<i>Factor de coincidencia</i>	<i>Proyecciones de ahorro de:</i>		
				<i>a) energía (GWh)¹ y</i>	<i>b) demanda (MW)²</i>	
				<i>a 5 años</i>	<i>a 10 años</i>	<i>a 15 años</i>
Refrigeradores	2.5% los dos	960 000	67.7%	a) 3 639	a) 17 601	a) 91 462
NOM-072-SCFI-94, vigor:	primeros años			b) 286	b) 769	b) 2 204
1° de enero de 1995.	y 5.3% después					
NOM-015-ENER-1997, vigor:	del tercer año.					
1° de agosto de 1997; 25% menos consumo actual para refrigeradores convencionales con deshielo manual; 13% menos del consumo actual para refrig./cong. con deshielo automático y parcialmente automático.						
Aire acondicionado	5%	160 000	75%	a) 1 518	a) 6 288	a) 29 430
NOM-073-SCFI-94, vigor:				b) 82	b) 191	b) 500
1° de enero de 1995.						
Valores de eficiencia energética REE de 8 a 9 para capacidades de 0.5 a 3 toneladas de refrigeración, 6% de mejora en la eficiencia en promedio.						
NOM-021-ENER-1998: proceso de publicación.						
Motores trifásicos	2%	150 000	35.7%	a) 2 503	a) 6 288	a) 38 870
NOM-074-SCFI-94, vigor:				b) 270	b) 569	b) 1 263
1° de enero de 1995.						
NOM-016-ENER-1997.						
Aumento de la eficiencia de 5 a 0.5 puntos porcentuales para capacidades de 1 hasta 200 CP.						
Alumbrado en edificios no residenciales	3-4%	1 000 000	50-80%	a) 2 083	a) 8 079	a) -
NOM-007-ENER-1995:				b) 164	b) 356	b) -
septiembre de 1996.						
Valores de densidad de potencia eléctrica de alumbrado que deben tener los edificios nuevos.						

CUADRO I
(Continuación)

Aparato/características de mejora	Crecimiento de producción	Producción anual (unidades)	Factor de coincidencia	Proyecciones de ahorro de:		
				a) energía (GWh) ¹ y b) demanda (MW) ²	a 5 años	a 10 años
					a 15 años	
Lámparas fluorescentes compactas NOM-017-ENER-1997: 1 de enero de 1999. Sustitución de 1.7% de la producción de lámparas incandescentes por lámparas fluorescentes compactas	7%	960 000	80%	a) 1 996 b) 293	a) 8 282 b) 704	a) - b) -
Lavadoras domésticas NOM-005-ENER-1995: 1 de mayo de 1997. 8% de mejora en la eficiencia global del sistema (6% del motor y 2% en la transmisión).	5%	1 000 000	0%	a) 128 b) 0	a) 513 b) 0	a) - b) -
Bombas domésticas NOM-004-ENER-1995: junio de 1996 Valores mínimos de eficiencia de 45% para bombas de hasta 1CP.	2.5%	300 000	30%	a) 84 b) 69	a) - b) -	a) - b) -
Motores monofásicos NOM-014-ENER-1997: 18 de octubre de 1998. Aumento de eficiencia de hasta 18 puntos porcentuales en capacidades de 0.25 hasta 1.5 CP	2%	150 000	35%	a) 1 086 b) 120	a) 4 120 b) 252	a) - b) -

Notas

¹Valores de ahorro de energía acumulados en el periodo
²Valores de potencia evitada en el año indicado

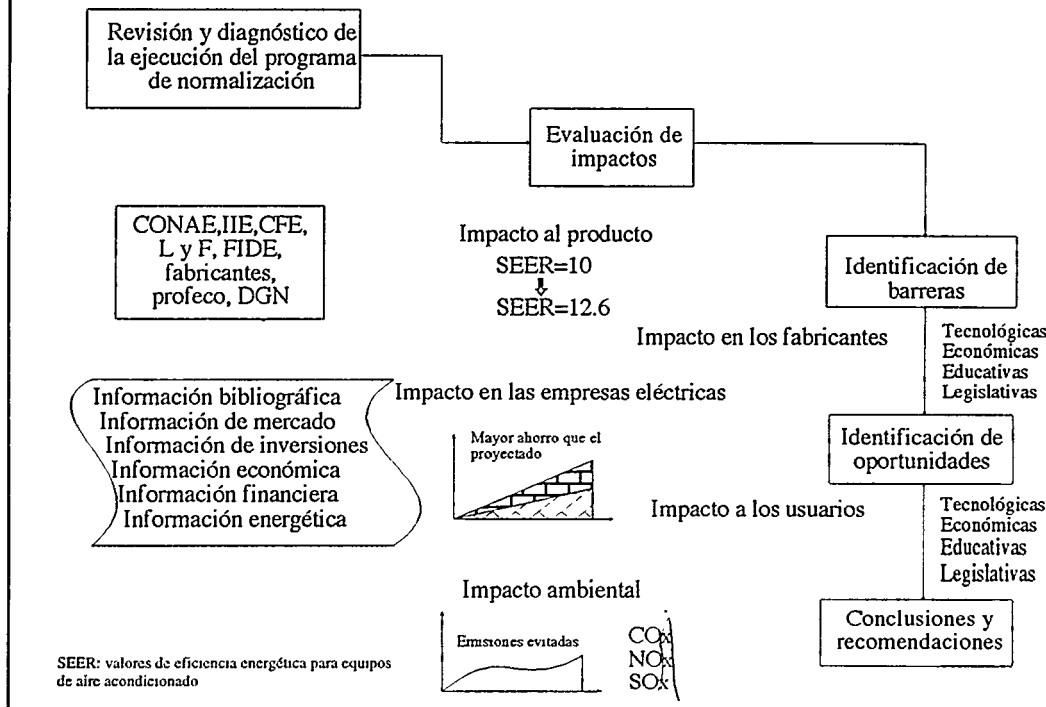
Particularmente, el programa de normalización de eficiencia energética que se ha desarrollado incluye la especificación del límite de consumo energético o eficiencia del equipo, un método de ensayo para determinar el rendimiento energético y la descripción de la etiqueta que informará a los usuarios sobre el comportamiento energético del equipo.

le servirán para alcanzar los objetivos de ahorro energético y la preservación del medio ambiente de una manera más consistente.

Se consideran diez normas para el análisis y comprenden los siguientes equipos: lavadoras de ropa electrodomésticas, refrigeradores domésticos, aire acondicionado tipo cuarto, motores de inducción

A partir de 1991, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, por encargo de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, ha desarrollado los soportes técnico-económicos para determinar los valores límite de eficiencia o consumo en los equipos y aparatos de uso doméstico e industriales, así como la formulación de los proyectos de normas de eficiencia energética en el área eléctrica.

FIGURA 3
Evaluación del programa de normalización.



equivalente en valor monetario.

- Impacto en los usuarios: se considera el incremento de precio de los equipos y su ahorro monetario por la reducción en su facturación.

- Impacto en el país: se estima la reducción en emisiones contaminantes a la atmósfera y los energéticos primarios ahorrados.

Teniendo el panorama global del programa de normalización, se

trifásicos, motobombas de uso doméstico, verticales, centrífugas, sistemas de bombeo y sistemas de alumbrado.

El análisis de impacto se desarrolla como sigue.

- Impacto en el producto: se

analizan los cambios y las modificaciones técnicas y económicas reales que han sufrido los equipos en relación con los valores usados para la evaluación original que dieron el soporte y la justificación para la emisión de las normas.

- Impacto en los fabricantes: con base en la información suministrada por los fabricantes, se revisan las variaciones en los valores de eficiencia de los equipos, su grado de cumplimiento con la norma y las ventas históricas por tipo, modelo y capacidad.

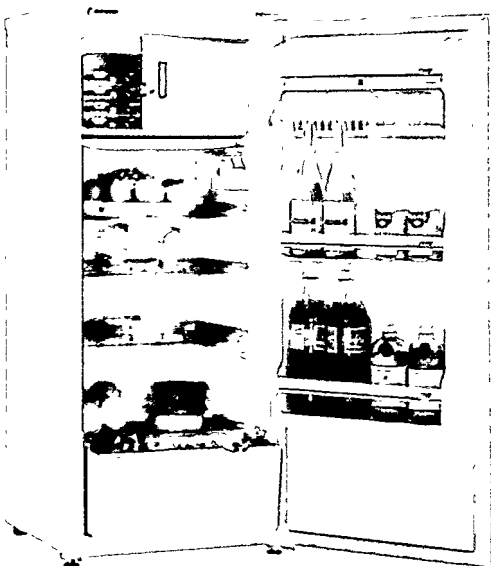
- Impacto en las empresas eléctricas: se estiman los ahorros energéticos (energía no generada y potencia evitada) y su

identificarán las barreras y oportunidades tecnológicas, económicas, educativas y legislativas encontradas por la aplicación de las normas de eficiencia energética.

Esto dará la pauta para llevar a cabo acciones que permitan reforzar y consolidar el programa de normalización en eficiencia energética y el desarrollo de propuestas de revisión y actualización de las normas.

El estudio se encuentra en desarrollo y en fecha próxima se publicarán los resultados.

Podemos prever que los ahorros energéticos serán mayores a los considerados en los estudios originales, debido a que en el mercado se encuentran equipos con eficiencias mayores a las establecidas en la normativa, por ejemplo, para refrigeradores se observa en un caso que tal eficiencia está por arriba de 40% de la normativa. Para lavadoras, las eficiencias en promedio superan un 15%.



Esto supone que podremos mover los valores de eficiencia hacia límites más ambiciosos, con la consecuente revisión técnico-económica. Por ejemplo, se podrá revisar la norma de refrigeradores hacia valores límite de líderes tecnológicos (DOE2001).

La Unidad de Uso de Energía del IIE se ha dedicado a dar apoyo al programa de normalización desde 1991, por lo que, con la realización de este análisis, se podrá dimensionar la importancia de este trabajo y así se explorarán, identificarán y cuantificarán otras posibilidades de ahorro y se sugerirá la planeación dentro de un esquema de prioridades de normalización.

Referencias

Code of Federal Regulations, Title 10: Energy, parts 400 to 499, 1° de enero de 1991.

DUEE-IIE, *Formulación de bases técnicas para normas de ahorro de energía en aparatos domésticos e industriales*, México, Distrito Federal, 1993.

Landa, R. e I. Sánchez, *Experiencias de normalización de ahorro de energía a nivel nacional y en Latinoamérica*, VIII Seminario IMP-IIE-ININ sobre especialidades tecnológicas, junio de 1996.

HENRY ANLI CHU PULIDO



Ingeniero eléctrico (1974) y maestro en administración de negocios por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). En 1977 ingresó al IIE. Actualmente es investigador de la Unidad de Uso de Energía. Se ha especializado en información tecnológica para la industria, y en administración y ahorro de la energía.

ITHA SÁNCHEZ RAMOS

Ingeniera mecánica electricista



egresada de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1992. Ese mismo año ingresó al IIE. Actualmente es investigadora de la Unidad de Uso de Energía. Su área de especialidad versa sobre la normalización de eficiencia energética en equipos y aparatos electrodomésticos. Ha trabajado en el desarrollo de normas de eficiencia energética de equipo y aparatos domésticos en México, en el desarrollo de proyectos de normas de eficiencia energética en Colombia y en el desarrollo de la evaluación del programa de normalización de eficiencia energética de la Secretaría de Energía de México. Ha publicado varios artículos sobre este tema.

