IIE Bulletin.
Selected articles from 1996 issues of 'boletin iie'

MX9800196

El cambio de horario durante la época del verano en México

Rogelio Covarrubias Ramos

Definición y ámbito de aplicación

En México se tienen tres husos horarios: a) el de Baja California; b) el de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Baja California Sur, y c) el del resto del país que tiene una hora de diferencia con los cuatro estados antes señalados y dos horas con Baja California (véase la figura 1).

Durante casi toda la primavera, todo el verano y un mes del otoño, en el territorio nacional se tiene la mayor insolación del año. Por esta razón durante ese periodo que se denomina convencionalmente "verano", se puede aprovechar la luz natural más tiempo y obtener muchos beneficios.

El horario de verano que se ha decretado establecer en México, consiste en adelantar simultáneamente una hora el reloj en todo el territorio nacional del primer domingo de abril al último domingo de octubre de cada año, con la misma estructura de husos horarios que actualmente se aplica.

De esta suerte, la mayor parte del país que utiliza el huso horario de 90° (-6 horas del meridiano de Greenwich), se desplazaría al huso horario de 75° (-5 horas del meridiano de Greenwich).

Los estados de Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit que actualmente observan el huso horario 105° (-7 horas del meridiano de Greenwich), pasarían al de 90° (-6 horas del meridiano de Greenwich).

Baja California continuaría desplazando su horario del meridiano 120° (-8 horas del meridiano de Greenwich), al 105° (-7 horas del meridiano de Greenwich), como actualmente lo practica.

Antecedentes

Los patrones de vida en la sociedad urbana han propiciado que durante el verano gran parte de la población se levante después de que sale el sol y también continúe con sus actividades después del ocaso, lo que repercute en el desperdicio de luz natural por las mañanas y que se requiera de mayor tiempo de iluminación artificial por la noche.

Al aplicar un horario de verano, la población hace un mejor uso de la luz natural y con ello se obtienen beneficios personales,sociales, deportivos, de seguridad, ambientales, ecológicos y productivos.

El horario de verano es una medida que utilizan muchos países en el mundo, y prácticamente todos los países desarrollados. Se aplica tanto en el hemisferio norte como en el trópico y en el hemisferio sur.

La figura 2 muestra la insolación y la luminosidad con y sin cambio de horario de verano en el Distrito Federal; en ella se observa que con el horario de verano se hace un mejor uso de la luz natural durante las tardes en la época del verano.

Países en que se aplica el horario de verano

En el hemisferio norte lo aplican Estados Unidos, Canadá y los países europeos, entre otros. Dentro del trópico destacan Brasil, Cuba, Haití y Australia y en el hemisferio sur pueden mencionarse a Paraguay y Chile.

→ 6

FIGURA 1
Husos horarios en México, con el horario tradicional.

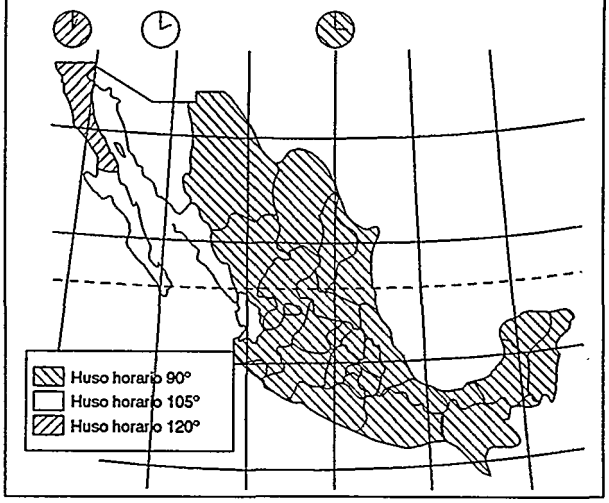
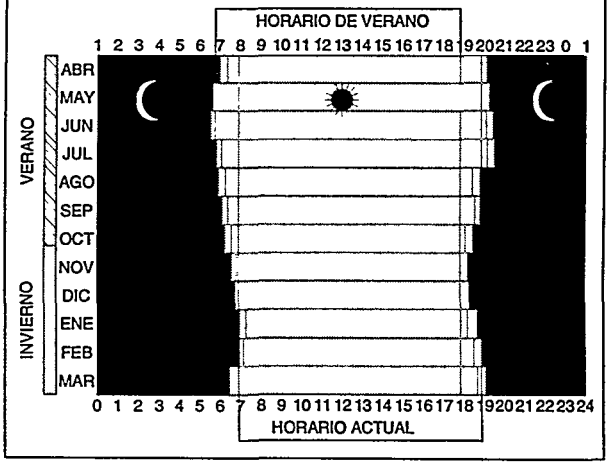


FIGURA 2
Insolación y luminosidad con y sin horario de verano en el Distrito Federal.



Programa Nacional de Ahorro de Energía Eléctrica para el periodo 1995-2000

Mateo Treviño Gaspari, director general del Fide

Con el fin de garantizar que los ahorros de energía eléctrica sean permanentes, se debe estimular a los usuarios para que utilicen tecnologías y equipos de mayor eficiencia, logrando con ello transformar el mercado y alcanzar una meta nacional de ahorro de energía eléctrica. Otra condición indispensable que debe cumplir este tipo de programas, consiste en poder medir con toda precisión los ahorros logrados.

Los proyectos a desarrollar se deben basar en el principio de optimar la rentabilidad para el sector eléctrico, buscando que aseguren una rentabilidad aceptable para el usuario, así como una meta justificable en términos del ahorro de energía previsible.

La meta de ahorro de energía eléctrica establecida se basa en la aplicación de un sistema de incentivos, la realización de proyectos demostrativos, la ejecución de proyectos por parte de la Comisión Federal de Electricidad para reducir pérdidas en la transmisión y distribución de energía eléctrica, así como la implantación del horario de verano en México. Estas cuatro acciones integran la parte del programa que se realizará con la participación directa del sector eléctrico; mientras que la otra parte del programa consiste en el desarrollo de proyectos, promovidos y apoyados económicamente por la Comisión Nacional del Agua y los gobiernos estatales, con el fin de optimar los sistemas de bombeo de agua para riego agrícola y el establecimiento de una política de consumo de energía eléctrica en las instalaciones del gobierno federal que propicie un mejor uso de este recurso.

Al año 2000 se ha fijado una meta de ahorro de energía por concepto de la aplicación de los proyectos antes mencionados de 8,051 GWh, equivalentes a un 7.3% de las ventas registradas en 1994, de los cuales 7,276 corresponden a los proyectos en los que participa directamente el sector eléctrico; en potencia, la meta asciende a 1,436 MW, lo que significa un 4.5% de la capacidad instalada hasta 1994, de los cuales, 1,301 corresponden a los proyectos en los que participa directamente la Comisión Federal de Electricidad.

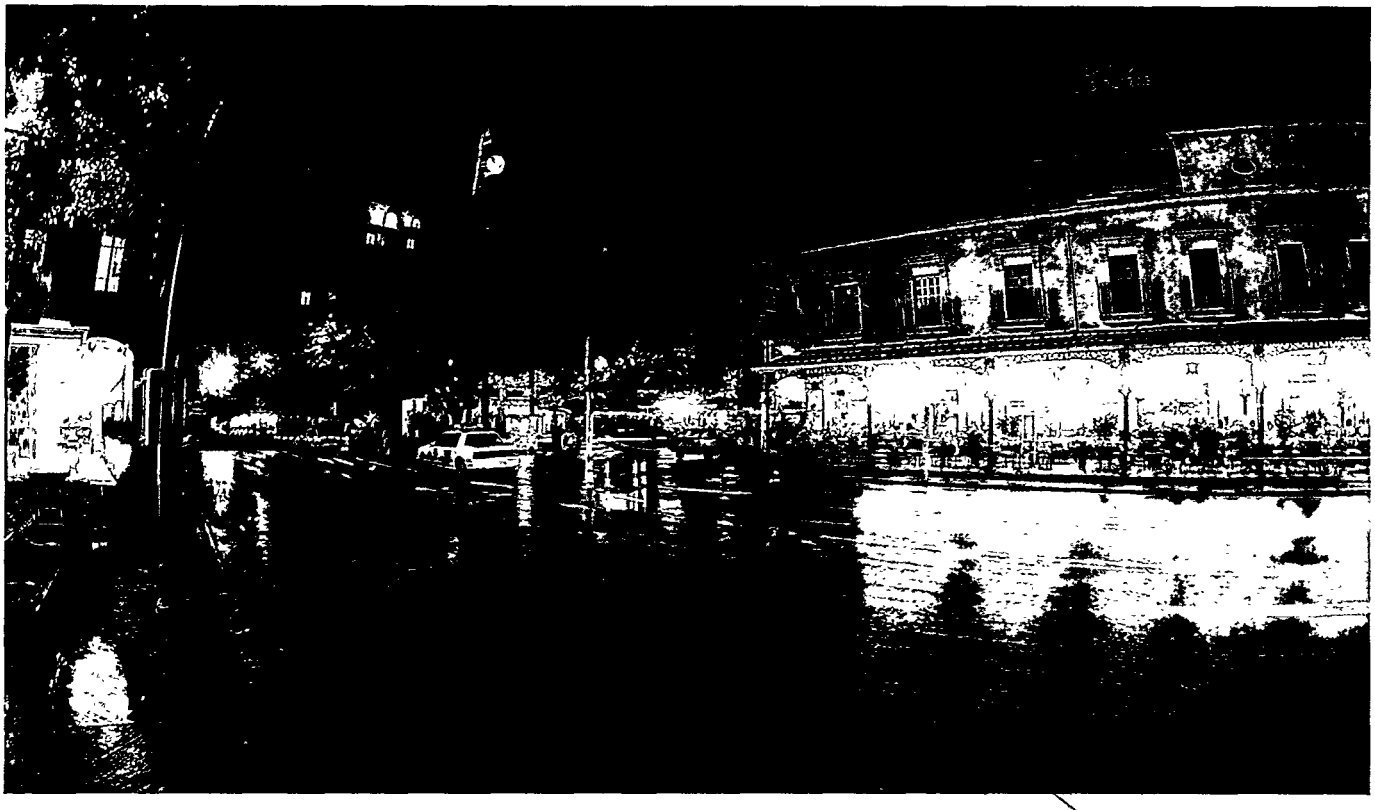
MATEO TREVIÑO GASPARI



Ingeniero mecánico, egresado de la ESIME del Instituto Politécnico Nacional en 1966. Profesionalmente, se ha desarrollado principalmente en el ámbito energético del transporte y de la industria. En la Comisión Federal de Electricidad ha desempeñado diversos cargos, desde ingeniero de pruebas hasta asesor del director general, cubriendo responsabilidades relacionadas con la generación y distribución de energía, el aseguramiento de la calidad y la administración. También ha sido subdirector del Instituto de Investigaciones Nucleares. En el ámbito de la industria y el transporte fungió como director general de Clemex, una de las principales empresas fabricantes de bienes de capital del país y de la Constructora Nacional de Carros de Ferrocarril, dedicada a la producción de equipo ferroviario, metros y trenes ligeros. Actualmente es director general del Fideicomiso de Apoyo al Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (Fide) y coordinador general del Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE).

Meta nacional de ahorro de energía eléctrica al año 2000

Consumo	Demanda
Proyectos del sector eléctrico 7,276 GWh/año 6.6% del consumo de 1994	Proyectos del sector eléctrico 1,301 MW 4.1% de la capacidad instalada en 1994
Otros proyectos 775 GWh/año 0.7% del consumo de 1994	Otros proyectos 135 MW 0.4% de la capacidad instalada en 1994
Total 8,051 GWh/año 7.3% del consumo de 1994	 1,436 MW 4.5% de la capacidad instalada en 1994



Los ahorros de energía eléctrica por año y por tipo de proyectos para el periodo de 1995 al año 2000 se presentan en el siguiente cuadro:

Proyecto	*1995*		*1996*		*1997*		*1998*		*1999*		*2000*	
	GWh	*MW*	*GWh*	*MW*	*GWh*	*MW*	*GWh*	*MW*	*GWh*	*MW*	*GWh*	*MW*
Sistema de incentivos	-	-	252	37	900	126	1644	234	2511	360	3256	467
Proyectos demostrativos	74	20	218	42	361	65	505	87	648	110	792	132
CFE, reducción de pérdidas en transmisión y distribución	-	-	430	130	1928	552	1928	552	1928	552	1928	552
Horario de verano	-	-	1300	150	1300	150	1300	150	1300	150	1300	150
Bombeo agrícola	27	4	81	10	135	16	189	22	243	28	297	34
Gobierno federal	-	-	96	20	191	40	287	61	382	81	478	101
T O T A L	101	24	2377	389	4815	949	5853	1106	7012	1281	8051	1436
Porcentaje con relación al consumo y capacidad instalada de 1994	0.1	0.07	2.2	1.2	4.4	3.0	5.3	3.5	6.4	4.0	7.3	4.5

3 ←

El horario de verano se implantó por primera vez durante la Primera Guerra Mundial como una medida para hacer frente a la necesidad de ahorrar energéticos. Los países involucrados tuvieron que encontrar fórmulas para ahorrar energía sin dejar de satisfacer los requerimientos de la población y atender, al mismo tiempo, la creciente demanda generada por las actividades industriales asociadas con la producción de armamento.