Tecnología de sistemas híbridos solar-eólico para desarrollos ecoturísticos

Aplicaciones: *Iluminación
Refrigeración
Aire acondicionado*



Villas Carrousel en Playa del Carmen, Quintana Roo, primer desarrollo ecoturístico que satisface sus necesidades de energía eléctrica para iluminación con un sistema híbrido solar-eólico diseñado y construido por el IIE.

Mayores informes
Unidad de Energías No Convencionales del IIE
Teléfono (73) 18 38 11, extensión 7771.



Programas de ahorro de energía en Pemex Exploración y Producción, Región Sur

Guillermo González, Francisco García y
Mauricio Alarcón

Introducción

Los desarrollos tecnológicos de equipos ahorradores de energía constituyen una poderosa herramienta para la conservación y el ahorro de energía eléctrica en instalaciones nuevas o existentes.

Un proyecto de ahorro de energía eléctrica incluye el diagnóstico energético que permita realizar en forma efectiva la medición de diferentes parámetros y su análisis. De igual manera, el conocimiento de equipos y nuevas tecnologías es vital para este quehacer.

Otro punto generalmente ignorado para el ahorro de energía lo constituyen los programas de mantenimiento, tanto de equipos como de inmuebles, ya que sin esto se puede

Petróleos Mexicanos Exploración y Producción inició en 1997 un programa para el ahorro de energía en la Región Sur, para lo cual el Instituto de Investigaciones Eléctricas, a través de la Unidad de Uso de Energía, colaboró realizando diagnósticos energéticos en 115 edificios de dicha región.

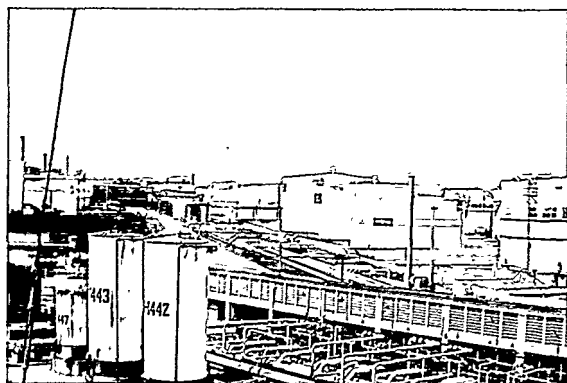
tener un efecto negativo en el rendimiento del personal o en la percepción de un área y en la seguridad de las personas. Asimismo, al no tener un mantenimiento adecuado, se desperdicia energía.

Petróleos Mexicanos (Pemex) Exploración y Producción inició en 1997 un programa para el ahorro de energía en la Región Sur, para lo cual el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), a través de la Unidad de Uso de Energía (UUE), colaboró realizando diagnósticos energéticos en 115 edificios de dicha región.

El IIE cuenta con personal experimentado en la elaboración de diagnósticos energéticos, así como con una gran cantidad de equipos y paquetes de cómputo, entre los que sobresalen más de cien medidores monofásicos y trifásicos, los cuales auxilian en las mediciones de variables eléctricas.

Metodología

La metodología para realizar diagnósticos energéticos se muestra en forma esquemática en la figura 1. Esta metodología está basada en dos etapas: la primera, en campo, consistió en el levantamiento de información por parte del personal del IIE en coordinación directa con los diferentes distritos; la segunda etapa, realizada en las



Se realizó el análisis de cada edificio y se presentaron diversas opciones para ahorrar energía, lo cual se acompañó de estudios de costo-beneficio.

instalaciones del IIE en Palmira, Morelos, consistió en el análisis, el procesamiento de datos y la evaluación de oportunidades de ahorro de energía.

Para el desarrollo de este trabajo, y debido a la diversidad de labores efectuadas en las diversas instalaciones, así como a la falta de información actualizada, se tuvieron que llevar a cabo las siguientes actividades en campo:

- Levantamientos de cargas y elaboración de diagramas unifilares, incluyendo datos del estado físico de cada instalación.
- Mediciones de variables eléctricas durante una semana para conocer el comportamiento diario de la instalación.
- Mediciones de iluminancia y temperaturas en distintas áreas para analizar el estado actual de los sistemas de aire acondicionado e

iluminación en cada instalación.

• Como una innovación a los diagnósticos se instalaron dispositivos registradores de tiempo de uso de sistemas de iluminación y ocupación de áreas, cuyo objetivo principal fue monitorear el tiempo que las personas permanecían en oficinas o áreas de trabajo, y que proporcionaron una información valiosa para determinar opciones de ahorro de energía.

Asimismo, se realizó el análisis de cada edificio y se presentaron diversas opciones para ahorrar energía, lo cual se acompañó de estudios de costo-beneficio.

Resultados

En virtud de la diversidad de instalaciones, a continuación se presentan los datos más relevantes del proyecto:

a) De los levantamientos de cargas se tiene un área total bajo estudio de 184 117 m², de los cuales, 57 413 m² corresponden a edificios de oficinas y los restantes, a talleres y almacenes.

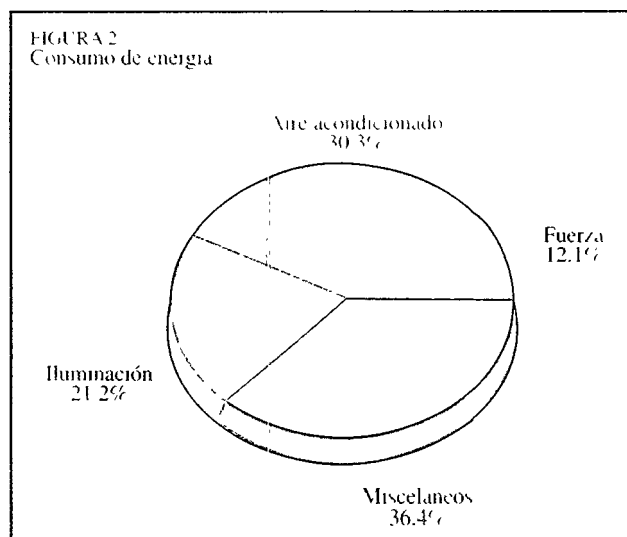
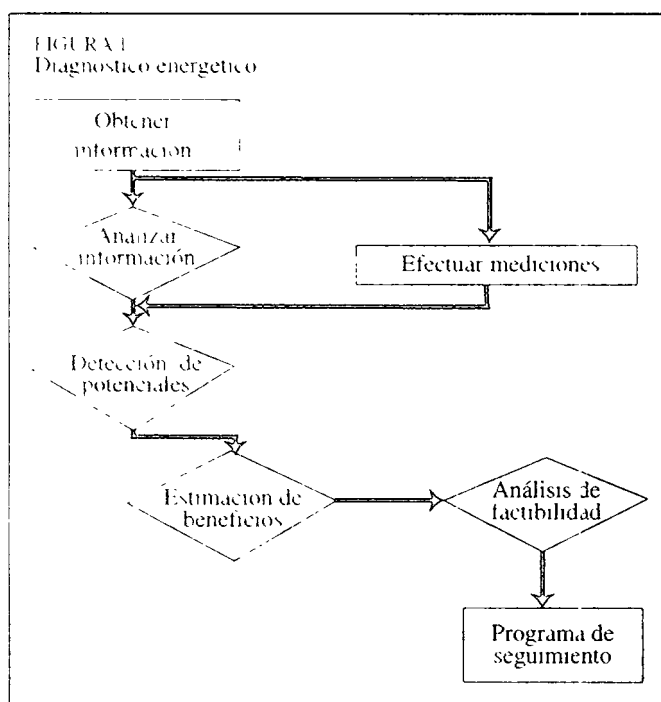
b) La carga total instalada es de

Los equipos de aire acondicionado e iluminación representan la parte más importante de las cargas conectadas permanentemente, por lo que el estudio se concentró en estas dos cargas.

8 910 kW, la cual se divide en cuatro grandes sectores como se muestra en la figura 2. Se hace notar que la tercera parte de la carga instalada (1 094 kW) se halla concentrada en tres instalaciones, lo cual indica que la carga de fuerza no es muy significativa para las demás áreas analizadas. De lo anterior resulta que los equipos de aire acondicionado e iluminación representan la parte más importante de las cargas conectadas permanentemente, por lo que el estudio se concentró en estas dos cargas.

c) Las mediciones de variables eléctricas (figura 3) se analizaron y se disgregaron para conocer y entender el comportamiento del inmueble estudiado.

d) Los sistemas centralizados de aire acondicionado se evaluaron con mediciones de variables eléctricas y se analizaron a través de un programa de *software* para verificar si la capacidad de dichos equipos era la adecuada, en tanto que para los equipos tipo ventana se hicieron recomendaciones



para mejorar su funcionamiento y reducir su consumo.

Dentro de este análisis se encontró que los equipos centralizados están bien dimensionados; sin embargo, el consumo de energía puede reducirse en 15% al llevar a cabo medidas sin inversión, tales como:

- Mantener el valor de referencia de los termostatos del sistema.
- Ajustar el termostato u otros controladores de temperatura en

espacios sin uso.

- Apagar el equipo de ventilación cuando el edificio o espacio no se ocupa.

- Realizar un preenfriamiento, sin introducir aire exterior, dos horas antes de iniciar labores.

- Mantener las puertas cerradas, ya sea por medio manual o a través de dispositivos conocidos como porteros.

- Eliminar fugas de aire.

- Poner protección en unidades tipo ventana para evitar el sol directo

Para los sistemas de aire acondicionado se estima entre 15 y 25% de ahorro de energía al poner en práctica las recomendaciones indicadas anteriormente, junto con programas de mantenimiento preventivo.

sobre el condensador.

- Ajustar bandas, calafatear juntas con fugas, reparar o reemplazar sellos en cubiertas de inspección y mejorar el aislamiento.

e) De las lecturas de iluminancia, así como de las mediciones efectuadas a través del sistema de los dispositivos de ocupación se encontró que:

- En la mayoría de las áreas de oficina, los niveles de iluminancia se encontraban por debajo de los recomendados debido a la falta de mantenimiento en los luminarios. Para poder efectuar recomendaciones, se hicieron cálculos de los sistemas de iluminación instalados y se procedió a evaluar las distintas alternativas para el ahorro de energía.

- En la mayoría de las áreas de oficinas privadas, donde se encuentran una o dos personas, el tiempo de ocupación varió entre 25 y 40%, entre las 8:00 y las 18:00 horas, en tanto que en áreas comunes, donde trabajan más de tres personas, dicho tiempo varió de 60 a 80%, permaneciendo el espacio vacío entre las 13:00 y las 15:00 horas (tiempo de comida); también se detectó que el sistema de alumbrado permanece encendido hasta las 22:00 horas con una ocupación de sólo 20 a 25% del personal. Se muestra una gráfica de resultados en la figura 4.

Por lo anterior, se propusieron alternativas para los distintos tipos de instalación tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Que los niveles de iluminancia calculados cumplieran con el valor mínimo requerido para las diferentes zonas de cada edificio.
- Que los ahorros en consumo y

FIGURA 3
Mediciones eléctricas.