Durante la Segunda Guerra Mundial, nuevamente en los países en conflicto se justificó el "horario de guerra" durante los meses de mayor insolación. Al término de la confrontación la utilización del "horario de guerra" o de ahorro de energía se limitó a ciertas áreas de algunos países que lo mantuvieron hasta 1966.

El horario de verano que se ha decretado establecer en México, consiste en adelantar simultáneamente una hora el reloj en todo el territorio nacional del primer domingo de abril al último domingo de octubre de cada año, con la misma estructura de husos horarios que actualmente se aplica.

En 1973, Estados Unidos, Europa y otras naciones industrializadas, al resentir la crisis derivada del embargo petrolero que impusieron los países miembros de la OPEP, tuvieron que propiciar una reducción en la demanda de energéticos primarios y alentar programas de ahorro de energía, como por ejemplo, prolongar a siete meses la aplicación del horario de verano.

Estas experiencias históricas llevaron a la conclusión de que adelantar una hora el horario oficial durante los meses de mayor insolación año tras año, permitiría reducir el consumo de energía eléctrica y con ello demandar menores cantidades de energéticos primarios.

Poco después de implementar lo que se dio en llamar el programa "de ahorro de luz del día (daylight saving time)" o también "horario de verano", todos los países se dieron cuenta de que además de utilizar más horas de luz solar y lograr un ahorro de energía, se obtenían otros beneficios muy importantes como el mejoramiento del medio ambiente, una significativa baja en la criminalidad, mejoría en las condiciones de tránsito vehicular y mayor disponibilidad de tiempo para realizar actividades productivas, sociales y recreativas, entre otros.

Los estudios realizados en los Estados Unidos respecto a ampliar el periodo de aplicación del horario de verano de seis a siete meses, reportan que los ahorros de energía son del orden del 1% anual del consumo. También indican reducciones del 10% en los crímenes violentos, 15% en los delitos de propiedad y 1% en los accidentes automovilísticos.

En Brasil, el horario de verano abarca del tercer domingo de octubre al tercer domingo de febrero del año siguiente; en este caso reportan ahorros de energía del orden del 2% en el consumo y del 4% en la demanda de energía eléctrica.

Husos horarios en México

Los husos horarios basados en la hora del meridiano de Greenwich, fueron implantados en México a partir de 1922, fecha en que se utilizó para la mayor parte del país el horario correspondiente al meridiano 105°. Para los estados de Tabasco, Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, se adoptó el meridiano 90°.

Periódicamente se fue modificando la configuración horaria del país, buscando satisfacer las diferentes necesidades que se fueron presentando: adecuación con horarios de trabajo, sortear escasez de agua en la presa de Necaxa, principal fuente de energía eléctrica, etcétera.

En abril de 1942 se decretó el horario del meridiano 105° para los territorios norte y sur de Baja California, así como para los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit, y el horario del meridiano 90° para el resto del país.

Al aplicar un horario de verano, la población hace un mejor uso de la luz natural y con ello se obtienen beneficios personales, sociales, deportivos, de seguridad, ambientales, ecológicos y productivos.

En diciembre de 1948, se decreta que en el territorio norte de Baja California se aplique la hora del meridiano 120°, complementándose así las disposiciones que hoy norman la aplicación de horarios en la República Mexicana.

Por otra parte, en diciembre de 1981 se decretó la aplicación de un huso horario permanente para la península de Yucatán desplazándose del meridiano 90° al de 75°.

En el año de 1988 se estableció un horario de verano para los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila y Durango, lo que significó que del primer domingo de abril al último domingo de octubre, estos estados desplazaran su horario del meridiano 90° al de 75°.

Esta experiencia, al igual que la aplicación de un huso horario permanente para la península de Yucatán utilizando el meridiano de 75°, arrojó resultados desfavorables que fundamentaron la necesidad de derogar estas medidas un año después.

Entre las causas fundamentales para tales suspensiones, puede señalarse el desfasamiento en las actividades económicas, sociales y culturales que se dieron en relación con el Distrito Federal.

Beneficios

Los principales beneficios que se obtendrán con la aplicación del horario de verano son:

- Un mejor aprovechamiento de la luz natural.
- Una hora más de sol y luz natu-

ral por las tardes de primavera, verano y parte del otoño por siete meses del año, para realizar más actividades sociales y productivas.

- Menores situaciones de riesgo y accidentes asociados con la oscuridad.
- Ahorro de energía eléctrica del orden de 1,100 GWh/año, equivalente al 1% del consumo anual de electricidad en el país. En generación bruta significa un ahorro de 1,300 GWh/año.
- Esta reducción supera el consumo anual de los estados de Aguascalientes, Colima o Tlaxcala, es similar al consumo de Zacatecas y representa el 10% de lo que consume el Distrito Federal.
- Reducción de combustibles asociados con la generación de energía eléctrica, equivalentes a dos millones de barriles de petróleo al año.
- Reducción en la emisión de contaminantes en las zonas de generación de energía. Se calcula que se reducirá la emisión de 775,000 toneladas de bióxido de carbono (CO_2), 12,700 toneladas de óxidos de azufre (No_x), 2,300 toneladas de óxidos de nitrógeno (SO_x), 900 toneladas de partículas sólidas y 15 toneladas de hidrocarburos no quemados y compuestos intermedios.
- Diferencias de horario constantes todo el año, con los países con que se mantienen importantes intercambios.
- Crer conciencia en la población sobre el ahorro de energía, la productividad y la eficiencia.

Impacto del cambio de horario

El cambio a un horario que estimule en la sociedad un mayor uso de la iluminación natural tiene un impacto que puede analizarse desde diversos puntos de vista:

Para el país

Los efectos benéficos de esta medida se manifiestan no sólo por su posible impacto en el ahorro de energía, sino de manera especial por las ventajas en el intercambio comercial, turístico, aeronáutico y financiero con los países con quienes se mantiene mayor relación, así como por las ventajas derivadas de contar con iluminación solar en horas más avanzadas de la tarde.

El mejor aprovechamiento de la iluminación solar reducirá las demandas de energía eléctrica y, consecuentemente, la producción de emisiones en las centrales termoeléctricas, lo que tendrá un efecto positivo sobre el ambiente en el país. También la medida ayudará a que la población tenga una mayor conciencia de las posibilidades de ayudar a mejorar al país a través de acciones conjuntas. En el mediano plazo se pueden promover otras medidas, como el escalonamiento de los horarios de trabajo y la ampliación del horario diurno en oficinas, que también pueden tener efectos positivos sobre el medio ambiente.

Se calcula que se reducirá la emisión de 775,000 toneladas de bióxido de carbono (CO_2), 12,700 toneladas de óxidos de azufre (No_x), 2,300 toneladas de óxidos de nitrógeno (SO_x), 900 toneladas de partículas sólidas y 15 toneladas de hidrocarburos no quemados y compuestos intermedios.

En materia ambiental se evaluó el efecto que tendría la implantación del horario de verano sobre la generación de contaminantes a lo largo del día en el valle de México, tanto por la producción del ozono, como por las emisiones de las centrales termoeléctricas asentadas en la zona metropolitana del Distrito Federal.

El Departamento del Distrito Federal, apoyado por el Instituto Mexicano del Petróleo, analizó el impacto que el cambio de horario pudiera tener en la formación de ozono en la atmósfera del área metropolitana, concluyendo que no se producirán cambios significativos en la concentración máxima de ozono al adelantar una hora los relojes.

La Comisión Federal de Electricidad, en concordancia con los planes de contingencia ambiental, opera las plantas termoeléctricas localizadas en el valle de México, al mínimo posible, cuidando de garantizar siempre el suministro de energía eléctrica que complemente las necesidades que de este fluido tiene la ciudad de México. Debe subrayarse que desde hace cinco años estas plantas consumen gas natural, lo que ha permitido reducir la emisión de contaminantes de manera importante y que se están desarrollando programas de mejoras operativas para obtener beneficios adicionales.

Así, todos los análisis coinciden al indicar que con el cambio de horario en el verano se tendría una reducción de emisiones contaminantes al disminuir la combustión de hidrocarburos para generación de energía eléctrica, se beneficiarían las actividades financieras y comerciales del país y se reducirían los accidentes nocturnos y los índices de criminalidad.

Para la población en general

Para evaluar la actitud y respuesta de la población al eventual establecimiento de un horario de verano, se realizaron una serie de encuestas cualitativas y cuantitativas.

En la ciudad de México, Durango, Chihuahua, Nuevo León, Guadalajara y Mérida, se realizaron estudios cualitativos consistentes en la celebración de 24 sesiones de grupo y 18 encuestas a profundidad que, aunadas a la encuesta cuantitativa basada en una muestra representativa del país de 1,900 personas entrevistadas, permiten confirmar la aceptación y comprensión de la medida por parte de la población en general, no obstante que se requerirá de una amplia campaña de comunicación que garantice su adecuada comprensión y precise la magnitud de los beneficios esperados. La

figura 3 muestra los resultados de los estudios cualitativos.

Merece subrayarse que a pesar de la limitada promoción en los medios de comunicación de la propuesta para establecer un horario de verano, es alentador el resultado del estudio realizado, ya que 23% de las personas entrevistadas conocían la posibilidad de un cambio de horario a partir de abril próximo. Asimismo, vale la pena señalar que sin existir una amplia explicación del concepto, 36% consideró que tendría ventajas, 24% estima que habría desventajas y 40% no dio ninguna opinión.

Sobre el ahorro de energía, 41% de los encuestados consideró que no habría ahorro; 37% estimó que sí se tendrán ahorros y el 22% no opinó.

Una vez explicada muy brevemente la propuesta de cambio de horario, el 72% se manifestó en favor, 11% en contra y 17% no opinó. La figura 4 muestra los resultados cuantitiativos de dicha encuesta.

Los encuestados consideraron muy importante que la medida se dé a conocer ampliamente a través de los medios de comunicación y también en empresas, colegios y organizaciones sociales.

Las opiniones positivas se asocian con un mejor aprovechamiento del tiempo, con el ahorro de energía y el ahorro de dinero. Este último concepto debe aclararse, ya que el ahorro por persona será muy reducido, pues sólo incide la parte de iluminación del hogar, la cual es sólo una fracción, a veces pequeña, del consumo de electricidad.

... todos los análisis coinciden al indicar que con el cambio de horario en el verano se tendría una reducción de emisiones contaminantes al disminuir la combustión de hidrocarburos para generación de energía eléctrica, se beneficiarían las actividades financieras y comerciales del país y se reducirían los accidentes nocturnos y los índices de criminalidad.

A través de la estructura Comisión Federal de Electricidad-Fideicomiso de Apoyo al Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico-Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (CFE-Fide-PAESE), se realizaron 1,644 reuniones con la participación de 32,541 personas; se informó además a todos los gobernadores de los estados y al gobierno del Distrito Federal. Se realizaron también reuniones con la Comisión de Energéticos de la Cámara de Diputados, la Comisión de Senadores y la Asamblea de Representantes del Distrito Federal.

La figura 5 muestra la distribución de los participantes por sectores.

Se recibieron en total 169 pronunciamientos escritos de adhesión a la implantación del horario de verano, 32 de ellos provenientes de diversas instituciones gubernamentales y 137 de la sociedad en general. En la figura 6 se muestra el detalle de las adhesiones.

Luminosidad matutina con horario de verano

Con la medida actual de implantar un horario de verano en el territorio nacional, todo el país mantendrá las mismas relaciones horarias que ahora se tienen y sólo se alterará la luminosidad a la que están acostumbrados los habitantes de cada comunidad o ciudad del país, ya que al adelantar el horario estará haciéndose uso de la luminosidad de una hora antes y esto se concreta en una luminosidad que llegará, eventualmente, más tarde de lo que se está acostumbrado.

Aquí es oportuno resaltar que el estado de Chihuahua junto con el de Durango ocupan la parte más al noroeste del área de la República Mexicana en que rige el tiempo del huso horario de 90°. Por ello, estos estados registran diferencias horarias al finalizar el horario de verano de hasta una hora y catorce minutos, y de una hora y tres minutos, respectivamente, en relación con la hora en que sale el sol en la península de

FIGURA 3
Resultados cualitativos de las encuestas.

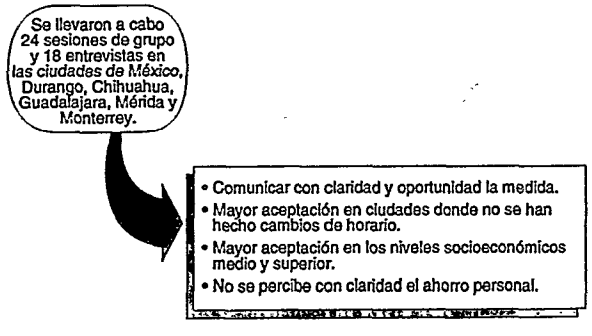


FIGURA 4
Resultados cuantitativos de las encuestas.