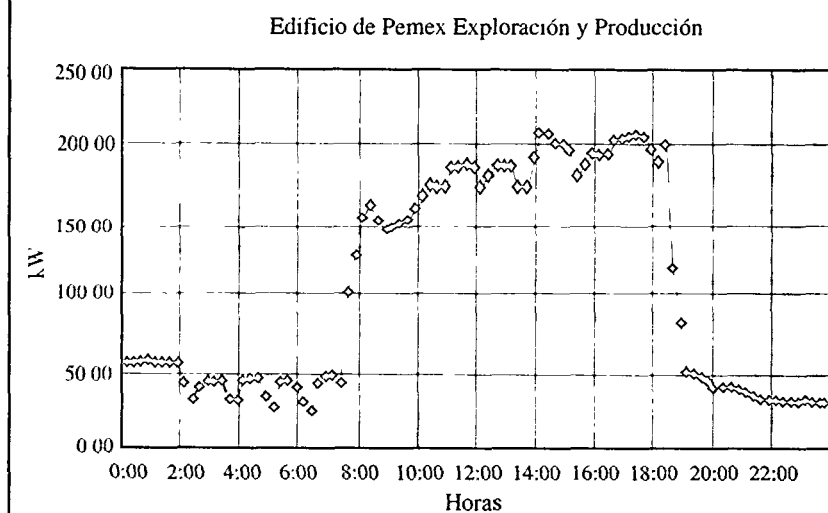
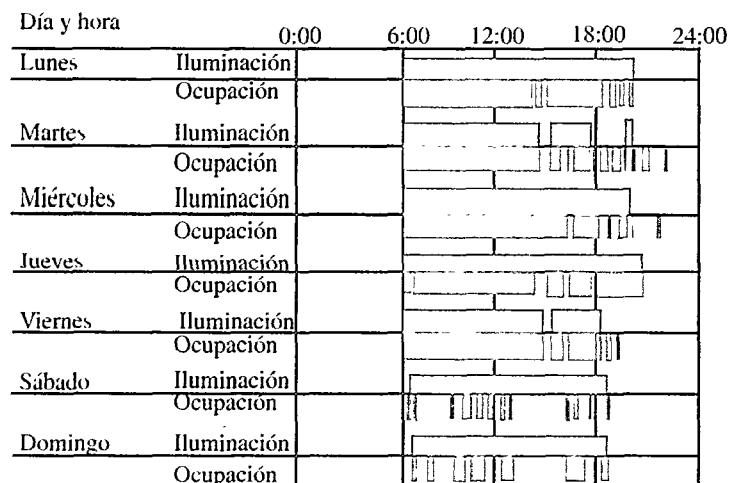


FIGURA 4
Gráfica de uso de la luz artificial.



En los sistemas de iluminación se estiman ahorros de 30 a 42% en el consumo y de 25 a 30% en la demanda, al implementar, en conjunto, las distintas propuestas

demanda de las propuestas fueran los más rentables.

En general, se presentaron las siguientes propuestas con su análisis de factibilidad para los sistemas de alumbrado:

a) Sustitución de lámparas convencionales T12 de 39 y 75 W actualmente instaladas por lámparas ahorradoras T12 de 32 o 60 W y balastro ahorrador, respetando la distribución actual.

b) Sustitución de lámparas convencionales T12 de 39 y 75 W actualmente instaladas por lámparas ahorradoras T8 de 32 o 60 W y balastro electrónico, respetando la distribución actual.

c) Instalación de reflector especular, lámparas T8 de 32 o 60 W y balastro para eliminar una o dos lámparas actualmente instaladas.

d) Sustitución de lámparas T12 actualmente instaladas por lámparas de 32 o 60 W con reflector especular; cambio de balastro convencional a ahorrador y ubicación de luminario donde se requiera (diseño nuevo).

e) En naves y cobertizos se recomendó el cambio de lámparas de luz mixta actualmente instaladas (250 y 500 W) por lámparas de vapor de sodio de alta presión de 100 y 150 W y, en algunos casos, se recomendó el cambio de luminario, ya que los instalados presentaban un coeficiente de utilización muy bajo.

Conclusiones

De los estudios y propuestas presentadas se calcularon los ahorros en los sistemas de aire acondicionado e iluminación:

- Para los sistemas de aire

acondicionado se estima entre 15 y 25% de ahorro de energía al poner en práctica las recomendaciones indicadas anteriormente, junto con programas de mantenimiento preventivo.

- En los sistemas de iluminación se estiman ahorros de 30 a 42% en el consumo y de 25 a 30% en la demanda, al implementar, en conjunto, las distintas propuestas.

Por otra parte, la elaboración de estos diagnósticos ha permitido al IIE aumentar su base de datos sobre forma y uso de energía en distintos tipos de edificios e instalaciones industriales, lo que en un futuro facilitará realizar estudios de administración del lado de la demanda en el país.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al personal técnico de Pemex Exploración y Producción por el apoyo brindado para realizar estos diagnósticos.

Referencias

IEEE recommended practice for energy conservation and cost-effective planning in industrial facilities, IEEE Std., pp. 739-1984.

Lighting handbook. Reference & application, Illuminating Engineering Society of North America, octava edición.

Motor master's energy efficiency motor database, Washington State Energy Efficiency, última edición.

Series of energy management and technical manual, Business & Government Energy Management Division, Energy Conservation Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canadá, 1989.

System design manual, Number One Air Conditioning Maker, Division of Carrier Corporation, Carrier Air Conditioning Company, Syracuse, Nueva York.

GUILLERMO GONZÁLEZ MILLA

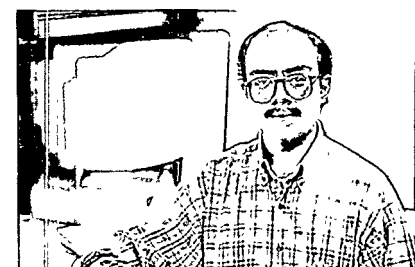
Ingeniero electricista (1974) egresado de la Escuela Superior de Ingeniería



Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Durante 18 años trabajó en la iniciativa privada en las áreas de mantenimiento, ingeniería industrial e ingeniería de diseño y construcción. En 1992 ingresó al IIE, en donde actualmente es investigador de la Unidad de Uso de Energía. Se especializa en el uso racional y eficiente de la energía.

FRANCISCO GARCÍA JUÁREZ
Ver currículum en la página 257.

JOSÉ MAURICIO ALARCÓN ALEMÁN



Ingeniero electricista (1994) egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). En 1995 ingresó al IIE. Investigador de la Unidad de Uso de Energía se especializa en el uso racional y eficiente de la energía eléctrica. Perteneció a la Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energética (ATPAE) y a la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) Ciudad de México.

Rehabilitación de los generadores de la central hidroeléctrica Ing. Carlos Ramírez Ulloa. Conclusiones del proyecto

Roberto Campuzano, Alejandro González,
Edgar Robles, Marcos Esparza, Javier García,
Ernesto Sánchez y José Luis Martínez

Resumen

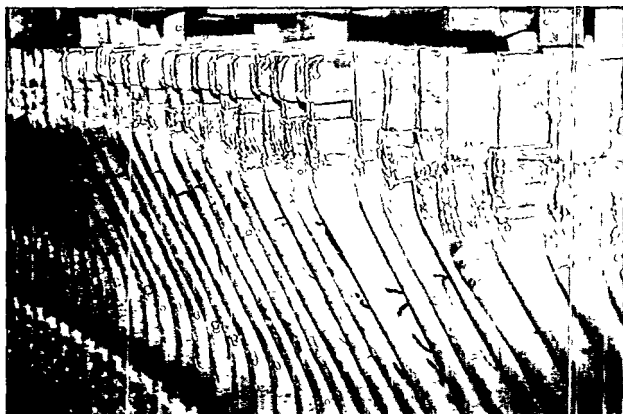
La central hidroeléctrica Ing. Carlos Ramírez Ulloa cuenta con tres generadores de 200 MW cada uno. La central inició su operación comercial en 1985. Los generadores tenían problemas de diseño que fueron debidamente corregidos en un programa de rehabilitación que inició en 1996, con el generador de la unidad 2, y culminó en 1998 con el de la unidad 1. En este artículo se presentan los aspectos relevantes de la experiencia acumulada en el proyecto.

Se efectuó un mantenimiento mayor a la central desde el punto de vista mecánico, eléctrico y civil. En este artículo se discuten exclusivamente los aspectos de la rehabilitación de los tres generadores. Los trabajos se llevaron a cabo en un proyecto de tres años.

Introducción

La central hidroeléctrica Ing. Carlos Ramírez Ulloa, también conocida como "El Caracol", es por su capacidad y localización, la de mayor importancia de la Subgerencia de Generación Hidroeléctrica Ixtapantongo en particular y para el Centro de Control de Energía (Cenace) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en general. Al tratarse de una central hidroeléctrica, se tiene la gran ventaja de que en caso de fallas en el sistema, los generadores pueden aportar los 200 MW que generan en un plazo no mayor a los cinco minutos, además se pueden operar a control remoto desde el Centro de Control de Acapulco. Por otro lado, los generadores están habilitados para operar como compensadores síncronos, por lo que cuando no están generando por bajos niveles de agua en la presa, aportan reactivos a la red. Es de suma importancia que la central se encuentre en condiciones óptimas para cumplir con sus funciones.

Se efectuó un mantenimiento mayor a la central desde el punto de vista mecánico, eléctrico y civil. En este



artículo se discuten exclusivamente los aspectos de la rehabilitación de los tres generadores. Los trabajos se llevaron a cabo en un proyecto de tres años, donde se aprovechó la temporada anual de estiaje para rehabilitar una unidad por año. El proyecto fue dirigido por ingenieros de la Subgerencia de Generación Hidroeléctrica Central de la CFE, con la colaboración de ingenieros de la propia central y el apoyo de investigadores de la Unidad de Equipos Eléctricos del IIE. Las operaciones de desensamble y montaje de los generadores las realizaron los trabajadores de la central.

Los tres generadores presentaban defectos similares que fueron debidamente corregidos. Uno de los principales defectos fue el empaque incorrecto de las bobinas del estator que al estar indebidamente ajustadas generaron problemas de descargas en la sección activa. En este artículo se presenta el patrón de deterioro que sufren las bobinas de acuerdo con su posición relativa en la ranura (superior o inferior) y con el gradiente eléctrico de operación al que están sometidos al estar conectados en estrella aterrizada.

Los generadores se evaluaron después de los cambios efectuados en el devanado de estator. La evaluación se llevó a cabo mediante

Los generadores se evaluaron después de los cambios efectuados en el devanado de estator. La evaluación se llevó a cabo mediante la medición de descargas parciales fuera de línea y en línea. Las evaluaciones en línea se efectuaron con dos sistemas de adquisición diferentes: con el equipo que está instalado permanentemente en los generadores (sistema FES) y con un equipo de adquisición digital de descargas llamado ICM (Insulation Condition Monitor).

la medición de descargas parciales fuera de línea y en línea. Se presenta una comparación de las lecturas obtenidas antes y después de la rehabilitación. Las evaluaciones en línea se efectuaron con dos sistemas de adquisición diferentes: con el equipo que está instalado permanentemente en los generadores (sistema FES) y con un equipo de adquisición digital de descargas llamado ICM (Insulation Condition Monitor).

Proyecto de rehabilitación de los generadores

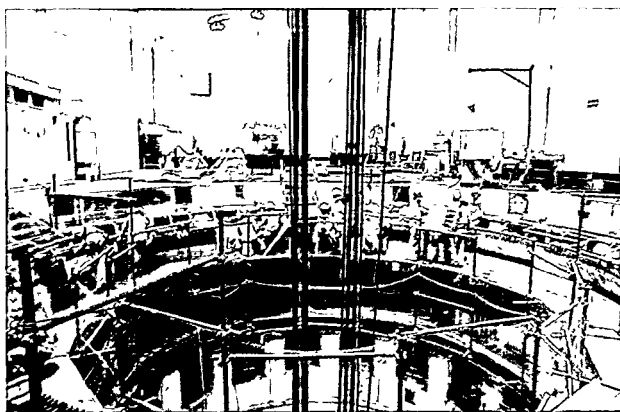
Durante las evaluaciones dieléctricas efectuadas a los tres generadores se identificaron errores de diseño y defectos de manufactura que ponían en riesgo la integridad de los

generadores. En 1994 se retiraron algunos bastones del devanado de estator de la unidad 2 y se observó, entre otros defectos, que el aislamiento se encontraba en un proceso acelerado de erosión por la acción de las

descargas externas. Este patrón de envejecimiento se registró en las tres máquinas, por lo que el proyecto de rehabilitación del devanado del estator de los generadores surge por la necesidad de detener el proceso de envejecimiento del sistema aislante.

Los reparadores nacionales y fabricantes extranjeros ejercen una fuerte presión para que en casos como éste se cambie el devanado completo, de lo contrario, no ofrecen ninguna garantía. En este sentido, el principal reto de la rehabilitación fue lograr la mayor seguridad del equipo al menor costo posible. Todos los generadores hidráulicos en nuestro país utilizan enfriamiento de aire forzado, la potencia máxima por circuito, que en un generador de este tipo puede ser del orden de los 50 MW por circuito. Consecuentemente, los generadores de "El Caracol" requieren cuatro circuitos. Cada máquina utiliza 1 056 bastones para formar el devanado. El costo de cada devanado es del orden de un millón doscientos mil dólares. El cambio de los tres devanados requería una inversión de tres millones seiscientos mil dólares.

De los análisis efectuados se llegó a la conclusión de que la mayoría de los bastones podían ser rehabilitados. Con los bastones de repuesto que existían, unos 70, y con la compra de un tercio de devanado (352 bastones), se efectuó la rehabilitación de los tres estatores a un costo de 10% (\$390 mil dólares) de lo que se hubiera invertido si se hubiera adquirido el devanado completo. Fue necesario evaluar cuidadosamente cada bastón, rehabilitarlo y clasificarlo, para determinar su colocación en el devanado, lo cual se hizo tomando en cuenta el gradiente eléctrico de operación. Estas actividades significaron un ahorro del orden de tres millones de dólares para la



Comisión Federal de Electricidad.

Cambios efectuados en los devanados

En el cuadro 1 se resumen los principales defectos encontrados en los devanados, las consecuencias de los mismos, las acciones correctivas aplicadas y los beneficios obtenidos con las medidas implantadas. Como puede observarse en el cuadro 1, todos los defectos estaban centrados en el devanado del estator. Es importante comentar que el generador de la unidad 2, primero en rehabilitarse, tuvo una falla del sistema de lubricación de las chumaceras, por lo que el generador se inundó de aceite, que al mezclarse con la contaminación, provocó una falla entre fases en el cabezal

Con los bastones de repuesto que existían, unos 70, y con la compra de un tercio de devanado (352 bastones), se efectuó la rehabilitación de los tres estatores a un costo de 10% (\$390 mil dólares) de lo que se hubiera invertido si se hubiera adquirido el devanado completo.

inferior. La falla entre fases evolucionó posteriormente a una falla trifásica y provocó, además, un cortocircuito entre vueltas en dos de los devanados polares; curiosamente, los polos afectados se encontraron opuestos 180° uno del otro.

La rehabilitación del generador de la unidad 2 fue la que representó el mayor reto por dos razones primordiales: el generador salió por falla, lo que causó daños a las

bobinas adyacentes a los sitios de falla y la definición sobre la marcha de los aspectos operativos del proyecto, y al ser la primera máquina en rehabilitarse, se tuvieron que definir los siguientes aspectos:

1. Establecimiento de una logística de operación:

- Acondicionamiento de áreas de trabajo en la planta.

- Horno de secado de las bobinas.

- Métodos de trabajo.

- Asignación de tareas.

- Manejo de bastones.

2. Diseño de componentes:

- Elementos de ranura.

- Conectores entre bastones.

- Aislamiento de "capuchones".

- Elementos de sujeción del cabezal.

CUADRO 1

Resumen de las principales actividades de la rehabilitación del devanado de estator de los tres generadores de la central hidroeléctrica Ing. Carlos Ramírez Ulloa.

<i>Defecto detectado</i>	<i>Consecuencias</i>	<i>Cambio efectuado</i>	<i>Beneficios</i>
• Bastones holgados. Error de dimensiones del sistema aislante.	• Erosión del aislamiento por fricción mecánica y descargas. • Falla eventual.	• Sistema de empaquetado - Sistema "Round-Packing".	• Ajuste exacto y amortiguamiento de vibración. • Eliminación de descargas a la ranura.
• Área de contacto insuficiente en las interconexiones de los bastones. Mal diseño de conectores y proceso inadecuado de soldadura.	• Puntos calientes en el devanado. • Envejecimiento de aislamiento de interconexiones ("capuchones")	• Cambio en el sistema de interconexión. - Nuevo diseño de casquillo. - Evaluación de soldadura por ultrasonido.	• Eliminación de puntos calientes. • Reducción de pérdidas por I^2R .
• Deficiente aislamiento de interconexión de bastones. Material inflamable con gran contenido de cavidades.	• Cortocircuito entre fases. • Propagación de la flama en caso de incendio.	• Cambio del sistema de aislamiento. - Aislamiento de resina epóxica, clase F, libre de cavidades, resistente a las descargas, no propaga la flama.	• Eliminación del riesgo de falla entre fases.

3. Adquisición y requisición de componentes:

- Bobinas de repuesto.
- Soldadura, elementos de empaque, materiales aislantes, amarres, rellenos.
- Equipo para soldar con alta frecuencia y adaptación o diseño de electrodos.

4. Definición de métodos de prueba y criterios de evaluación:

- Clasificación de defectos; fallas en el conductor, en la pintura conductora o graduadora, y en el aislamiento principal; problemas de traslape entre pinturas graduadora y conductora; uniformización de la distancia de la pintura conductora.
- Establecimiento de los criterios de calidad: resistencia superficial de pintura conductora y graduadora, índice de polarización, capacitancia y tan δ , nivel máximo permitido de descargas parciales, nivel de voltaje aplicado y tiempo de aplicación.
- Conectores entre bastones
- Aislamiento de "capuchones", materiales empleados, formulación de resina epóxica, método para evitar problemas de contracción de la resina, proceso para evitar cavidades.

5. Definición de métodos de ensamble del generador:

- Inserción de bobinas en la ranura.
- Establecimiento del proceso de control de calidad, prueba de potencial aplicado a secciones de la primera cama.
- Pruebas para establecer calidad de conectores y proceso de soldado.
- Aplicación de pruebas a secciones del devanado antes de

Los generadores estuvieron operando en condiciones de altas descargas externas por un periodo de entre 11 y 13 años y ninguno de ellos salió por falla originada por descargas parciales en la región activa. Es obvio que no conviene averiguar cuando pudo ocurrir, pero se tiene una referencia de tiempo importante para situaciones futuras.

conexión de puentes.

- Realización de amarres en cabezales.
- Colocación de aislamiento de conectores ("capuchones").

6. Pruebas finales al generador y puesta en servicio:

- Proceso de secado del generador; conexión en cortocircuito del generador para secado con corriente.
 - Realización de pruebas dieléctricas, índice de polarización, descargas parciales, capacitancia y tan δ y prueba de voltaje aplicado.
 - Puesta en servicio del generador, proceso de estabilización de temperaturas, proceso de toma de carga.
 - Evaluación del generador en línea, revisión de temperaturas en cabezales con termografía y medición de descargas parciales.
- La necesidad de usar las mismas bobinas obligó a efectuar una

cuidadosa clasificación del material disponible. Inicialmente se habían desechado bastones que se dañaron en el proceso de desconexión porque se estaba utilizando un equipo eléctrico para soldar que utiliza electrodos de carbón que requiere aplicar alta temperatura durante mucho tiempo; el calor se propaga y afecta el aislamiento de las bobinas y por lo tanto causa daños severos al conductor. Posteriormente se usó un equipo de alta frecuencia que tiene la ventaja de concentrar el calor en el conductor, que lo calienta rápidamente, por lo que el efecto que tiene en el aislamiento es menor.

Los bastones se clasificaron en función de sus características dieléctricas, y esto se hizo en tres niveles: los que obtuvieron mejores resultados se clasificaron nivel I; los que tuvieron un nivel medio fueron nivel II, y los que tenían las características dieléctricas más bajas, pero que podían utilizarse sin ningún problema, se les asignó el nivel III. Los resultados obtenidos en los tres generadores se muestran en el cuadro 2.

Aunque no fue la única condición de rechazo, se puede decir, de manera general, que aquellos bastones que estaban afectados por las descargas fueron los que causaron el mayor índice de reemplazo. Se

CUADRO 2

Clasificación de bastones de acuerdo con sus condiciones dieléctricas.

Generador	Clasificación							
	I		II		III		Totales	
	Internos	Externos	Internos	Externos	Internos	Externos	Internos	Externos
1	300 57%	238 45%	118 22%	92 17%	73 14%	90 17%	491 93%	420 80%
2	307 60%	129 24%	162 30%	260 49%	59 10%	102 19%	528 100%	491 93%
3	285 54%	134 25%	111 21%	102 19%	95 18%	206 39%	491 93%	442 84%

observa en el cuadro 2 que un alto número de bastones internos se recuperó y también que un gran porcentaje de ellos se clasificó en el nivel I, esto es, aquellos con las mejores características dieléctricas (entre 54 y 58%). Conviene resaltar que en teoría sólo se requería un tercio del devanado que tuviera estas características. Se recuperó casi el total de bastones internos; en las unidades 1 y 3 sólo tuvieron que utilizarse 37 bastones internos nuevos para completar la primera cama del devanado. Este hecho resultó muy favorable, debido a que la cama interna es la primera que se coloca en el devanado y aunque en la unidad 2 no se contaba con todo el material de repuesto necesario, el efecto que tuvo en el programa de trabajo fue mínimo.