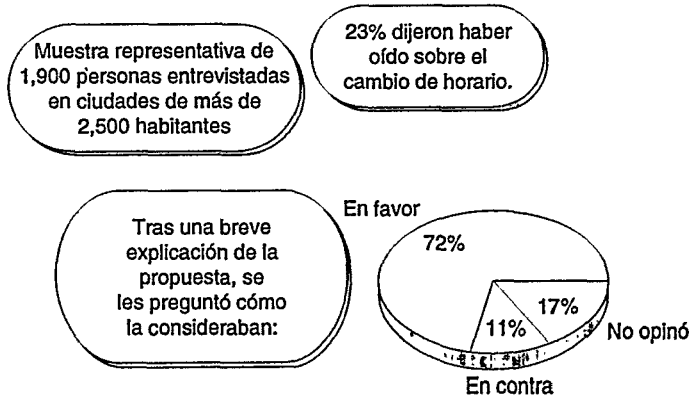


FIGURA 5
Auscultación y sensibilización a través de la estructura CFE-Fide-PAESE.

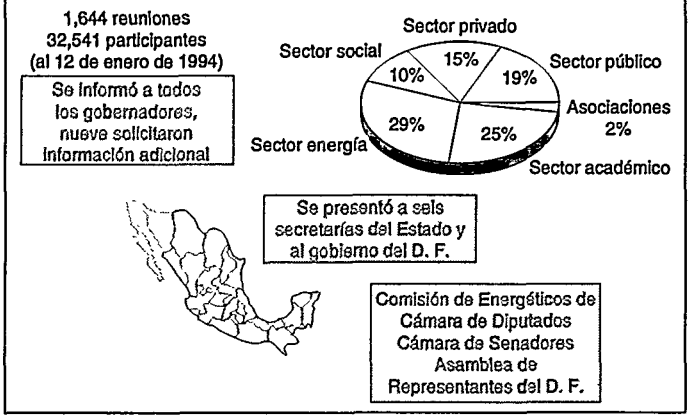


FIGURA 6
Pronunciamientos escritos de adhesión.

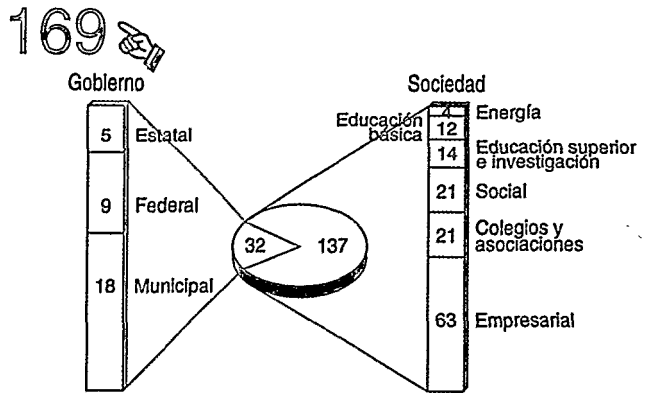


FIGURA 7
Iluminación a lo largo del año en Ciudad Juárez, Chihuahua.

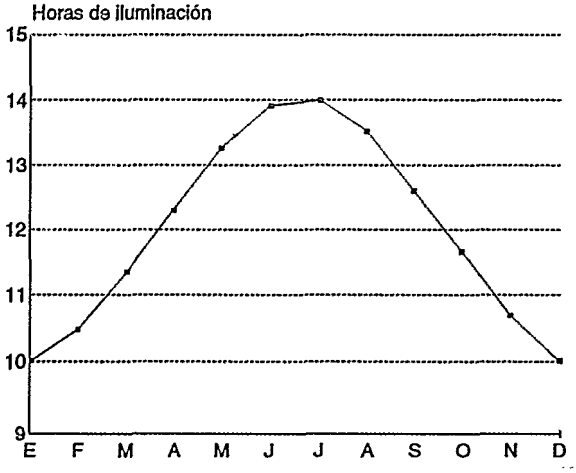


FIGURA 8
Iluminación a lo largo del año en la ciudad de México, D. F.

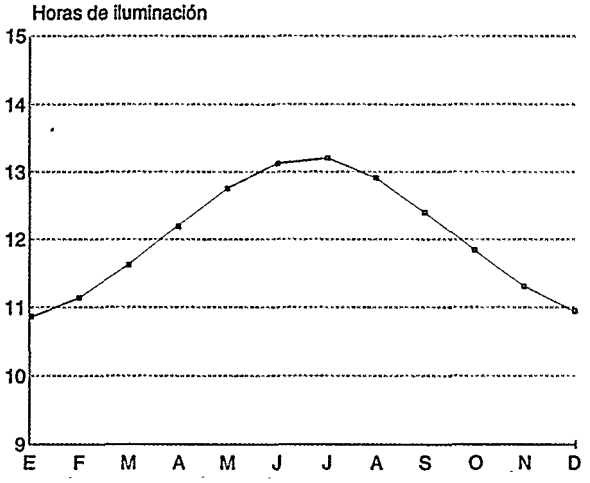
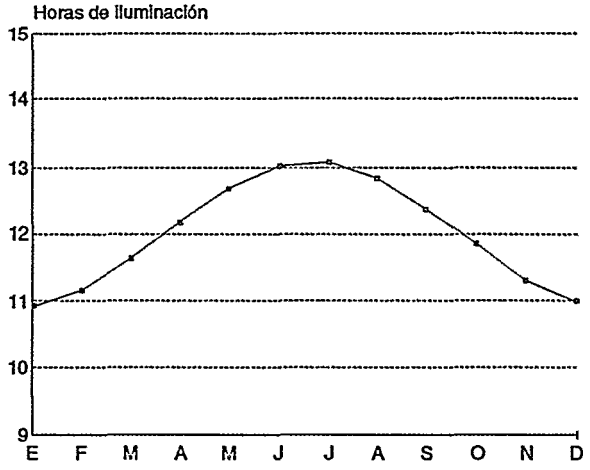


FIGURA 9
Iluminación a lo largo del año en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

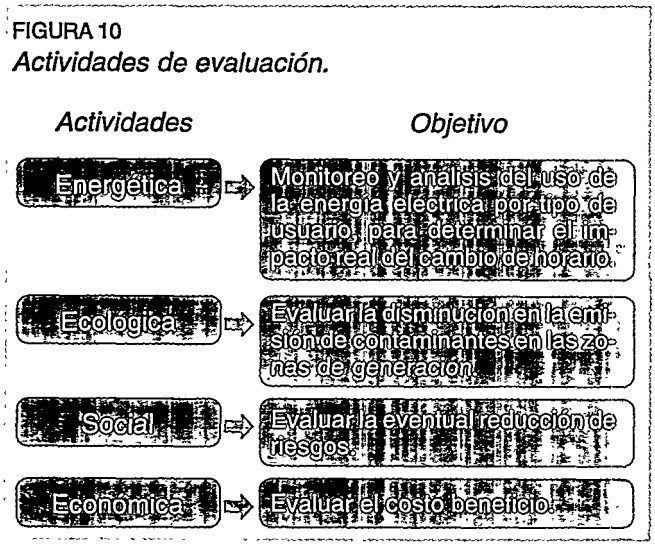


Yucatán, zona del país que también utiliza la hora del meridiano 90°.

Es así que con excepción de Chihuahua y Durango se tiene luz suficiente a más tardar a las 7:28 horas, lo que permite que los niños de primaria se trasladen a la escuela con luz natural. En esos estados se evaluó ampliamente con los sectores gubernamentales, económicos y sociales, la conveniencia de implantar la medida, ya sea a partir de su actual huso horario o adoptando el de los estados de Sinaloa, Sonora, Nayarit y Baja California Sur; ambos estados decidieron mantenerse con la misma hora del Distrito Federal y afrontar los amaneceres tardíos a los que ya están acostumbrados.

Las figuras 7, 8 y 9 muestran el caso de tres ciudades a diferente latitud.

FIGURA 10
Actividades de evaluación.



Evaluación

Una vez implementada la campaña, se llevarán a cabo acciones que permitan cuantificar los beneficios del horario de verano. En el aspecto energético, se llevará a cabo el monitoreo en los diferentes tipos de usuarios y en diversas regiones del país, para poder determinar el impacto real. En lo relacionado con la ecología, se evaluará la disminución en la emisión de contaminantes en las zonas de generación. En lo que se refiere a los aspectos sociales, se evaluarán las eventuales reducciones en riesgos. Finalmente, con base en la información que se genere de los resultados anteriores, se realizará una evaluación costo-beneficio (véase la figura 10).

Conclusiones

Por todo lo antes expuesto puede afirmarse que el horario de verano es una medida que será aceptada en términos generales por los diferentes estratos de la población en todo el país.

I. Con su aplicación se lograrán importantes beneficios para toda la sociedad, para las familias y las personas en lo individual.

II. La ecología, la economía y el sector eléctrico del país también se verán beneficiados.

III. En particular, para el sector eléctrico se trata de una medida de muy alta rentabilidad y bajo costo, cuyos beneficios se acumularán año con año, ya que con ella se contribuye en el propósito de administrar la demanda de energía eléctrica y generará el 15% de los ahorros de energía eléctrica programados para el año 2000, mismos que significarán el 7.3% del consumo nacional alcanzado en 1994.

ROGELIO COVARRUBIAS RAMOS



Ingeniero electricista egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional en 1958. Ha tomado cursos especializados en administración de empresas en la ESCA y en el IPADE. Durante 18 años colaboró en la industria privada en el campo de la ingeniería eléctrica y de dirección de proyectos de inversión en la Compañía Fundadora de Hierro y Acero de Monterrey, Ingeniería Eléctrica Industrial, Nacional de Cobre y Servicios Industriales Nacobre. Ingresó al IIE en 1977 donde actualmente es el jefe del Departamento de Uso de Energía Eléctrica en donde coordina diferentes proyectos de conservación y ahorro de energía. Ha dirigido proyectos nacionales en colaboración con organismos internacionales como el PNUD, ONUD y BID. Actualmente colabora con el Fide como coordinador nacional para la implementación del horario de verano en México. Es miembro del CIME, IEEE, SAE y AIUME.

UIT: a la vanguardia de los servicios informativos

La Unidad de Información Tecnológica (UIT), del Instituto de Investigaciones Eléctricas, pone a disposición del público en general una estructura de información que se mantiene al día sobre los avances mundiales en las diferentes áreas del sector eléctrico.

Servicios que proporciona la UIT

Referencias: servicio de alerta y actualización que contempla la información bimestral más completa en 15 temas técnicos.

Búsqueda bibliográfica: búsqueda de información en fuentes nacionales e internacionales sobre temas específicos solicitados por el usuario. La información se presenta de manera accesible, incluye citas bibliográficas y fotocopias de los documentos disponibles en el acervo de la UIT.

Pregunta-respuesta: proporciona a los interesados datos teóricos, estadísticos o de cualquier naturaleza técnica. La respuesta puede ser desde un dato específico hasta documentos completos.

La UIT cuenta con acceso a cerca de 600 bases de datos, convenios de intercambio con 98 centros de información, ocho colecciones de normas, catálogos y directorios de empresas y fabricantes, casi 47 mil monografías, cerca de 17 informes técnicos y 1,000 títulos de publicaciones periódicas lo que la convierte en un completo y avanzado centro especializado a la vanguardia de los servicios informativos.

Para mayor información sobre costos y facilidades con que cuenta la UIT, se puede contactar a través de correo electrónico en:

INTERNET: UITEC@IIEVMS1.IIECUER.UNAM.MX

Por teléfono al (73) 18 38 11 y 18 24 60
Fax: (73) 18 24 61
o directamente en el Instituto de Investigaciones Eléctricas
Unidad de Información Tecnológica
Av. Reforma número 113
62490 Temixco, Morelos.

mX9800197

Metodología para la evaluación del ahorro de energía debido al cambio de horario durante la época del verano

Gaudencio Ramos Niembro

Antecedentes

El pasado cuatro de enero, se publicó en el Diario Oficial un decreto del Presidente Ernesto Zedillo Ponce de León, en el cual se establecen horarios estacionales en los Estados Unidos Mexicanos.

El cambio a un horario que estimule mayormente el uso de la luz natural, puede tener un efecto en la magnitud de los picos de la demanda matutina y vespertina y en el consumo global de energía eléctrica.

Según estudios realizados en otro países, en donde el cambio de horario durante la época del verano (CHV) es ya una costumbre año con año, el efecto impacta principalmente en las zonas urbanas y en particular en los usuarios domésticos, representando un ahorro en energía del orden del 1.1% del consumo nacional.

Lo anterior dio lugar a la realización de un proyecto de investigación contratado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE), el Fideicomiso de Apoyo al Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (Fide) y la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae), cuyo objetivo fue desarrollar un modelo matemático que permitiera evaluar cuantitativamente el ahorro de energía debido al cambio de horario durante la época del verano, a través de mediciones de consumos de los diferentes usuarios (sectores doméstico, comercial e industrial), considerando las diversas variables que impactan en el consumo.

Alcance de los estudios

Para desarrollar el sistema que permitiera evaluar el ahorro de energía debido al CHV, adelantando una hora el actual horario durante un periodo de siete meses, iniciando el primer domingo del mes de abril y terminando el último sábado del mes de octubre, fue necesario realizar los siguientes pasos:

a) Diseñar el experimento que permitiera la selección de los sitios de medición representativos del país.

b) Considerar la realización de mediciones, tanto de los consumos eléctricos de los usuarios como de los parámetros meteorológicos que inciden en la demanda de energía.

c) Desarrollar los modelos matemáticos que permitieran correlacionar las condiciones ambientales con la demanda de energía.

d) Identificar los parámetros de mayor variabilidad durante el cambio de horario.

Problemática para evaluar el cambio de horario de verano

En las naciones de industrialización avanzada, el cambio del horario en el verano es un ejemplo de la promoción de programas y de la aplicación de medidas concretas tendientes al uso más eficiente de la energía eléctrica. En algunos países en vías de desarrollo se han propuesto con retraso políticas energéticas orientadas en la misma dirección.

El cambio a un horario que estimule mayormente el uso de la luz natural, puede tener un efecto en la magnitud de los picos de la demanda matutina y vespertina y en el consumo global de energía eléctrica.

Sin embargo, tanto en estos países como en aquellos, la tarea de cuantificar las ventajas de la aplicación del cambio horario y de evaluar los programas de ahorro y conservación de la energía eléctrica, presentan complejos problemas operativos, teóricos y metodológicos.

En primer lugar, las observaciones dirigidas al desarrollo de las investigaciones y a los métodos de análisis de la información parecen estar de acuerdo con que existe la necesidad de contar con la teoría adecuada y con los procesos o las estrategias que serían útiles en la construcción de tales teorías.

En este sentido, estas teorías se basan en investigaciones empíricas que recurren considerablemente a la econometría y a la estadística matemática.

En segundo lugar, los estudios que se han realizado en algunos países en desarrollo, muestran que los problemas de conservación y ahorro de energía no implican una cuestión exclusivamente económica y tecnológica, tal y como se afirma en las investigaciones que se han llevado a cabo en los países altamente industrializados.

En los países en vías de desarrollo, la ineficiencia en el uso de la energía está íntimamente relacionada con aspectos institucionales y con características sociales, económicas y culturales de los consumidores, que apenas se han estudiado superficialmente.

→ 14

Nuevo horario de verano, cambio de actitud

Entrevista con el ingeniero Odón de Buen, secretario técnico de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae)

Se espera que el cambio de horario en México repercute positivamente en el ahorro de energía eléctrica y que exista un cambio de actitud e interés social ante las ventajas de usar con mayor aprovechamiento la luz del sol.

En la presente entrevista, el ingeniero Odón de Buen, expone algunos comentarios sobre las implicaciones de esta acción y acerca de cómo se podrá medir su eficiencia en términos reales una vez que en todos los relojes del país se adelante una hora desde el primer domingo de abril hasta el último domingo de octubre.

¿Cuáles serán los mayores beneficios que se obtendrán con el cambio de horario de verano y qué papel desempeña esta medida dentro de los planes y programas de la Conae?

De acuerdo con lo que en el sector hemos analizado, los mayores beneficios que se obtendrán del cambio de horario de verano son una reducción en el consumo eléctrico y de las emisiones de contaminantes a la atmósfera que van asociadas con la producción de electricidad. Esto no quita, por supuesto, que otros beneficios que han sido definidos como tales, pero que son difíciles de estimar con suficiente precisión, no dejen de ser importantes. En este sentido resaltan, desde nuestro punto de vista, dos efectos positivos: el educativo y el social.

Sin dejar de admitir que "educativo" y "social" tienen connotaciones muy amplias, considero, primero, que el tener que cambiar la hora a los relojes va a causar un cuestionamiento amplio de la gente sobre los fenómenos astronómicos y geográficos que determinan que varíe durante el año el tiempo diario de insolación, lo que inevitablemente llevará a un interés sobre estos temas. En este mismo sentido, el que el ahorro de energía se dé por un mejor uso de un recurso natural como la luz solar, llevará a que mucha gente revalore la importancia del aprovechamiento de este tipo de recursos.

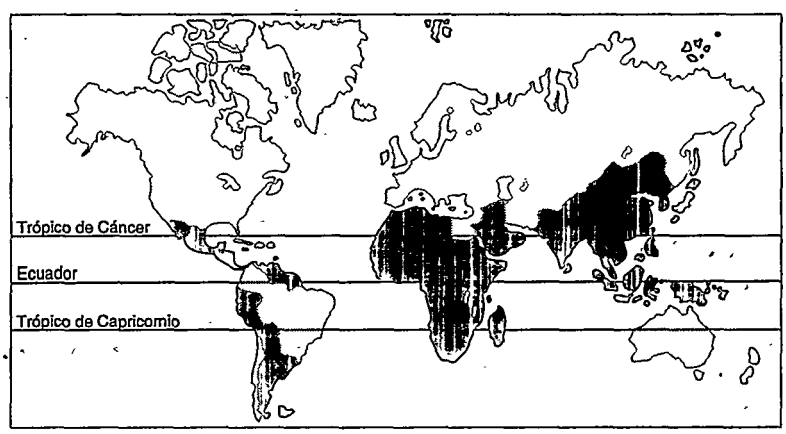
ODÓN DEMOFILO DE BUEN RODRÍGUEZ



Licenciado en ingeniería mecánica eléctrica por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con maestría en energía y recursos en la Universidad de California en Berkeley, se ha especializado en temas de ahorro, uso eficiente y fuentes renovables de energía. Asesor de organismos internacionales sobre temas de ahorro de energía es autor de varias docenas de reportes técnicos, artículos académicos y artículos de difusión en México, Estados Unidos, Canadá e Inglaterra. Profesor universitario de licenciatura y maestría, actualmente está al frente de la Secretaría Técnica de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.

En segundo lugar, la posibilidad de tener luz solar por más tiempo y así alargar las tardes en una parte del año, permitirá que los niños puedan jugar en exteriores por más rato y que la población, particular-

Países que realizan cambio de horario.



Para el cambio de horario de verano se está considerando realizar actividades de evaluación desde el momento mismo en el que se está diseñando el programa.

mente las mujeres, puedan salir a hacer las compras de la tarde al resguardo de la luz solar, lo que, inevitablemente, traerá beneficios de salud física y mental en amplios sectores de la población.

En cuanto al papel que la medida desempeña en los planes de la Conae, pues es una medida que fue evaluada seriamente por la Comisión durante un par de años, con la asesoría del IIE, pero que no forma parte de su actividad fundamental para este año. Esto se debe a que, por carácter de medida de ahorro de energía eléctrica y por la capacidad de la CFE para llegar a todos los rincones del país, ella y el Fide están realizando el proyecto. Esta es una situación con la que estamos completamente de acuerdo, lo que se ha reflejado en una cercana colaboración de la Conae con el Fide en los preparativos del proyecto.

Una de las partes del proyecto del cambio de horario de verano es la relativa a la evaluación. ¿En qué sentido los resultados de dicha evaluación serán de utilidad?

Esta es una pregunta muy interesante e importante, pues trae a colación uno de los problemas más serios que hemos tenidos quienes hemos trabajado para ahorrar energía en gran escala en nuestro país, ya que hasta hace poco no se había tenido la necesidad de incorporar esta actividad a las que se realizan para ahorrar energía. Afortunadamente, para el cambio de horario de verano se está considerando realizar actividades de evaluación desde el momento mismo en el que se está diseñando el programa.

Consideramos que evaluar los impactos reales de una medida que se construye a partir de millones de pequeñas acciones, que es una carácter fundamental de la actividad de ahorro de energía, es un gran reto que tienen ante sí quienes van a realizar la evaluación. Sin dejar de tener presentes las grandes limitaciones metodológicas y de información que se tienen en este país para hacer este tipo de evaluaciones, y por lo tanto la dificultad de establecer con precisión el impacto de la medida, el que se esté considerando la evaluación nos permitirá, por un lado, desarrollar

Los mayores beneficios que se obtendrán del cambio de horario de verano son una reducción en el consumo eléctrico y de las emisiones de contaminantes a la atmósfera que van asociadas con la producción de electricidad.

esa capacidad de evaluación y, por otro, conocer mejor la forma en la que los usuarios finales hacen uso de la energía eléctrica, lo cual es fundamental para poder diseñar estrategias para otros programas.

Como usted afirma, se piensa que crear conciencia en los usuarios será uno de los principales beneficios del cambio de horario. ¿Hay planes para aprovechar esa toma de conciencia con el fin de implantar otras medidas de ahorro de energía?

La toma de conciencia de los usuarios será muy importante, porque se corre el riesgo, y eso hay que admitirlo, de que la gente deje las luces prendidas durante las mañanas en algunas partes del periodo de horario de verano y en ciertas regiones del país donde no se cuente con suficiente luminosidad como para no tener que prender las luces, lo que puede ser contraproducente a los propósitos de la medida. En este sentido el hacer ver a la población el uso innecesario de la luz artificial en ciertas condiciones, puede llevar a que fuera del hogar se tenga una actitud positiva para mantener la iluminación artificial apagada cuando no se necesite.

Consideramos que evaluar los impactos reales de una medida que se construye a partir de millones de pequeñas acciones, que es una carácter fundamental de la actividad de ahorro de energía, es un gran reto que tienen ante sí quienes van a realizar la evaluación.

Preocupados por esta necesidad y por la obligación que tenemos en el gobierno federal de poner el ejemplo del uso racional de la energía, en la Conae consideramos en los planes de este año, un programa orientado precisamente a hacer un uso más eficiente de la energía eléctrica utilizada para iluminación dentro de los edificios públicos. Esto se fundamenta en el hecho de que la mayor parte de la energía que se utiliza en los edificios es eléctrica y es para su iluminación, por ello se ha detectado que existe un gran potencial de ahorro en este rubro en edificios en general y en los del gobierno federal en particular. Estamos convencidos que con el ejemplo que logremos dar como servidores públicos a la población a través de un programa de este tipo, el cual realizaremos en coordinación con el Fide y con colaboración del IIE, los impactos esperados de ahorro de energía se amplíen y que el cambio de horario de verano sea también un cambio de actitud ante el desperdicio de los recursos naturales.

11 ←

En tercer lugar, los escasos estudios en detalle sobre los subsectores doméstico, comercial e industrial y las restricciones en la información, hacen conveniente señalar algunos aspectos metodológicos para profundizar en el análisis de los usos energéticos en estos sectores.

A este respecto se propone la elaboración de modelos lineales mediante la aplicación del diseño experimental para el análisis, entre otros temas, de la estructura habitacional, aparatos consumidores de energía, la iluminación, clasificación de los diferentes tipos de usuarios, naturaleza de equipos consumidores de energía, etcétera.

En cuarto lugar, el medio físico que rodea al hombre, específicamente el clima, es el factor que afecta de manera más directa el consumo de energía eléctrica. El clima tiene influencia constante, a veces determinante y otras veces con una jerarquía menor, pero siempre es obligado tomarlo en cuenta.

El clima incide en el bienestar del hombre. Las personas manifiestan comodidad o incomodidad ante determinadas temperaturas y humedad del ambiente. En la vida moderna, la energía eléctrica es la alternativa más viable para un buen número de comodidades en el hogar, la fábrica, las diversiones.

La duración del día, la nubosidad, la luminosidad y la insolación, determinan la cantidad de luz solar que recibe un lugar, la cual ejerce influencia en todo el quehacer del hombre; la iluminación natural determina las actividades agrícolas e industriales, los intercambios comerciales, las actividades de diversión y de recreo, etc. Los patrones de comportamiento del hombre que vive en localidades urbanas, en donde utiliza los recursos energéticos en forma intensiva y con frecuencia de manera ineficiente y dispendiosa, son diferentes a los del hombre que vive en localidades rurales.

Bases para la evaluación del potencial de ahorro

En el año de 1992, diversas instituciones gubernamentales realizaron estudios para evaluar el posible potencial de ahorro de energía eléctrica si se adoptaba el cambio de horario en la mayor parte del territorio nacional. Los estudios arrojaron como resultado que se podría alcanzar el 1.1% de ahorro de la energía eléctrica del total anual producida por el sector eléctrico.

Para el cálculo del potencial de ahorro de energía eléctrica debido al CHV se utilizó información globalizada, la cual consideraba básicamente los siguientes conceptos:

- El mayor impacto sería en los usuarios domésticos.

En el año de 1992, diversas instituciones gubernamentales realizaron estudios para evaluar el posible potencial de ahorro de energía eléctrica si se adoptaba el cambio de horario en la mayor parte del territorio nacional. Los estudios arrojaron como resultado que se podría alcanzar el 1.1% de ahorro de la energía eléctrica del total anual producida por el sector eléctrico.

- El por ciento de consumo en iluminación, es función del rango de consumo de energía eléctrica. La figura 1 muestra los resultados obtenidos a través de varios estudios [Fide-CFE, 1992; Campero, E., 1992], basados en el posible consumo en los diversos rangos de consumo, con base en el probable equipamiento de los usuarios.
- Suposición de que el ahorro correspondía a una hora diaria de iluminación. La figura 2 muestra en forma esquemática tal efecto.

Principio de evaluación del ahorro por el CHV

El principio sobre el cual se basa el modelo de análisis de cambio de horario de verano, consiste en considerar que la energía que se consume con y sin cambio de horario de verano se modifica por cualquiera de los tres factores siguientes [Díaz Acosta *et al,* 1993]:

- Las condiciones meteorológicas (temperatura, etcétera).
- Factores no controlables como el tipo de usuario (número de personas, edades, etc.), la hora del día, el día de la semana, eventos especiales, entre otros.
- La localización geográfica.