La tendencia no es la misma en el caso de los bastones externos; en las unidades 1 y 3 se requirieron entre 16 y 20% de bastones externos adicionales y el número de bastones externos con clasificación I también fue considerablemente menor. En el caso particular de la unidad 2, se requirió sólo 7% de los bastones. Esta situación se originó por dos situaciones anómalas: en primer lugar, en este generador se encontraron bastones extremadamente afectados que se cambiaron antes de que ocurriera la falla. Se extrajo un bastón que estaba afectado por los conductores de un RTD (Resistance Thermal Device). Con las descargas se afectó el aislamiento del RTD interno y sus conductores sirvieron como referencia de tierra, por lo que la pared contigua a los conductores del RTD afectaron severamente al aislamiento. Se consideró un alto riesgo e incluso se tuvo que cambiar el bastón interno. Se substituyeron aproximadamente 25 bastones

El personal de la planta adquirió un conocimiento profundo del diseño y construcción de los generadores que seguramente va a resultar de gran valor para las actividades normales de mantenimiento. Los niveles de descargas se redujeron significativamente y se conoce cuál es su origen, por lo tanto, cualquier cambio que se presente en el futuro puede ser cuidadosamente analizado cuando el generador se vea sujeto a alguna eventualidad.

externos y uno interno. La segunda condición anómala se dio porque se hizo la requisición para adquirir el tercio de bastones de repuesto que se había estimado para utilizar en cada generador, pero por razones administrativas no fue posible obtenerlos a tiempo y se generó presión para usar bastones disponibles y cumplir con el programa de trabajo establecido.

De la realización del proyecto se obtienen conclusiones muy importantes que pueden servir de referencia para aplicarse en reparaciones similares que haya necesidad de realizar en el futuro:

- Los bastones internos de un devanado no son afectados seriamente por problemas de descargas externas en la zona activa, también llamadas descargas a la ranura. En el caso particular de estas unidades se requirió sólo 7% de devanado.

- En un generador que opera a 16 kV se afecta un 20% de las bobinas externas como máximo. Antes de desarmar el devanado se había considerado un 30% de devanado adicional, que no fue necesario.

- Los RTD de medición se ven afectados por las descargas; en caso de falla de uno de ellos es importante que se determine la causa, pues

puede estar afectado por las descargas y se vuelve un punto potencial de falla muy peligroso.

- Los generadores estuvieron operando en condiciones de altas descargas externas por un periodo de entre 11 y 13 años y ninguno de ellos salió por falla originada por descargas parciales en la región activa. Es obvio que no conviene averiguar cuándo pudo ocurrir, pero se tiene una referencia de tiempo importante para situaciones futuras.

Análisis del comportamiento dieléctrico en línea y fuera de línea

Mediciones fuera de línea

La magnitud de descargas a la ranura —que se presentaba en los devanados de los tres generadores de la central— era de 80 a 100 nC, medidas a un voltaje de prueba de sólo 3.5 kV. Después de la rehabilitación de los bastones y del cambio del sistema de empaque de los mismos, las descargas a la ranura se eliminaron. Las descargas que ahora se presentan en el devanado rehabilitado tienen una magnitud del orden de 15 nC al voltaje nominal de operación del generador, 16 kV. En la figura 1 se muestra la comparación del nivel de descargas registrado en la fase C del generador de la unidad 2 antes y después de ser rehabilitado.

Al eliminarse las descargas externas con un correcto empackado de las bobinas en las ranuras, el nivel de las descargas se redujo significativamente. La reducción fue casi de un orden de magnitud. Las fases de todos los generadores tuvieron un comportamiento muy parecido. Con esta reducción en la actividad de descargas, se logró cumplir con uno de los principales objetivos de la rehabilitación, que fue eliminar el peligro latente de una

falla catastrófica en los devanados.

Mediciones en línea

Los generadores están equipados con un sistema para medir descargas parciales en línea. Este sistema consta de capacitores de 80 pF instalados en cada ramal del devanado. El registro de las señales se realiza en una caja de conexiones donde se concentran las terminales e impedancias de medición de todos los capacitores. A través de estas conexiones se efectúa el registro de las descargas con el sistema de adquisición del equipo suministrado por FES. Este sistema lleva a cabo la medición a través de un amplificador diferencial, por lo que en cada medición utiliza un par de

conexiones. Así, se obtienen seis registros (uno por cada par de acopladores). En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos con este sistema antes y después de la rehabilitación.

Se utilizó esta caja de conexiones para registrar las descargas en línea con otro sistema de adquisición denominado ICM. Este equipo efectúa la medición utilizando un solo sensor a la vez; su amplificador tiene un ancho de banda de 40 a 800 kHz. Con este equipo de

medición, los registros de descargas se hicieron antes y después de la rehabilitación. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

En la figura 3 se muestran los mapas de descargas parciales logrados en el acople C2' de la fase

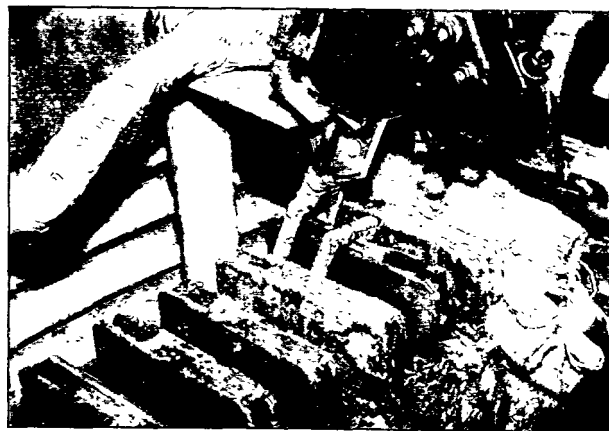


FIGURA 1

Características de descargas de la Fase C del generador de la unidad 2 antes y después de la rehabilitación. Mediciones registradas fuera de línea.

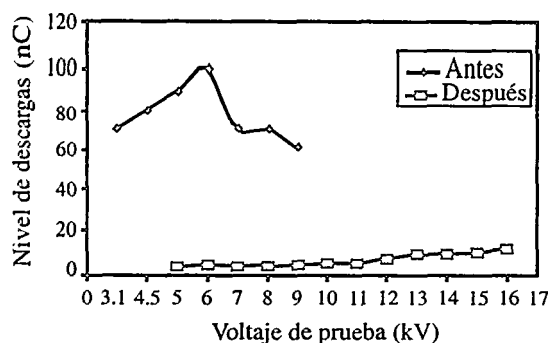


FIGURA 2

Nivel de descargas parciales registrados en línea antes y después de la rehabilitación.

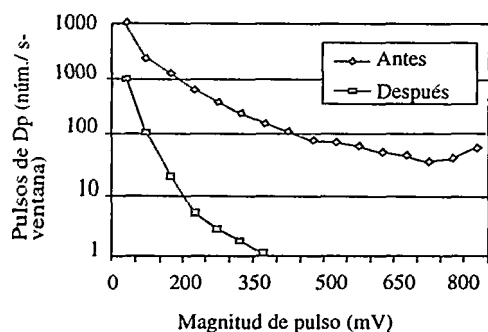


FIGURA 3

Mapa de descargas obtenido en el acoplador C2, fase C, generador de la unidad 1 a 200 MW, antes y después de la rehabilitación.

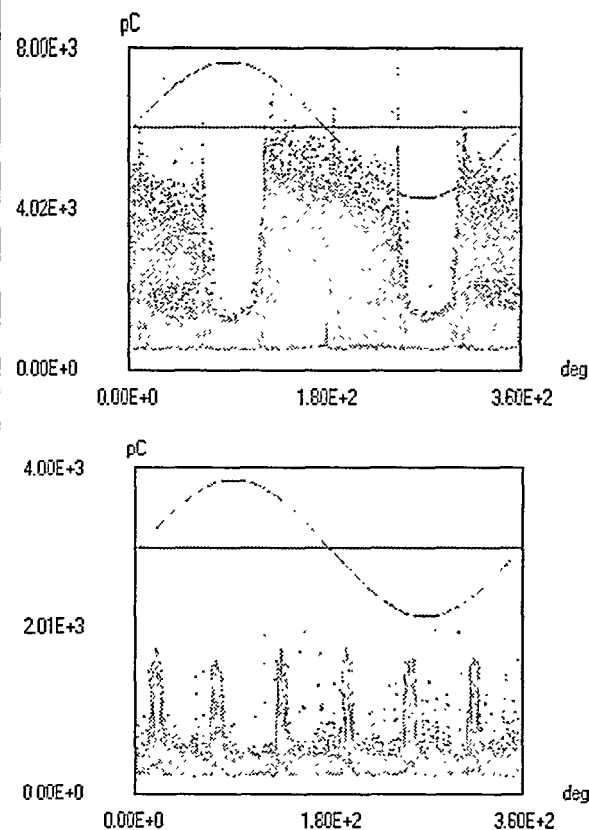
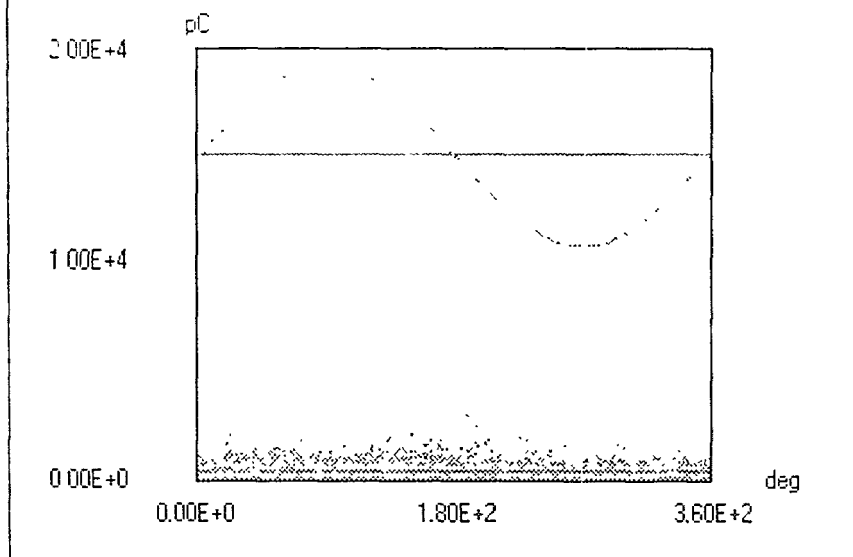


FIGURA 4

Mapa de descargas obtenido en el acoplador C2 de la fase C del generador de la unidad 1 con 175 MW de carga después de la rehabilitación. Frecuencia de medición 4 MHz



C. Las dos mediciones se efectuaron con el generador conectado al sistema y con una carga de 200 MW.

Los cambios efectuados en el devanado redujeron significativamente la intensidad y magnitud de las descargas, como puede observarse en la figura 3. La reducción se atribuye a la eliminación de las descargas a la ranura, a la utilización de felpas para graduar el campo eléctrico entre bastones adyacentes y a la ubicación de bastones en el devanado, de acuerdo con las condiciones dieléctricas de cada uno de ellos.

Para incrementar la sensibilidad del equipo de medición durante el registro de las descargas en línea, se utilizó un analizador de espectros que permite efectuar la adquisición de señales a mayores frecuencias. Con esta técnica, y sintonizando la frecuencia de medición a 4 MHz, se efectuó nuevamente el registro de las descargas en el acople C2' de la fase C, cuando el generador se encontraba

operando con una carga de 175 MW. El mapa obtenido se muestra en la figura 4. No se registró actividad de descargas en este acople, como puede observarse en la figura 4.

Conclusiones

Concluyó con éxito la rehabilitación de las tres unidades de la central hidroeléctrica Carlos Ramírez Ulloa después de culminar un proyecto de tres años. Se corrigieron los problemas de diseño y manufactura que ponían en riesgo la seguridad de los generadores. El personal de la planta adquirió un conocimiento profundo del diseño y construcción de los generadores que seguramente va a resultar de gran valor para las actividades normales de mantenimiento. Como se discutió en este artículo, los niveles de descargas se redujeron significativamente y se conoce cuál es su origen, por lo tanto, cualquier cambio que se presente en el futuro puede ser cuidadosamente analizado cuando el generador se vea

sujeto a alguna eventualidad.

Además del conocimiento técnico adquirido y de culminar satisfactoriamente un proyecto de esta naturaleza, es importante resaltar nuevamente que el ahorro económico fue significativo, sin dejar de mencionar la capacitación "en campo" que adquirimos todos los participantes.

**IGNACIO ROBERTO
CAMPUZANO MARTÍNEZ**



Ingeniero electricista (1989) por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y maestro en ciencias (1994) por la Universidad de Salford, Reino Unido. En 1988 ingresó al IIE. Actualmente es investigador de la Unidad de Equipos Eléctricos. Se especializa en sistemas aislantes de máquinas rotatorias de alta tensión. Tiene publicaciones relacionadas con la evaluación de sistemas aislantes en sitio, identificación de mecanismos de deterioro mediante pruebas de laboratorio e integración de técnicas de evaluación de generadores en línea. Es jefe del proyecto de rehabilitación de los generadores de las unidades 1 y 3 de la central hidroeléctrica Ing. Carlos Ramírez Ulloa, El Caracol.

**ALEJANDRO ESTEBAN
GONZÁLEZ VÁZQUEZ**

Ingeniero eléctrico egresado en 1996 de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. En 1996 ingresó

Mecanismos de deterioro de generadores eléctricos

Arturo García, Oscar Reyes, Edgar Robles,
Marcos Esparza, J. Ernesto López,
Alfredo Medina y Manuel Uribe

Resumen

Es de suma importancia conocer los mecanismos de deterioro que sufre un generador para tomar medidas correctivas que detengan el proceso, con el fin de evitar daños catastróficos que impliquen salidas no programadas para dar mantenimiento o, incluso, para efectuar la rehabilitación. En este artículo se discuten los mecanismos de deterioro que se han encontrado en el estator (devanado y núcleo) y el rotor de generadores térmicos e hidroeléctricos por el proceso natural de envejecimiento y por operación anormal.

Introducción

Los generadores eléctricos son de gran importancia para los sistemas eléctricos de potencia; su salida por falla origina severas repercusiones y grandes pérdidas para las compañías suministradoras de electricidad, ya que dejan de generar niveles importantes de energía. En caso de una reparación mayor, la rehabilitación de una máquina puede tomar de seis meses a un año para estar en posibilidad de conectarla nuevamente al sistema.

Los rangos de potencia y tipo de

Por el alto nivel de potencia que manejan los generadores, están sujetos a esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales que deterioran gradualmente sus componentes y que en caso extremo pueden llevarlos a fallar.

generadores son muy amplios; se cuenta con generadores de plantas turbogás que tienen una potencia de salida del orden de 30 a 45 MW a 13.8 kV, típicos de las unidades de fuerza que utiliza Petróleos Mexicanos (Pemex) y de las plantas de ciclo combinado de la Comisión Federal de Electricidad (CFE); los generadores de centrales termoeléctricas varían en rangos de 100 a 350 MW a voltajes de generación de 20 kV. En México, los generadores de mayor capacidad son los de la central nucleoelectrica Laguna Verde, que tienen una potencia de salida de 600 MW y que generan a 20 kV. En cuanto a las centrales hidroeléctricas, todos los generadores se enfrían con aire forzado y la capacidad típica es del orden de los 200 MW. El voltaje de generación varía entre 13.8 y 16 kV. Los generadores hidroeléctricos de mayor capacidad en nuestro país son los de la central hidroeléctrica Aguamilpa, que tienen una capacidad de 340 MW a 13.8 kV.

Por el alto nivel de potencia que manejan los generadores, están sujetos a esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales que deterioran gradualmente sus componentes y que en caso extremo pueden llevarlos a fallar. Es importante conocer con claridad los mecanismos de deterioro a los que se ven sometidos, centrar la atención en las variables significativas que identifican el proceso y tomar acciones correctivas para evitar que se cumpla el

El deterioro de los generadores depende fundamentalmente del tipo de generador que se trate: ya sea de centrales hidroeléctricas o de centrales termoeléctricas; de la potencia de salida y del sistema de enfriamiento utilizado.

proceso completo y falle el generador.

La CFE, a través de la Gerencia de Ingeniería Eléctrica del Comité de Especialistas de Máquinas Eléctricas Rotatorias de la Oficina de Sistemas Eléctricos del Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (Lapem) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) a través de la Unidad de Equipos Eléctricos, han tenido la oportunidad de inspeccionar una serie de fallas que les permiten establecer una serie de mecanismos de deterioro que sufren los generadores. El deterioro de los generadores depende fundamentalmente del tipo de generador que se trate: ya sea de centrales hidroeléctricas o de centrales termoeléctricas; de la potencia de salida y del sistema de enfriamiento utilizado.

Los generadores que operan en México se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Por el tipo de central: turbogeneradores de polos lisos (alta velocidad) e hidrogeneradores de polos salientes (baja velocidad).
- Por el tipo de enfriamiento utilizado: enfriamiento con aire indirecto en estator y rotor; enfriamiento con aire, indirecto en estator, directo en rotor; enfriamiento con hidrógeno indirecto en estator y rotor; enfriamiento con hidrógeno directo en estator y rotor; y enfriamiento con hidrógeno directo en rotor y agua en estator.
- Por el tipo de operación: planta para alimentar carga base y planta para alimentar carga pico.

En el cuadro 1 se presenta una

clasificación de los mecanismos de deterioro que puede sufrir un generador agrupado en función del defecto que lo origina, el proceso de deterioro y la consecuencia última que puede ocurrir en caso de no tomar acciones preventivas.

Descripción de los mecanismos de deterioro

Desajuste de las bobinas del estator en las ranuras

Las bobinas del estator deben quedar perfectamente ajustadas en las ranuras para soportar los esfuerzos electromagnéticos a los que se ven sometidos por la acción del rotor; si la barra tiene libertad de movimiento [Campuzano, R. *et al.*, 1993], se fricciona contra la pared de la ranura y origina la pérdida de pintura conductora; cuando el área afectada es suficientemente grande provoca que la barra quede eléctricamente flotada, originando la ocurrencia de descargas parciales externas. La ocurrencia de descargas acelera la pérdida de la pintura conductora, provocando que las descargas incrementen su nivel. Hay una gran cantidad de generación de ozono por el aire ionizado que ataca químicamente el sistema aislante del generador.

Este proceso se puede identificar con la medición de descargas parciales, ya sea en línea o fuera de línea. Se generan pulsos de descargas asimétricos; los pulsos del ciclo negativo son mayores a los del ciclo positivo. La magnitud de las descargas puede alcanzar niveles del orden de los 100 mil pC [Wilson, A.].

Durante una inspección del generador, retirando algunas cuñas, se pueden apreciar las descargas contra la ranura y las zonas dañadas de pintura conductora.

Durante una inspección del generador, retirando algunas cuñas, se pueden apreciar las descargas contra la ranura y las zonas dañadas de pintura conductora; el deterioro típico que sufren las bobinas se muestra en la foto 1.

Para evitar que el devanado se afloje, los fabricantes de generadores eléctricos desarrollaron durante los años sesenta un sistema de fijación de bobinas mejorado mediante el uso de rellenos ondulados. La mayor parte de los generadores eléctricos instalados en la CFE a partir de la década de los ochenta tienen instalados estos accesorios para evitar el deterioro prematuro del sistema aislante del estator. Se instalaron en aquellos generadores que no lo tenían.

Una variante de este fenómeno se puede presentar cuando a pesar de que las bobinas estén correctamente sujetas, en la presencia de alta generación de ozono, por descargas en cabezales por ejemplo, las pinturas sufren un ataque químico y pierden su

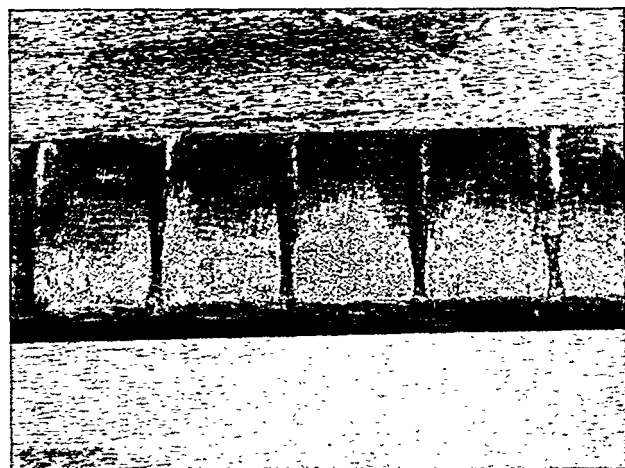


Foto 1. Bobina deteriorada en la sección activa por descargas de la ranura.

CUADRO 1

Clasificación de defectos y procesos de deterioro de generadores eléctricos.

<i>Defecto</i>	<i>Proceso de deterioro</i>	<i>Consecuencia última</i>
1. Desajuste de las bobinas del estator en las ranuras	Fricción de las barras contra la ranura, pérdida de la referencia de tierra, ocurrencia de descargas externas.	Erosión y carbonización del aislamiento principal, eventual falla dieléctrica de bobinas operando al mayor gradiente.
2. Contaminación del generador (hidráulicos y turbogeneradores enfriados con aire, tipo abierto)	<i>Estator:</i> Contaminación de cabezales, cancelación del sistema para graduar campo eléctrico, ocurrencia de descargas externas. <i>Rotor:</i> Acumulación de contaminación en cabezales del rotor, cortocircuitos entre espiras.	Erosión y carbonización del aislamiento, falla a tierra o entre bobinas de diferente fase. Vibración excesiva del generador, falla a tierra del aislamiento del rotor.
3. Propagación de fracturas en las cuñas del rotor (turbogeneradores con enfriamiento directo de hidrógeno).	Desprendimiento de cuñas, daño en la laminación del núcleo del estator, formación de puntos calientes.	Falla del aislamiento principal de las bobinas del estator por temperatura excesiva de operación.
4. Desconexión o falla de las resistencias equipotenciales (turbogeneradores con enfriamiento directo con hidrógeno)	Apertura de las resistencias, descargas parciales externas, ionización del hidrógeno en zonas críticas	Rompimiento dieléctrico del hidrógeno y falla entre fases del devanado del estator
5. Defectos en las conexiones o en el aislamiento de los anillos de cabezales (generadores hidráulicos)	Deterioro de las uniones soldadas, formación de puntos calientes, deterioro térmico del aislamiento.	Falla del aislamiento entre fases.
6. Pérdida de sujeción mecánica del estator, aflojamiento del núcleo (hidrogeneradores).	Vibración del núcleo, ruptura de segmentos de laminación en la zona del diente. Los segmentos se alojan en el cabezal, ocurrencia de descargas entre bastones	Descargas parciales severas en el cabezal, erosión del aislamiento y falla entre fases de los devanados del estator
7. Falla de los sistemas de enfriamiento del generador.	Elevación excesiva de la temperatura de operación, deterioro de la resina, delaminación del aislamiento.	Descargas parciales en el aislamiento, pérdida de propiedades fisicoquímicas, falla del aislamiento principal.
8. Operación en condiciones anormales, sobre o subexcitación, motorización del generador.	Elevación anormal de la temperatura de operación, deterioro del estator o del rotor.	Falla del aislamiento interlaminar del núcleo, formación de puntos calientes, falla del aislamiento.

conductividad (típicamente se deben mantener entre 1 y 10 k Ω). La bobina en el estator queda flotada y se produce una mayor cantidad de ozono que acelera el proceso químico de deterioro. En estas condiciones, las descargas ocurren abajo de la pintura semiconductora.