En resumen, en el modelo matemático, la cantidad de energía eléctrica que se consume en un momento dado es una función de las variables antes indicadas, cuyos efectos se miden a través de tasas o índices de cambio que informan sobre el incremento o decremento de la cantidad de energía consumida por cada unidad de cambio de cada uno de los elementos, en un periodo de tiempo determinado. Si con estos factores se realiza un pronóstico de la cantidad de energía que se consumirá en un sitio y en un tiempo específicos (sin cambio de horario), se supone que existirá una diferencia entre el consumo pronosticado o estimado y el consumo observado o registrado (con cambio de horario). En otras palabras, esta diferencia constituirá la característica sobresaliente de la comparación de ambas escenarios de consumo: antes y después del cambio de horario.

Selección de la muestra

Como primer punto del estudio, fue necesario plantear una estrategia que permitiera definir el tipo y tamaño de la muestra para así poder evaluar en forma confiable, el impacto que en el consumo de la energía eléctrica tiene el cambio de horario de verano [Díaz Acosta *et al,* 1993].

Para tal efecto, se sugirió analizar las ciudades de mayor índice de desarrollo socioeconómico y con características similares, tanto geográficas (latitud, longitud y altitud) como climatológicas (temperatura y precipitación pluvial, al menos).

Primero: se ordenaron en sentido decreciente las localidades según su

FIGURA 1
Por ciento de la energía total destinada a iluminación, en función del consumo.

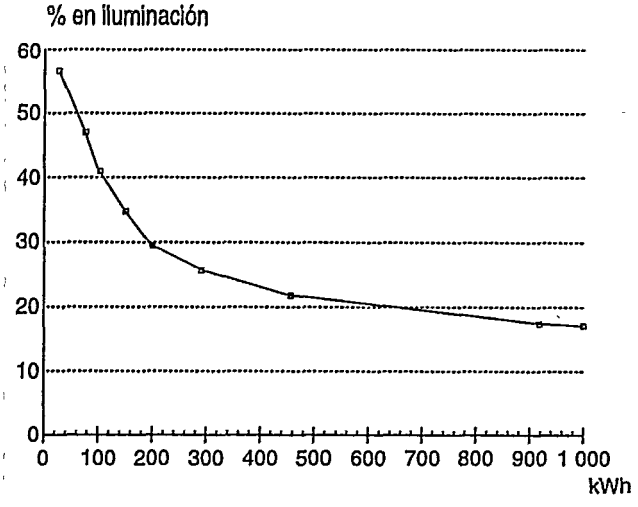
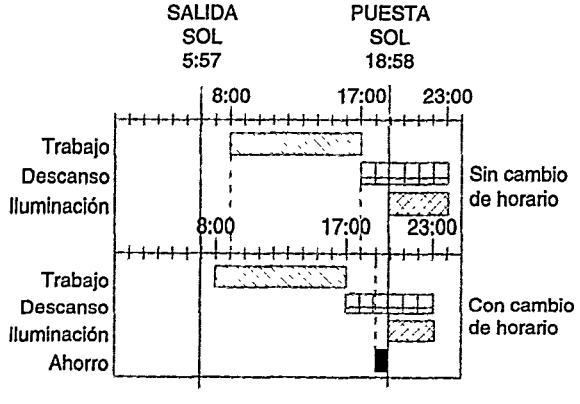


FIGURA 2
Ahorro de 1 hora al día en iluminación artificial.



índice de desarrollo socioeconómico, y se eligieron aquellas cuyo índice fue mayor a un índice límite previamente fijado. El índice de desarrollo socioeconómico se compone de diversas variables, las cuales incluyen indicadores económicos, sociales y de infraestructura, tales como el proceso de industrialización, la modernización agrícola, la capacidad productiva por habitante, la infraestructura económica y las condiciones sociales de la población.

Segundo: las localidades elegidas se agruparon considerando su perfil geográfico, demográfico y tarifario, es decir: latitud, longitud, altitud, precipitación pluvial, número de habitantes y tarifa según la Comisión Federal de Electricidad.

Tercero: de cada grupo se seleccionó una ciudad. Las doce ciudades seleccionadas son Mexicali, Baja California, Hermosillo, Sonora, Ciudad Juárez, Chihuahua, Torreón, Coahuila, Monterrey, Nuevo León, San Luis Potosí, San Luis Potosí, Culiacán, Sinaloa, Guadalajara, Jalisco, México, D. F., Puebla, Puebla, Coatzacoalcos, Veracruz y Mérida, Yucatán.

Cuarto: el número de usuarios que se incluyeron en la campaña es del orden de 600 en todo el país; la distribución por ciudad es: cuarenta son usuarios domésticos distribuidos proporcionalmente por rango de consumo; una tienda "ancla" en un centro comercial; un supermercado grande, y un usuario industrial representativo de la zona. En el caso específico de la ciudad de México, el número de usuarios domésticos se incrementó a 120 y se seleccionaron varios usuarios comerciales importantes, así como algunos alimentadores de distribución que proporcionan energía a usuarios típicamente domésticos.

La energía que se consume con y sin cambio de horario de verano, se modifica por las condiciones meteorológicas, los factores no controlables como el tipo de usuario (número de personas, edades, etcétera) y la localización geográfica.

Acciones que se van a realizar para evaluar el CHV

Aun cuando las variables utilizadas para evaluar el ahorro potencial son las adecuadas, se consideró conveniente evaluar el efecto de otras variables, siendo las más importantes:

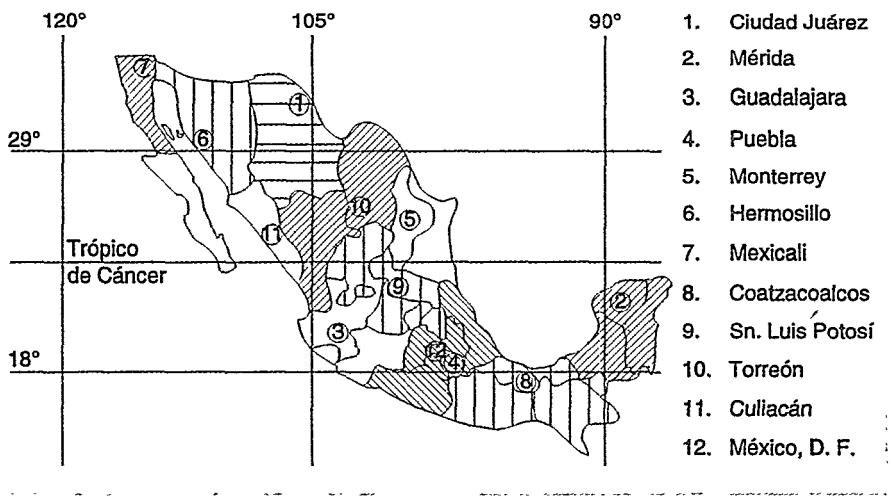
- Iluminación debida a la localización geográfica de las ciudades.
- Hábitos de uso de la energía.
- Uso de la iluminación en los crepúsculos.
- Patrones de comportamiento.

En relación con el efecto de la iluminación como una función de la localización geográfica (latitud y longitud), las ciudades se escogieron tratando de representar todas las condiciones del país, tal y como se muestra en la figura 3.

En lo que respecta a los hábitos de uso, se obtendrán a través de los índices de comportamiento que arrojen las encuestas que se realizarán a todos los usuarios.

Con respecto al uso de la iluminación en los crepúsculos, será muy importante el hecho de evaluar las horas en que tiene mayor impacto el uso de la iluminación artificial, tal y como se muestra en la figura 4, la cual es el resultado de estudios realizados por la CFE; en dicha figura se pueden resaltar dos aspectos importantes: en la ciudad de Guadalajara existe un mayor consumo de energía en las mañanas, debido a

FIGURA 3
Ciudades incluidas en la campaña de medición.



que amanece después que en la ciudad de Monterrey y, por el contrario, en la ciudad de Monterrey se prenden antes las luces en las tardes, debido a que el sol se oculta primero [Vargas Nieto *et al,* 1992].

Finalmente, en lo que respecta a los patrones de comportamiento, estudios recientes muestran que no necesariamente el equipamiento (léase rango de consumo) es el que permite clasificar a los usuarios, sino que el patrón de comportamiento a lo largo del año podría explicar mejor el consumo de la energía en los diferentes sectores [Ramos, Gaudencio *et al,* 1995]. Las figuras 5 y 6 muestran dos patrones de comportamiento, comparando las ciudades de Mexicali, Baja California, y San Luis Río Colorado, Sonora. En la primera de ellas se ve que los comportamientos son idénticos tanto en la época del invierno (horario tradicional) como en la del verano (cambio de horario); por el contrario, en la segunda de ellas se observa que para el mismo rango de consumo, los usuarios se pueden comportar diferente en función de otras variables: número de miembros de la familia, edades, ingresos, etcétera.

Campaña de medición

Para cumplir con los objetivos antes mencionados, la Comisión Federal de Electricidad realizó una campaña de medición en los usuarios antes indicados, durante todo el año de 1995; para el caso específico de las ciudades de Mexicali y Hermosillo, la campaña de medición se inició a partir del mes de octubre de 1994; la razón de lo anterior es realizar una evaluación preliminar en dos ciudades, una con cambio de horario (Mexicali) y otra sin él.

Adicionalmente y para poder contar con índices de comportamiento en las ciudades y los usuarios, se realizarán tres encuestas: una inicial, que permita conocer los aspectos más importantes del comportamiento de los diversos sectores de la población en cada ciudad, así como de carácter climático y de eventos regionales; una segunda sobre el equipamiento y el uso de la iluminación artificial y de los principales aparatos en los usuarios que se monitorearán en la campaña, y un informe o bitácora mensual que permita identificar los aspectos relevantes que en el mes específico

FIGURA 4
Utilización de la iluminación artificial en las ciudades de Guadalajara, Jalisco y Monterrey, Nuevo León.

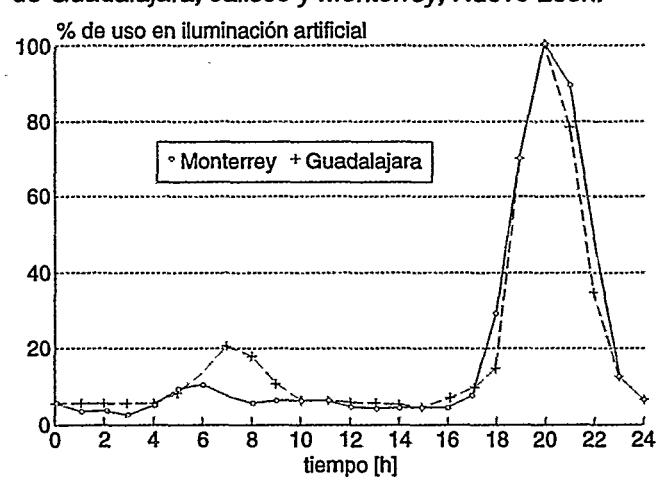


FIGURA 5
Usuarios con patrón de comportamiento similar a lo largo del año.

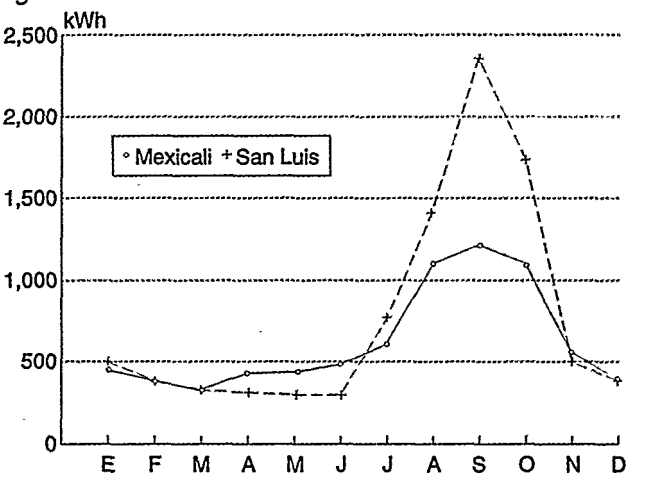


FIGURA 6
Usuarios con patrón de comportamiento diferente, en función de la época del año.

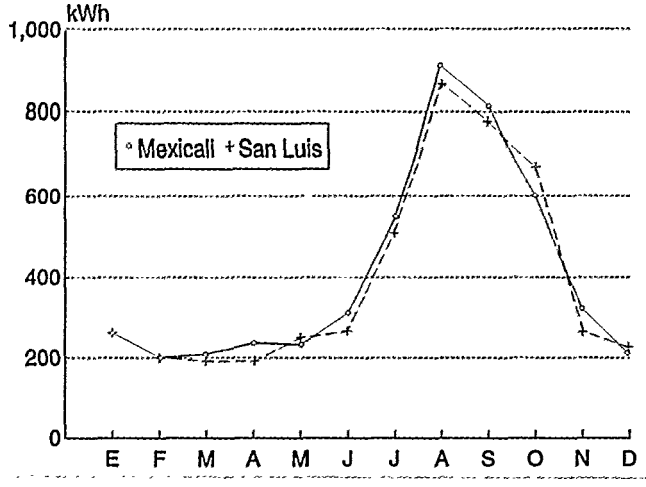
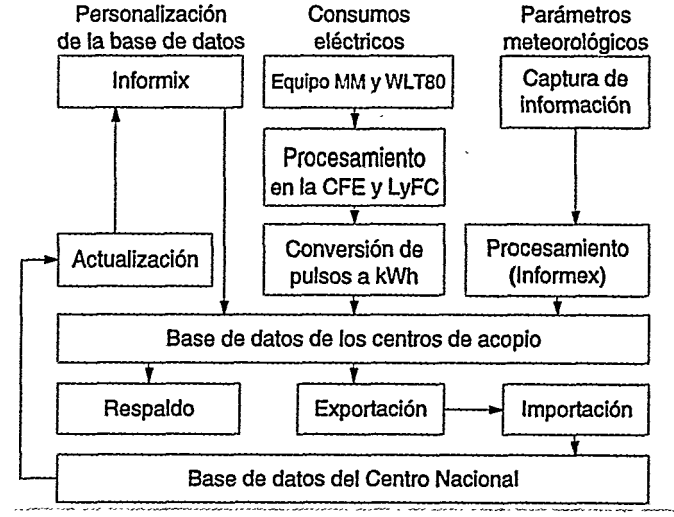


FIGURA 7
Flujo de información usuarios ➡ base de datos.



hayan modificado los hábitos o costumbres de la ciudad.