Contaminación del generador

Efecto en el estator

Este es un problema típico de los generadores de tipo abierto, con sistema de enfriamiento de aire forzado [Robles, E. *et al.*, 1992]. Se presenta en generadores de refinerías y centros petroquímicos, así como en plantas de ciclo combinado y en generadores hidráulicos. A pesar de que se filtra el aire de enfriamiento, si los niveles de contaminación son elevados, las partículas contaminantes son capaces de ingresar al estator y se depositan en los cabezales, como puede observarse en la foto 2. La contaminación acumulada propicia la ionización del aire y las bobinas se ven sometidas a la acción de las descargas parciales aun al voltaje de operación.

Si las calderas utilizan combustóleo, la contaminación es severa debido a que se produce una gran cantidad de hollín o polvo de carbón que al mezclarse con el aceite

se deposita en los cabezales, y las descargas cancelan la graduación de campo eléctrico y deterioran la superficie del aislamiento.

En devanados contaminados se registran pulsos esporádicos del orden de 10 a 20 nC a bajos niveles de voltaje. Mediante una inspección visual con potencial aplicado se puede observar la ionización en la zona de cabezales, principalmente en el área de traslape de pinturas. Los devanados contaminados registran valores elevados de $\tan \delta$ ($> 3\%$ a 0.2 Vn) e incrementos significativos de $\tan \delta$ en función del voltaje de prueba (del orden de 1% de 0.2 Vn a 1.0 Vn).

Una medida para corregir este problema ha sido el uso de filtros de alta eficiencia, la limpieza exhaustiva de los cabezales y el acondicionamiento de pinturas graduadoras cuando los generadores salen a mantenimiento.

Efecto en el rotor

Los rotores de polos lisos utilizan conductores desnudos; el fabricante utiliza un papel aislante entre conductores adyacentes por lo que en generadores del tipo abierto el arreglo es sensible a provocar cortocircuitos entre espiras, entre bobinas e incluso cortocircuitos a tierra. El ventilador de los rotores impulsa las sustancias

contaminantes hacia el interior de los devanados, las cuales se depositan en los cabezales, particularmente en las esquinas que forman los paquetes de conductores y los separadores (foto 3). La capa de contaminación "puentea" eléctricamente los costados desnudos de los conductores. Como la contaminación no tiene una buena conductividad, el paso de la corriente provoca puntos calientes que van envejeciendo térmicamente el aislamiento a tierra hasta provocar una falla contra el anillo de retención.

El problema es más severo en los generadores que operan con sistemas de excitación estática. El sistema de excitación puede generar sobrevoltajes transitorios que se propagan en los devanados, incrementando el gradiente eléctrico entre las espiras, lo que facilita la ocurrencia de cortocircuitos por la contaminación acumulada. Esta problemática es común en refinerías y centros petroquímicos donde se tienen niveles elevados de contaminación. Este es un problema muy grave; se han encontrado casos donde los rotores tienen un tiempo de vida útil inferior a los seis meses.

Las pruebas de comparación de pulsos y la medición de impedancia dinámica han sido las más sensibles para detectar cortocircuitos incipientes



Foto 2. Cabezales de un generador con problemas de contaminación.



Foto 3. Contaminación depositada en los cabezales del devanado de un rotor de polos lisos.

ocasionados por problemas de contaminación [García A. *et al.*, 1994]. Actualmente, los generadores de plantas petroquímicas se están instrumentando con la técnica de la bobina exploradora para detectar cortocircuitos incipientes durante la operación de los rotores. Asimismo, se están mejorando los sistemas de filtros.

Propagación de fracturas en las cuñas del rotor

Los rotores de polos lisos tienen cuñas metálicas, no magnéticas, de una aleación de cobre que sujetan mecánicamente los devanados polares. Las cuñas centrales tienen perforaciones para permitir la circulación del hidrógeno y facilitar el enfriamiento del devanado. En cierto tipo de generadores se ha observado que después de unas cien mil horas de operación, las cuñas tienden a fracturarse, salir desprendidas del rotor y golpear el estator; si la cuña golpea una cuña de fibra de vidrio, el daño puede ser menor, pero si golpea la laminación del núcleo puede ocasionar cortocircuitos en la laminación, provocando puntos calientes. Se generan altas temperaturas que afectan el aislamiento de las bobinas del estator hasta provocar una falla a tierra. Los cortocircuitos en las laminaciones generan puntos calientes que elevan la temperatura localmente, sin que esto lo registren los sensores de temperatura [Galaz, J., 1996].

La falla de la cuña está ocasionada por concentraciones de esfuerzos mecánicos debido al radio de curvatura utilizado. El problema se tiene bien identificado y se conoce qué tipo de generadores lo padece. Ha sido factible detectar la propagación de fracturas utilizando técnicas de ultrasonido en inspecciones que se realizan cuando los rotores salen a

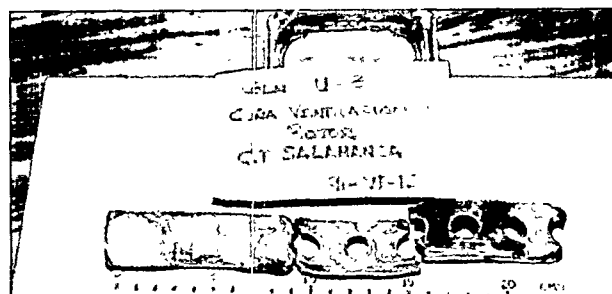
mantenimiento. En la foto 4 se muestran los daños ocasionados al núcleo por el desprendimiento de una de las cuñas del rotor.

Sin embargo, también se ha presentado la falla de un generador debido a esta causa y que lo mantuvo fuera de servicio durante casi un año. Además de sustituir las bobinas falladas, es necesario eliminar la laminación afectada para evitar la ocurrencia de puntos calientes. Este es un proceso lento y tedioso, el trabajo se completa hasta que ya no hay una elevación de temperatura anormal verificada con la prueba de toroide.

Desconexión o falla de las resistencias equipotenciales

Los generadores con enfriamiento directo por circulación de hidrógeno en los devanados del estator utilizan ductos dentro de las bobinas para disipar el calor generado por la circulación de corriente. Los ductos

En devanados contaminados se registran pulsos esporádicos del orden de 10 a 20 nC a bajos niveles de voltaje. Una medida para corregir este problema ha sido el uso de filtros de alta eficiencia, la limpieza exhaustiva de los cabezales y el acondicionamiento de pinturas graduadoras cuando los generadores salen a mantenimiento.



a)



b)

Foto 4. Daños ocasionados por el desprendimiento de una cuña del rotor: a) Cuña desprendida; b) Aspecto del daño ocasionado en el núcleo del estator.

están aislados de los conductores de las bobinas para evitar la circulación de corriente. Para evitar diferencias de potencial entre el conductor y los ductos de enfriamiento es necesario conectarlos en uno de los extremos de cada barra, esto se hace con una resistencia de 5 Ω .

Si por alguna razón se desconecta o se daña la resistencia que los mantiene al mismo potencial, se establece un gradiente eléctrico que genera descargas parciales externas (del orden de 40 nC). Por la localización de la resistencia equipotencial se estima que la zona afectada puede llegar a tener una longitud de unos ocho centímetros. La salida de los ductos de enfriamiento es una zona crítica debido a que el hidrógeno está a la más alta temperatura antes de pasar a los

enfriadores. A pesar de que las descargas no representan un problema para el aislamiento, se ha formulado la hipótesis de que pueden dar lugar a la ignición del hidrógeno. Cuando esto ocurre, el gas pierde sus características dieléctricas al estar altamente ionizado y puede provocar un arqueo entre fases. Este tipo de fenómeno causa severos daños al generador, por lo que es recomendable efectuar el monitoreo continuo de los niveles de descarga. Un fabricante de generadores realiza la supervisión de este fenómeno a través de la medición de señales de radiofrecuencia que circulan en el neutro del generador. En la foto 5 se muestra la falla entre fases de un generador de 346 MVA a 20 kV [Robles, E. *et al.*, 1995].

Defectos en las conexiones o en el aislamiento de los anillos de cabezales

Los generadores de centrales hidroeléctricas tienen un diámetro muy grande; un generador de 200 MW tiene un diámetro aproximado de 15 metros. Las conexiones entre grupos de bobinas o las de salida del generador ocupan del orden de dos tercios del perímetro (dependiendo del diseño y del tipo de devanado, ondulado o imbricado), lo que implica que se utilicen puentes de unos 30

Las pruebas de comparación de pulsos y la medición de impedancia dinámica han sido las más sensibles para detectar cortocircuitos incipientes ocasionados por problemas de contaminación

metros de longitud.

Por otro lado, un generador hidráulico es capaz de tomar su carga plena en tiempos extremadamente cortos; en cinco minutos, un generador puede estar aportando 200 MW a la red. Esta situación es muy ventajosa desde el punto de vista de operación del sistema, pero genera altos esfuerzos mecánicos originados por los rápidos cambios de temperatura. Además, por las condiciones climatológicas de nuestro país, los generadores de centrales hidráulicas casi siempre operan para alimentar cargas pico. Los continuos arranques y paros también provocan esfuerzos térmicos en los conductores.

Si las uniones soldadas de los conductores no fueron construidas satisfactoriamente, o si no son capaces de absorber los esfuerzos mecánicos generados por los cambios de temperatura, se generan puntos calientes que

deterioran rápidamente el aislamiento y pueden provocar la falla del aislamiento entre fases en las zonas donde el esfuerzo dieléctrico es más alto.

Debido a los elevados niveles de corriente que circulan a través de los devanados del estator, es de suma importancia que la sección soldada cubra cien por ciento del área de unión. Sin embargo, el método de soldadura empleado por los fabricantes no siempre garantiza un área de contacto pleno, por lo que no es extraño encontrar que la zona efectiva de soldadura sea sólo la periferia del conductor de cada bastón (foto 6). Cuando esto sucede, las altas resistencias de contacto de las uniones provocan elevaciones importantes de temperatura que ocasionan que la resina de los capuchones se deteriore por descomposición térmica.

Usualmente, el curado de las resinas empleadas para la fabricación del aislamiento entre conexiones se efectúa a temperatura ambiente; la



Foto 5. Falla entre ductos de enfriamiento de bobinas de diferente fase.



a)



b)

Foto 6. Ejemplo de unión defectuosa entre bastones: a) Método de unión entre bobinas; b) Detalle de la superficie de la solera empleada para la unión.