Sistema de cómputo para el análisis

El IIE realizó, a solicitud expresa de la CFE, un sistema para el análisis de la información. La figura 7 muestra en forma esquemática el flujo de la información desde los usuarios hasta la base de datos y la figura 8 muestra el diseño conceptual para el análisis de la información, es decir, las diversas formas en que es posible extraer la información para ser analizada por el modelo matemático [Ramos, Gaudencio *et al*, 1993].

Referencias

Campero, Eduardo (1992), "Rangos de consumo de los usuarios en función de su equipamiento", UAM-IIE.

Díaz Acosta, Rodrigo y Gaudencio Ramos Niembro (1993), "Modelo conceptual y análisis de las variables que influyen en el ahorro de energía eléctrica debido al cambio de horario en el verano", documento IIE/DSE/DUEE/5204.04, versión 2, 29 de noviembre.

Díaz Acosta, Rodrigo, Gaudencio Ramos Niembro, Eduardo Lobatón González y Rogelio Covarrubias Ramos (IIE); Enrique Vargas Nieto y Rita Saucedo Flores (CFE) (1993), "Diseño del experimento", documento IIE/DSE/DUEE/5204.01, versión 2, 30 de septiembre.

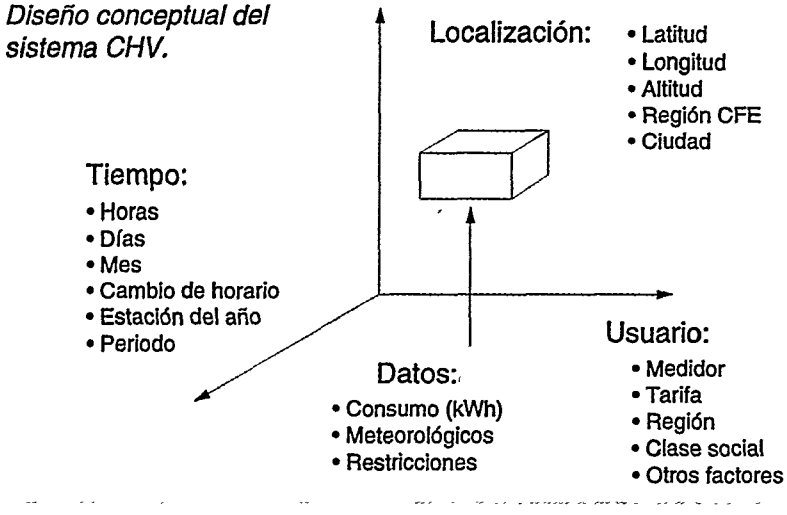
FIDE-CFE (1992), "Bitácora para el cálculo del ahorro de energía eléctrica en iluminación artificial debido al cambio de horario en el verano".

Ramos Niembro, Gaudencio, Manuel Rodríguez Muñoz y Víctor Hugo Ruiz Montenegro (1993), "Documento de usuario del sistema CHV para los centros de acopio", documento IIE/DSE/DUEE/5204.07, versión 2, 25 octubre.

Ramos N., Gaudencio, Rodrigo Díaz A., Eduardo Campero L., Martín Maqueda Z., Raúl Fiscal E. (1995), "Estimación del tiempo de uso de la energía eléctrica en iluminación artificial en los sectores doméstico y comercial", documento IIE/DSE/DUE/10378.01, versión 1, 14 de diciembre.

Vargas Nieto, Enrique *et al* (1992), "Encuesta para el análisis de iluminación: Guadalajara y Monterrey", Comisión Federal de Electricidad, Proyecto ILUMEX.

FIGURA 8
Diseño conceptual del sistema CHV.



GAUDENCIO RAMOS NIEMBRO



Obtuvo el título de ingeniero mecánico electricista del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) Campus Monterrey en 1969 y la maestría y el doctorado en la especialidad de control automático en el Instituto Politécnico de Grenoble, Francia, en 1972 y 1975, respectivamente. Ingresó como investigador al IIE en el año de 1988. Actualmente trabaja en el Departamento de Uso de la Energía Eléctrica. Ha publicado más de 45 trabajos en diversos foros nacionales e internacionales. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) y de la Academia Nacional de Ingeniería.

Estanques solares, la maduración de una tecnología

El gran estigma de las tecnologías no convencionales que utilizan la energía del sol, del viento, de la biomasa o la fuerza del agua para generar energía de diverso tipo, es que no se les ha llegado a considerar como tecnologías maduras a pesar de haber demostrado en muchas ocasiones su eficiencia y alta confiabilidad.

Por ello, estudiosos de diversas partes del mundo no desisten en sus investigaciones, como en el caso de los llamados estanques solares, tecnología que ha probado su madurez en varios países como Israel, Estados Unidos, Italia, Argentina y, México.

Obviamente aquí valdría cuestionar hasta qué punto es posible la factibilidad de dicha tecnología mientras no pueda competir en precio con las tecnologías hoy consideradas como maduras. La realidad es que esta tecnología todavía no es lo suficientemente económica como para poder penetrar de lleno en el mercado internacional, pero se olvida que a largo plazo se recupera la inversión inicial y que el daño al entorno es mínimo.

Parecería entonces, que el único faltante sería lograr la siguiente combinación: detectar zonas con potencialidades de desarrollo, interés de la iniciativa privada en este nuevo concepto e implantación de los estanques solares en sitios idóneos, identificados previamente por los estudiosos en el tema.

Historia

A partir de las observaciones hechas por investigadores húngaros a finales del siglo pasado sobre la estratificación térmica salina de algunos lagos poco profundos, estudiosos israelitas se interesaron en ese fenómeno y en 1948 propusieron la nueva tecnología de estanques solares.

En la década de los setenta se llevaron a cabo varios estudios teóricos y experimentales al respecto, principalmente en Israel, en donde se propusieron esquemas para la desalación de agua, generación de calor para procesos agroindustriales e incluso generación de electricidad con base en estanques solares. La tecnología no progresó mas allá de algunos modelos experimentales, debido principalmente al bajo costo de los combustibles fósiles y a la dificultad de generar electricidad operando a temperaturas menores de 100°C con las máquinas térmicas existentes en la época.

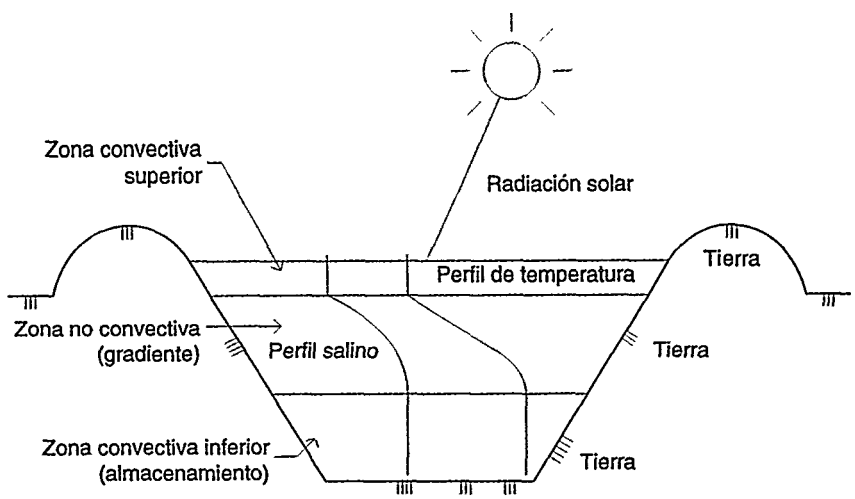
México retomó esta tecnología desde la década de los ochenta, lo que le ha valido formar parte de los pocos países con avances en dicho campo.

Características de un estanque solar

El estanque solar en su forma más común es un reservorio, un recipiente lleno de agua de aproximadamente tres metros de profundidad que contiene cierta cantidad de sales disueltas de tal forma que en el fondo la concentración de sales es más alta que en la superficie. Por tanto, existe un gradiente de densidades que suprime las corrientes de convección cuando el fondo del estanque se calienta por efectos de la energía solar. En tales condiciones, es posible calentar el fondo del estanque y alcanzar temperaturas del orden de 100°C (dependiendo del tipo de sal que se utilice) mientras la superficie se mantiene a temperatura ambiente. La clave en la operación consiste en mantener inalterado el perfil de densidades mientras se adiciona y se extrae la energía, considerando la tendencia natural de las sales a difundirse y tratar de uniformar la concentración de toda la solución. Así, un estanque solar usualmente consta de tres zonas: una capa convectiva en la superficie, una zona de gradiente no convectiva y una segunda capa convectiva en el fondo (ver figura 1).

Los estanques solares —que pueden ser hondonadas naturales o artificiales— tienen otras características que los hacen muy flexibles como captadores de energía solar: al obtener energía térmica, ésta se puede convertir en energía mecá-

FIGURA 1
Perfiles de temperatura y salinidad.



MX9800135



El doctor Richard E. Balzhiser, director del EPRI, durante su conferencia en el coloquio *Nuevas tecnologías para el sector eléctrico del siglo XXI.*

mos cambios que transformaron dramáticamente los hogares y los trabajos. De las máquinas de escribir pasamos a los procesadores de palabras y a las computadoras; del papel carbón a las copiadoras y al fax, etc.; no sólo el consumo energético aumentó durante este periodo, sino que la fracción de la energía primaria utilizada para generar electricidad se duplicó (figura 11).

Estoy convencido de que apenas comenzamos a explotar la fuerza y flexibilidad de la electricidad. Los autos eléctricos, las electrotecnologías y los sistemas comerciales por redes de cómputo serán parte de esta nueva etapa. Todo esto abre un enorme panorama para las comunicaciones, la educación, el comercio y la recreación. La tecnología electrónica permitirá la miniaturización y portabilidad de gran variedad de líneas de productos a medida que crezca en sofisticación la tecnología de las baterías".

Implicaciones para las empresas eléctricas

¿Pero todo esto qué significa para las empresas eléctricas? ¡El futuro es mejor para aquellos que lo anticipan! Dando respuesta a la pregunta y reiterando la afirmación, el doctor Balzhiser concluyó en seis puntos su ponencia:

1. El cambio debe esperarse en el sector eléctrico; la extrapolación puede ser muy arriesgada en este momento. Busquemos nuevas oportunidades y paradigmas en periodos de cambio tecnológico e institucional.

2. Debe reconocerse que la electricidad es la forma de energía con mayor valor agregado y esto atraerá nuevos actores, particularmente aquellos que controlan los principales energéticos.

3. Los esfuerzos de investigación deben dar alta prioridad a las ciencias sociales para asegurar que los intereses de las empresas eléctricas concuerden con los de la población local y globalmente con los de cada país.

4. La colaboración en investigación y desarrollo y el intercambio de experiencias a escala internacional robustece la capacidad de adaptación de las empresas eléctricas al acelerado proceso de cambio que vivimos.

5. Debemos comprometernos entusiastamente con la búsqueda de eficiencia. Esperamos que la flexibilidad de la electricidad para captar nuevos mercados aumente más rápido, luego de que las mejoras en eficiencia modifiquen los usos actuales. La eficiencia es saludable, implica responsabilidad ambiental y puede lograrse en la generación, distribución y uso de la electricidad.

6. La electricidad y la educación nos permiten utilizar de manera más efectiva nuestros recursos humanos y energéticos para equilibrar nuestras metas económicas y ecológicas.

SERIE ATLAS OCEANOGRÁFICO
DEL GOLFO DE MÉXICO
Volúmenes I, II y III

La colección completa de la serie *Atlas Oceanográfico del Golfo de México* incluirá ocho volúmenes. Actualmente están a la venta los volúmenes I, II y III con un precio de $300.00 dólares c/u. El pago deberá acompañar todas las órdenes y deberá hacerse a nombre del Instituto de Investigaciones Eléctricas al tipo de cambio del dólar vigente a la fecha de compra.

Por favor complete lo siguiente:

Sr(a).: _____
Compañía: _____
Dirección (calle y número, no apartado postal):
_____
_____
_____
CP, ciudad, estado: _____
_____
_____
Tel./fax: _____
Atención: _____
Número de volúmenes: _____

Las órdenes deberán enviarse por escrito a:
Víctor M. V. Vidal L.
Grupo de Estudios Oceanográficos
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Apartado Postal 1-475
62001 Cuernavaca, Morelos,
México
Para comunicarse con el Dr. Vidal marque el teléfono (73) 18 38 11, extensiones: 7541, 7542 o 7533; si prefiere, mande un fax al número (73) 18 98 54.