Pérdida de sujeción mecánica del estator, aflojamiento del núcleo



a)

b1

bobinas del estator, afecta el aislamiento de los devanados y puede provocar la falla entre fases por acción de las descargas. En la

Fallas de los sistemas de enfriamiento del generador

El cobre de los conductores y las capas aislantes tienen un coeficiente térmico diferente, por lo tanto, los conductores se calientan y se enfrían

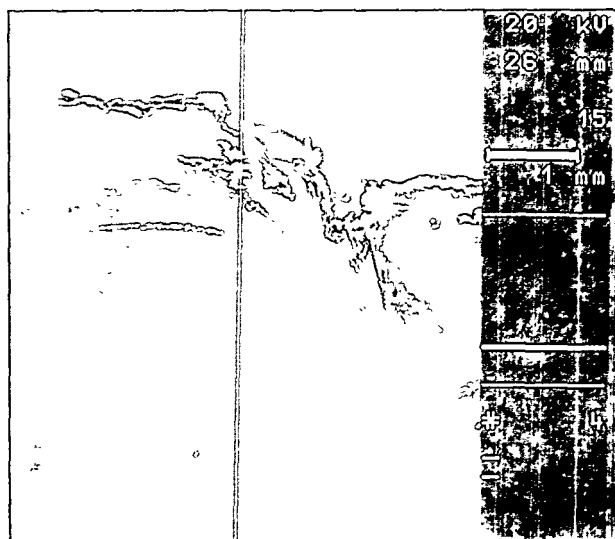


Foto 8. Vista microscópica de la separación de capas aislantes.

más rápidamente que las capas aislantes, esto genera esfuerzos internos que separan las capas aislantes de los conductores que provoca la delaminación del aislamiento, afectando sus características dieléctricas y mecánicas. En la foto 8 se muestra la separación de unas capas aislantes en un devanado que falló debido al calentamiento excesivo al que estuvo sometido.

El aire contenido en un aislamiento delaminado se ioniza aun con los gradientes normales de operación y las descargas causan un mayor deterioro. Se ha observado en evaluaciones fuera de línea que el índice de polarización tiende a ser anormalmente elevado (> 5.0) y se observan incrementos considerables en las curvas de descargas parciales en función del voltaje de prueba. También se ven incrementos anormales de la $\tan \delta$ con el voltaje de prueba. Un aislamiento delaminado presenta una actividad de descargas internas del orden de 80 nC que aceleran su deterioro y que en casos extremos pueden originar una falla a tierra.

Daños por condiciones anormales de operación

Las condiciones anormales de operación provocan daños severos a los generadores. Pueden estar sujetos a

condiciones de cortocircuito o sincronización fuera de fase que generan esfuerzos térmicos y mecánicos muy severos. La corriente de cortocircuito somete a los aislamientos en los cabezales a esfuerzos similares a los de un esfuerzo de impacto que pueden provocar que el aislamiento se fracture.

Los generadores de polos lisos que operan con baja excitación tienden a sufrir un calentamiento excesivo en los extremos del núcleo debido al flujo disperso que origina la reacción de armadura. Mientras que el flujo principal en el cuerpo del estator es paralelo a las laminaciones, el flujo en los extremos entra y sale de los extremos del estator en dirección perpendicular a las laminaciones. Las pérdidas del núcleo, en el sentido perpendicular de la laminación, son típicamente dos órdenes de magnitud más elevadas que para el flujo en el mismo sentido del laminado. Las pérdidas generan un calentamiento adicional que puede alcanzar tales temperaturas que afecten el aislamiento de las laminaciones; este proceso, a su vez,

genera mayor calor, produciendo una reacción en cadena.

Cuando se afecta un número considerable de laminaciones se generan temperaturas tan extremadamente elevadas que son capaces de fundir el acero del núcleo. Como las bobinas del estator están alojadas en las ranuras en contacto con el hierro, cuando alcanzan una temperatura crítica se produce la falla del aislamiento principal. El daño que se produce al generador es de grandes dimensiones porque se afecta tanto el núcleo como el aislamiento, en la foto 9 se presenta un caso donde ocurrió el fenómeno descrito.

Si un generador conectado al sistema eléctrico pierde accidentalmente su excitación del devanado de campo, su comportamiento es similar al de un motor de inducción, donde las cuñas del rotor son las barras de la jaula y



Foto 9. Falla de un generador originada por calentamiento excesivo del núcleo.

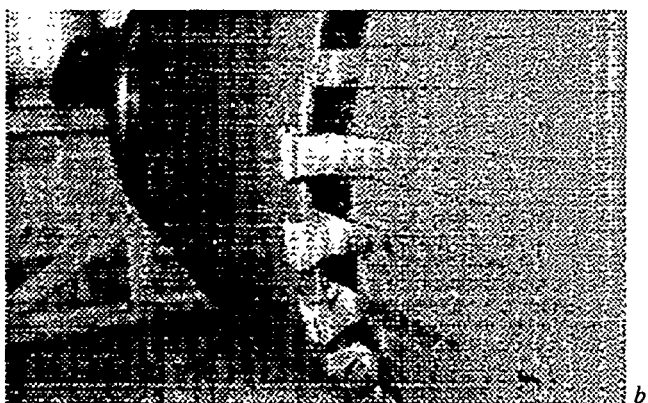
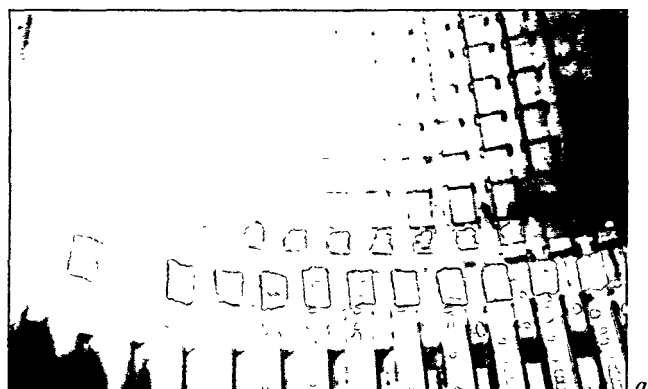


Foto 10. Efectos de la motorización del generador: a) Daños en el estator; b) Daños en el rotor.

los anillos de retención son los elementos que conectan las cuñas, pero las cuñas no tienen esta función y el contacto entre ellas y el anillo de retención es pobre, por lo que se generan temperaturas extremadamente altas que funden el material de las cuñas. Un generador que sufrió accidentalmente la conexión al sistema sin tener voltaje de excitación sufrió un deterioro como el que se muestra en la foto 10.

Conclusiones

Los generadores eléctricos son máquinas muy confiables, tienen alta resistencia a elevados esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales. Se espera de estos equipos una vida útil de treinta años de trabajo continuo. Sin embargo, pueden sufrir fallas que es necesario prevenir. Allí radica la importancia de conocer los mecanismos de deterioro que permita tomar acciones preventivas que eviten su salida por falla.

Referencias

- Campuzano, Roberto, *Deterioro del sistema aislante de grandes generadores por el fenómeno de descargas a la ranura*.
- Campuzano, R. y A. Medina, *Análisis de las causas de deterioro prematuro del estator del generador de la U-1 de la C.H. Carlos Ramírez Ulloa*, Tercer Congreso Nacional de Máquinas Eléctricas Rotatorias, Veracruz, 1993.
- Esparza Saucedo, M., *Procedimiento para diagnóstico de generadores eléctricos*, CFE, 1996.
- Galaz, J., Un aspecto de mantenimiento poco difundido. El circuito magnético (núcleo), RVP'96-GEN-01, Reunión de Verano de Potencia, Acapulco, México, 1996.
- García, A., E. Robles y H. López, *Análisis dieléctrico de los cabezales de devanados de estatores de grandes generadores*, AMIME, Sexta Reunión de Máquinas Eléctricas Rotatorias, octubre de 1996, Veracruz, Veracruz.
- García, A., R. Campuzano y H. López, *Operación anormal de generadores a temperaturas elevadas*, AMIME, Cuarta Reunión de Máquinas Eléctricas

Rotatorias, noviembre de 1994.

Robles, E., A. Medina y J.E. López, *Description of a violent failure of a 346 MVA generator*, Annual Double Client Conference, 1995.

Robles, E. et al., *Problemática de operación de turbogeneradores de plantas petroquímicas*, IEEE, 5ª Reunión de Verano de Potencia, Acapulco, México, 1992.

Robles, E. y J. García, *Rehabilitación del generador de la U-2 de la C.H. Ing. Carlos Ramírez Ulloa*, Sexto Congreso Nacional de Máquinas Eléctricas Rotatorias y Quinto Simposium Internacional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, octubre de 1996.

Wilson, A., *Slot discharge ageing mechanisms*, The 6th BEAMA International Electrical Insulation Conference, pp. 197-201.

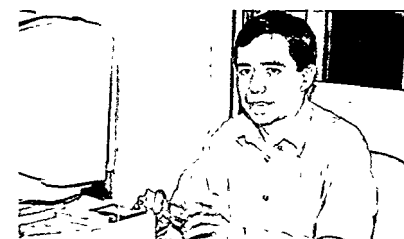
ARTURO GARCÍA TEVILLO



Ingeniero en eléctrica (1988) egresado de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y maestro en ciencias (1992)

por la Universidad de Salford, Reino Unido. En 1988 ingresó al IIE. Actualmente es investigador de la Unidad de Equipos Eléctricos. Su área de especialidad versa sobre máquinas eléctricas rotatorias.

OSCAR ALFONSO REYES MARTÍNEZ



Ingeniero industrial en eléctrica (1994) egresado del Instituto Tecnológico de Veracruz. En 1994 ingresó al IIE. Actualmente es investigador de la Unidad de Equipos Eléctricos. Se especializa en máquinas eléctricas rotatorias.

EDGAR GUILLERMO ROBLES PIMENTEL

Ver currículum en la página 283.

MARCOS ESPARZA SAUCEDO

Ver currículum en la página 283.

JOSÉ ERNESTO LÓPEZ AZAMAR



Ingeniero mecánico electricista (1973) por la Universidad Veracruzana y maestro en alta tensión por la Facultad de Ingeniería de la

Universidad de Guanajuato. En 1974 ingresó a la CFE. Actualmente es jefe de la Oficina de Sistemas Eléctricos del Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (Lapem).

ALFREDO MEDINA FLORES

Ingeniero electricista (1974) por la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato. En 1974 ingresó a la CFE a la Coordinadora de Construcción del Centro, en donde participó en la construcción de tres centrales generadoras. En 1984 se incorporó a la Gerencia Regional de Producción Central. Actualmente es el jefe del Departamento Eléctrico en la central termoeléctrica Salamanca.

MANUEL O. URIBE MARTÍNEZ

Ingeniero en eléctrica (1972) egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). En 1967 ingresó a la CFE. Actualmente es el superintendente Regional Eléctrico de la Subgerencia Regional de Generación Hidroeléctrica Balsas-Santiago. Cuenta con 32 años de experiencia en mantenimiento y reparación de generadores de centrales hidroeléctricas. Se especializa en generación hidroeléctrica.