Técnica de diagnóstico para la detección de fallas mecánicas en interruptores de potencia

Roberto Liñán, Marciano Pérez y J. Manuel Estrada

Resumen

En el presente artículo se reporta una técnica de diagnóstico no invasiva para detectar fallas mecánicas en interruptores de potencia, apoyándose en el registro y análisis de señales de vibración del equipo bajo prueba. Asimismo, se presenta la evaluación de cuatro interruptores usando esta técnica.

Introducción

La aplicación de técnicas de monitoreo y diagnóstico para interruptores es de gran importancia para el mejoramiento de su confiabilidad operativa.

El desarrollo de la técnica propuesta en este trabajo incluye las etapas de sensado y registro de firmas vibracionales de referencia y prueba, almacenamiento y manipulación de las firmas obtenidas y cálculo de la distancia entre puntos y comparación automática de las firmas de referencia y de prueba para determinar si el equipo está operando normal o anormalmente.

Se evaluaron cuatro interruptores con esta técnica. Uno fue de tipo aislado en SF_6, trifásico, 123 kV, marca Siemens, modelo RS1/EG. Los tres restantes fueron de botella de vacío, marca Siemens, 3AF, 24 kV, accionados por motor. Las pruebas a los interruptores se llevaron a cabo en la subestación localizada dentro de las instalaciones del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), en Salazar, Estado de México.

Planteamiento del problema

En las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica, los interruptores de potencia son componentes vitales y a la vez críticos en el sistema. Esto ocasiona que las compañías de suministro eléctrico establezcan programas de mantenimiento preventivo para asegurar la confiabilidad del equipo en operación.

La práctica actual de mantenimiento preventivo origina una salida temporal de servicio del equipo; se basa principalmente en recomendaciones de los fabricantes que generalmente especifican un programa de mantenimiento periódico cada 10 ó 15 años. Sin embargo, la desventaja de esta práctica radica en que el tiempo transcurrido determina la acción del mantenimiento y no la condición real del equipo. Como consecuencia de esta acción, los componentes podrían reemplazarse innecesariamente, conduciendo a un mantenimiento prematuro, lo que se suma a los costos erogados por el mismo mantenimiento y alcanza hasta una tercera parte del costo total de un interruptor nuevo [Runde, M. *et al*, 1992].

Desde 1978, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) lleva un control estadístico de la operación de sus interruptores que incluye el número de operaciones con/sin falla, el tiempo del último mantenimiento, etc. Esto es con el propósito de identificar y conocer el estado de sus equipos, dada la gran variedad de marcas, diseños, tipos de extinción del arco y aplicación, para preveer su mantenimiento en forma oportuna. Sin embargo, esta práctica es necesaria pero no del todo efectiva para identificar alguna operación anormal del equipo. Las operaciones anormales comúnmente se presentan con la operación continua del interruptor, donde el mecanismo sufre desgastes irreversibles por fatiga del material, tales como elongación de resortes, desalineamientos y desajustes de los eslabones de levas, topes y contactos, a lo cual se le atribuye ser la principal causa de falla mecánica en interruptores de potencia, y que corresponde aproximadamente al 70% del total de las fallas [CFE, 1993; Mazza, G. *et al*, 1981].

Los recientes avances tecnológicos en el desarrollo de sensores, sistemas de adquisición de datos y técnicas de programación hacen posible el desarrollo y aplicación de sistemas de monitoreo y diagnóstico para interruptores [Hess *et al*, 1992]. Estos sistemas de monitoreo son diseñados para evaluar en tiempo real la condición del equipo, permitiendo así la capacidad de rastrear parámetros de interés, detectando el desarrollo de fallas incipientes y diagnosticando condiciones anormales. Dichas advertencias permiten la programación de reparaciones en los tiempos más convenientes, permitiendo pasar del mantenimiento preventivo (intervalos fijos de tiempo) al predictivo (basado en la condición del equipo).

Firmas acústicas

En todas las pruebas, los interruptores se operaron sin carga y telecomandados desde la caseta de

La aplicación de técnicas de monitoreo y diagnóstico para interruptores es de gran importancia para el mejoramiento de su confiabilidad operativa.

control de la subestación. La obtención de las firmas vibracionales y la evaluación de estos equipos se determinaron con base en comparaciones de datos de aceleración externa medida en diferentes puntos de las paredes del tanque y sólo bajo condiciones normales de operación por restricciones para la introducción de fallas en dichos equipos.

La figura 1 muestra un diagrama de bloques del sistema de diagnóstico y adquisición de datos empleado en esta primera fase.

Durante las pruebas en laboratorio, varios acelerómetros se colocaron en cada polo de los interruptores de potencia. La ubicación del interruptor aislado en SF_6, de los tres interruptores de vacío, se muestra en las figuras 2 y 3 respectivamente.

FIGURA 1
Diagrama de bloques del diagnóstico y adquisición de datos para evaluación de interruptores.

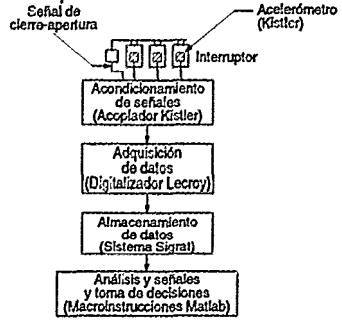


FIGURA 2
Ubicación de acelerómetros en el interruptor aislado en SF6.

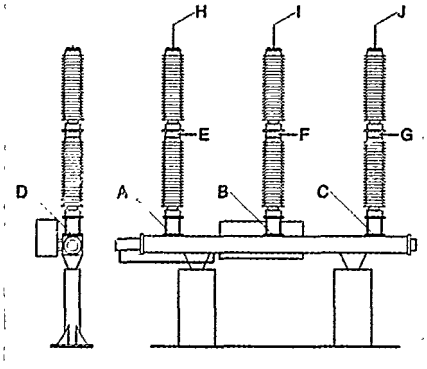
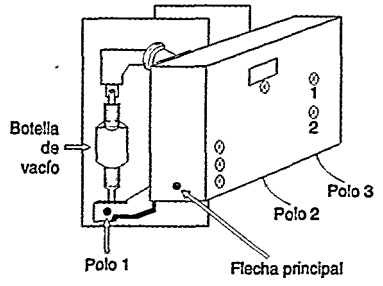


FIGURA 3
Ubicación de acelerómetros en los interruptores de vacío.



Descripción de la instrumentación

Los acelerómetros usados durante las pruebas son marca Kistler, modelo 8726A500, rango de operación nominal de 500 g, y un rango en frecuencia nominal de 0.5 a 9 kHz.

Para el acondicionamiento de la señal, se usó un acoplador de seis canales, marca Kistler, modelo 5126A1, con ganancia ajustable de 0.1 a 100x, y filtrado interno.

Los acelerómetros se montaron a través de un perno roscado sobre una base de acero inoxidable, la cual se adhirió firmemente con soldadura en frío en cada uno de los puntos de medición en el tanque del interruptor.

Las señales de aceleración provenientes de los acelerómetros se amplificaron a través del acoplador descrito arriba y se enviaron a un sistema de adquisición de datos para su digitalización. El equipo usado para este propósito fue un digitalizador de cuatro canales de entrada, modelo 6810, marca Lecroy.

Las firmas vibracionales de apertura y cierre de cada interruptor se grabaron simultáneamente para realizar un análisis de tiempos posterior. El ancho de banda de la información de aceleración fue de 300 Hz a 6 kHz y se usaron frecuencias de muestreo de 50 kHz en el digitalizador para su captación.

La información vibracional obtenida se almacenó en una computadora personal para su manipulación y análisis posterior.

Desde 1978, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) lleva un control estadístico de la operación de sus interruptores que incluye el número de operaciones con/sin falla, el tiempo del último mantenimiento, etc. Esto es con el propósito de identificar y conocer el estado de sus equipos, dada la gran variedad de marcas, diseños, tipos de extinción del arco y aplicación, para preveer su mantenimiento en forma oportuna.

Metodología de análisis

El procedimiento usado para el monitoreo, procesamiento y análisis de las firmas acústicas, consiste en lo siguiente [Demjanenko, V. *et al*, 1990]:

Paso 1: sensar y monitorear uno o más juegos de señales acústicas en el dominio del tiempo del interruptor de referencia, cuando este se encuentre libre de defectos.

Paso 2: selección de la cantidad, tamaño y localización de las ventanas en el dominio del tiempo del espectro de señal (paso opcional). Estas ventanas se pueden seleccionar manual o automáticamente. La selección automática comprende:

- Procesamiento de la señal a través de la determinación de la envolvente.
- Determinación de picos y valles usando el método de los mínimos cuadrados.
- Definición del evento aplicando un algoritmo para eliminar picos y valles innecesarios e insignificantes.

Paso 3: transformación de la señal en el dominio del tiempo para obtener uno o más juegos de firmas de referencia. La información en el

dominio del tiempo se transforma a un espectro en el dominio de la frecuencia (espectro de tiempo corto), aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés).

Paso 4: aislar segmentos preseleccionados de la firma de referencia (paso opcional). Estos segmentos se preseleccionan de acuerdo con la información de una prueba previa.

Paso 5: almacenar espectros de uno o más juegos de firmas de referencia del paso 3, en memoria. Se almacena la firma de referencia para su uso posterior.

Paso 6: sensar y monitorear uno o más juegos de señales acústicas en el dominio del tiempo del interruptor bajo condiciones de prueba (cuando no se sabe si opera correctamente).

Paso 7: procesar en el dominio del tiempo la información obtenida en el paso 6 por medio de transformaciones lineales o no lineales para crear uno o más juegos de firmas de prueba. Si se seleccionaron ventanas (paso 2), se procesa la información vibracional en el dominio del tiempo usando la configuración de ventanas seleccionadas en el paso 2. El método de procesamiento es el mismo que el empleado en el paso 3.

Paso 8: calcular uno o más grupos de firmas promedio de prueba y de referencia a partir de firmas previamente almacenadas en el paso 5, y grupos de firmas de prueba calculadas en el paso 7 (paso opcional). Esto se realiza para suavizar pequeñas diferencias de las firmas obtenidas bajo las mismas condiciones (referencia o prueba).

Paso 9: comparar firmas de prueba y de referencia. Si se calculó el promedio en el paso 8, comparar las firmas promedio de prueba y de referencia. Si se seleccionaron segmentos en el paso 4, comparar la información correspondiente a los segmentos seleccionados. La comparación se realiza calculando la distancia euclidiana entre puntos correspondientes de dos firmas, ya sean de referencia o de prueba, usando la ecuación 1.

$$d_{A,B} = \sqrt{\sum_{n=1}^{m} (\text{firma A(punto n)} - \text{firma B(punto n)})^2} \qquad [1]$$

Paso 10: obtener una decisión basada en la comparación del paso 9 dada como la condición mecánica del interruptor, (normal, anormal, etc.). El criterio para la toma de decisiones es el siguiente: la firma se clasifica como normal si la distancia de prueba media (MTD) es menor o igual que el valor inicial (T) dado por la ecuación 2 y como anormal si es mayor. MTD y T son valores calculados automáticamente. El valor inicial (T) está en función de la distancia de referencia media (MRD) de la desviación estándar de referencia (RSD) y de la desviación estándar de prueba (TSD). El otro criterio considera que para un interruptor en condiciones normales, el valor de la relación de resolución (RR) debe ser cercano a la unidad [Demjanenko, V. *et al,* 1990]. El valor RR es la relación entre la distancia de prueba y la distancia de referencia. Existen valores críticos para RR, los cuales podrían indicar qué cambios significantes a la condición normal han ocurrido, y determinar así que el interruptor se encuentra en un estado de operación anormal. Estos valores pueden obtenerse por medio de un análisis estadístico o empírico [Lai, M. L. *et al,* 1988]. El valor típico obtenido para la RR cuando se usa este método es de aproximadamente 2.0. Los valores de RR asociados con anormalidades del interruptor bajo prueba, son frecuentemente mucho mayores que este nivel crítico [Lai, M. L. *et al,* 1988; Runde, M., *et al,* 1992].

$$T\ (\text{umbral}) = \text{Max.}\ [T_1, T_2] \qquad [2]$$

donde

$$T_1 = MRD + (t_{b/2})(S_p)(1/m_1 + 1/m_2)^{1/2} \qquad [3]$$

$$T_2 = MRD + (3)(RSD) \qquad [4]$$

y $t_{b/2}$ es el valor de la distribución-t obtenida de una tabla de referencia, con $(m_1 + m_2 - 2)$ grados de libertad, dejando un área de b/2 a la derecha, y

$$s_p = \frac{(m_1 - 1)(RSD)^2 + (m_2 - 1)(TSD)^2}{m_1 + m_2 - 2} \qquad [5]$$

donde m_1 y m_2 son el número de operaciones usadas en la determinación de las desviaciones estándar para las firmas de referencia y prueba, respectivamente. Tanto m_1 como m_2 son iguales a 4. El valor de b/2 determina la posibilidad de una falsa alarma, donde b/2 = 2.5%. Para este valor de b/2 y considerando los valores de m_1 y m_2, los cuales dan 6 grados de libertad, el valor de $t_{b/2}$ es 2.447, obtenido de una tabla de distribución-t.

Paso 11: indicación de decisión (condición del interruptor). El resultado del proceso de toma de decisiones podría indicarse en diferentes formas; por ejemplo, la decisión podría activar una alarma o la condición del interruptor podría indicarse en una pantalla, etcétera.

Para la ejecución automática del diagnóstico y procesamiento de la señales, se desarrollaron diferentes rutinas en Matlab, el cual trabaja bajo ambiente Windows. El programa lee los datos de entrada desde un archivo específico que contiene información vibracional; genera una gráfica de la señal en el dominio del tiempo y ejecuta el procedimiento descrito en los puntos anteriores, desde el paso 2.

Resultados de prueba y discusión

Interruptor aislado en SF_6

Las figuras 4 y 5 muestran las firmas de aceleración durante la apertura y cierre respectivamente en los puntos H, E y A, (figura 2) del interruptor bajo prueba (*INT 1*).

Con base en las figuras 4 y 5, se observa que la magnitud de la señal de aceleración en el punto E para las condiciones de apertura y cierre,

FIGURA 4
Señal de aceleración durante la apertura del polo 1 del interruptor de 123 kV, en los puntos H, E y A.

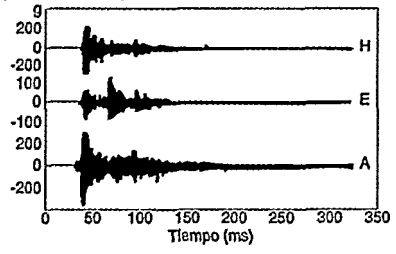
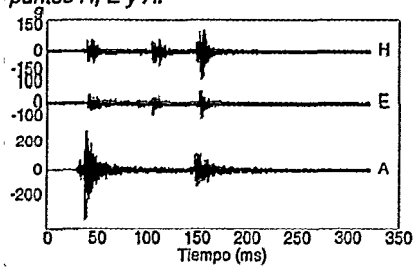


FIGURA 5
Señal de aceleración durante el cierre del polo 1 del interruptor de 123 kV, en los puntos H, E y A.



es menor con respecto a las magnitudes de las señales H y A. Asimismo, las señales de aceleración registradas en los puntos F y G (figura 2), de los polos 2 y 3, son similares a las señales obtenidas en las figuras 4 y 5.

La atenuación de la señal en los puntos E, F y G se debe principalmente a que por esos puntos se encuentra una barra de transmisión de energía mecánica. Asimismo, en los puntos H, I y J, la magnitud de las señales, aproximadamente 200 g, se debe a la proximidad de los contactos principales a los puntos de medición en cada polo. Para los puntos A, B y C, se midieron señales con magnitudes superiores a 200 g debido a la proximidad de los mecanismos de operación del interruptor.

El sistema de diagnóstico cuenta con la capacidad de análisis de resultados en cada uno de los puntos de evaluación. Sin embargo, en este documento sólo se presentan y analizan los resultados para el polo 1, punto A. Esto es con la finalidad de representar la aplicación de la técnica aquí propuesta.

A través del desarrollo y aplicación de una técnica de diagnóstico no-invasiva, fue posible determinar la condición mecánica de cuatro interruptores de potencia. Se encontró que la técnica para procesar, analizar y evaluar las señales vibracionales, la cual está en su primera versión de desarrollo en el IIE, es aceptable y confiable para su uso generalizado en el diagnóstico de interruptores de potencia.

Operación de apertura

Con base en las mediciones realizadas en el punto A, operación de apertura, para una ventana de tiempo seleccionada de 0.001 a 0.185 s, la cual cubre todos los eventos generados por la actividad acústica en este interruptor, se observa que la RR es menor al valor crítico 2.0 mencionado arriba. Estos valores de RR están entre 1.28 y 1.34, cubriendo los segmentos de frecuencia analizados de 0-6.25 kHz, 6.25-12.5 kHz, 12.5-25 kHz y 0-25 kHz.

Para una ventana de tiempo de 0.001 a 0.1 s, los resultados mostraron un comportamiento similar al de la ventana anterior. Los valores de RR estuvieron entre 1.28 y 1.34. Asimismo, la condición MTD ≤ T se cumplió en los segmentos de frecuencia dados arriba.

Para una ventana de 0.1 a 0.185 s, la RR estuvo entre 1.13 y 1.34, y la segunda condición se cumplió para los cuatro segmentos de frecuencia. El cuadro 1 muestra los resultados obtenidos para el análisis de la ventana de tiempo de 0.001 a 0.185 s.

Operación de cierre

Con base en los resultados de la operación de cierre en el punto A, se encontró que la tendencia de valores de RR para las ventanas de 0.001 a 0.185 s, y 0.001 a 0.1 s varía entre 1.05 a 1.25 en ambos casos; también se cumplió la segunda condición de MTD ≤ T.

Para la ventana de 0.1 a 0.185 s, se encontró que la RR estuvo entre 1.17 y 1.28, donde no se cumplió la condición MTD ≤ T para los segmentos de frecuencia en los rangos de 6.25-12.5 kHz, 12.5-25 kHz y 0-25 kHz.

El cuadro 2 muestra los resultados obtenidos para el análisis de la ventana de tiempo de 0.001 a 0.185 s.

Interruptores de vacío

En este inciso se presentan y analizan los resultados obtenidos de las firmas de aceleración de tres interruptores de vacío. Estos equipos se identifican como INT 2, INT 3 e INT 4. El interruptor INT 2 difiere de los dos restantes por estar ubicado dentro de un gabinete tipo intemperie.

Las firmas se obtuvieron usando los acelerómetros ubicados en los polos 1, 2, 3, y en la flecha principal (figura 3), en cada uno de los equipos.

En los polos 1, 2 y 3, de los tres interruptores, la magnitud de la señal fue de aproximadamente 430 g en promedio. Esto se debe a la proximidad de los contactos principales a los puntos de medición en cada polo. Asimismo, en los puntos cercanos a las flechas de los tres interruptores, se midieron señales con magnitudes inferiores a 200 g en promedio, debido a la proximidad del mecanismo de operación (flecha principal).

En este documento sólo se presenta una parte de los resultados obtenidos para los tres equipos bajo prueba. Las figuras 6 y 7 muestran los valores correspondientes a las firmas de aceleración durante la apertura y cierre de los tres interruptores y sólo para el polo 1 en cada uno de estos equipos.

Operación de apertura

Con base en la figura 6 y de acuerdo

CUADRO 1

Valores obtenidos del interruptor INT 1, polo 1, punto A, operación de apertura.

	Segmentos (kHz)			
	0-6.25	*6.25-12.5*	*12.5-25*	*0-25*
MRD	195.24	119.73	90.40	246.43
RSD	20.31	4.31	8.58	19.16
MTD	250.19	160.70	120.86	321.46
TSD	12.31	18.52	9.84	13.31
T	683.11	432.61	237.88	717.47
RR	1.28	1.34	1.34	1.30
Condición	N	N	N	N

N = normal
A = anormal

CUADRO 2

Valores obtenidos del interruptor INT 1, polo 1, punto A, operación de cierre.

	Segmentos (kHz)			
	0-6.25	*6.25-12.5*	*12.5-25*	*0-25*
MRD	158.57	91.90	70.49	196.57
RSD	21.12	9.49	12.77	24.28
MTD	198.36	102.06	73.85	235.24
TSD	16.59	9.25	4.36	14.77
T	782.53	243.93	228.07	895.27
RR	1.25	1.11	1.05	1.20
Condición	N	N	N	N

N = normal
A = anormal

con los resultados obtenidos para el interruptor INT 2 en operación de apertura, para una ventana de tiempo seleccionada de 0.01 a 0.1 s, la cual cubre todos los eventos generados en operación de apertura de estos tres interruptores, se encontró que la RR es menor al valor crítico 2.0 mencionado en la metodología de análisis. Estos valores de RR estuvieron en el rango de 1.29 y 1.39, cumpliendo con la condición MTD ≤ T para todos los segmentos de frecuencia analizados de 0-6.25 kHz, 6.25-12.5 kHz, 12.5-25 kHz y 0-25 kHz.

Para el interruptor INT 3, con la misma ventana de tiempo de 0.01 a 0.1 s, los resultados mostraron un valor de RR en el rango de 1.54 y 1.63, cumpliendo con la condición MTD ≤ T para los mismos segmentos de frecuencia analizados.

Para el interruptor INT 4, con la misma ventana de 0.01 a 0.1 s, los resultados mostraron un valor de RR entre 1.14 y 1.45. Asimismo, la condición MTD ≤ T fue cubierta en los mismos cuatro segmentos de frecuencia.

Como ejemplo, el cuadro 3 muestra solamente los resultados obtenidos del INT 2 en la ventana de tiempo analizada de 0.01 a 0.1 s.

Operación de cierre

Con base en la figura 7 y de acuerdo con los resultados obtenidos para el interruptor INT 2 en operación de cierre, para una ventana de tiempo seleccionada de 0.01 a 0.11 s, la cual

FIGURA 6
Firmas de aceleración promedio de tres interruptores de 24 kV, durante operaciones de apertura, en el polo 1.

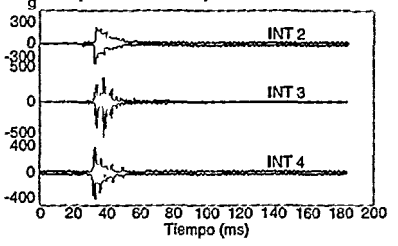
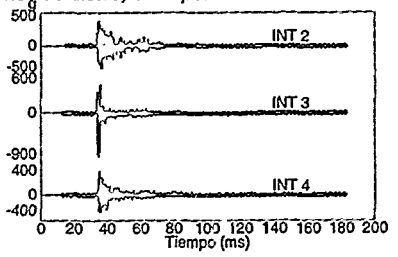


FIGURA 7
Firmas de aceleración promedio de tres interruptores de 24 kV, durante operaciones de cierre, en el polo 1.



cubre todos los eventos generados en operación de cierre de estos tres interruptores, se encontró que la tendencia de valores de RR estuvo en el rango de 1.27 y 1.43, cubriendo la condición MTD ≤ T en los segmentos de 0-6.25 kHz, 6.25-12.5 kHz, 12.5-25 kHz y 0-25 kHz.

Para el interruptor INT 3, con una misma ventana de tiempo de 0.01 a 0.11 s, los resultados mostraron un valor de RR en el rango de 1.58 y 1.67. La segunda condición se cubrió para los cuatro segmentos de frecuencia analizados.

Para el interruptor INT 4, con las mismas condiciones de selección de ventana, los resultados mostraron un valor de RR entre 1.31 y 1.67, cubriendo la misma condición mencionada arriba.

El cuadro 4 muestra solamente los resultados obtenidos del INT 2 , en la ventana de tiempo analizada de 0.01 a 0.1 s.

Discusión

Con base en los análisis realizados para el interruptor aislado en SF6, se encontró que para ciertas venta-

nas de tiempo los resultados son muy similares y que ambas condiciones de decisión están dentro de los límites establecidos en la literatura. De hecho, estos resultados son los esperados, ya que la condición mecánica del interruptor bajo prueba era conocida con anticipación. Sin embargo, para un cierto tamaño de ventana, los resultados no son muy congruentes con los esperados. Estos resultados se presentaron específicamente en las ventanas, las cuales iniciaban en la parte media de uno de los eventos con actividad acústica muy intensa. Es importante notar que uno de los aspectos vitales que recomienda la literatura sobre el tema, es la selección adecuada del tamaño de las ventanas. Por esta razón, se considera que debe llevarse a cabo más experimentación para afinar los detalles que presenta esta metodología en función de las características del evento acústico, así como la aplicación de métodos automáticos de selección de ventanas para evitar falsas alarmas respecto a la condición del equipo evaluado.

Con base en los análisis realizados a los interruptores de vacío, se encontró que las señales de apertura y cierre no presentaron anormalidad alguna durante el diagnóstico. De hecho, estos resultados eran también los esperados, ya que se conocía la condición mecánica de estos equipos. Sin embargo, las señales registradas no presentaron una firma de vibración característica universal, aun cuando los tres interruptores son del mismo tipo, marca y capacidad de operación. Esto se atribuye a que existen otros parámetros que modifican las condiciones de vibración, tales como la cimentación e instalación de los equipos, márgenes de tolerancias especificados en la fabricación y los ajustes durante el mantenimiento. Esto conduce a que no se puede aplicar el concepto de universalidad de la firma, y sólo se limitaría a diagnosticar y evaluar cada interruptor por separado. Desde luego, este veredicto de no universalidad de la firma es muy prematuro, dado que sólo

CUADRO 3

Valores obtenidos del interruptor INT 2, polo 1, operación de apertura.

	Segmentos (kHz)			
	0-6.25	*6.25-12.5*	*12.5-25*	*0-25*
MRD	179.81	142.14	153.30	276.12
RSD	22.32	11.58	14.74	24.03
MTD	231.78	186.54	213.46	366.47
TSD	24.58	12.45	5.81	22.31
T	1133.46	392.33	370.63	1206.22
RR	1.29	1.31	1.39	1.33
Condición	N	N	N	N

N = nornal
A = anormal

CUADRO 4

Valores obtenidos del interruptor INT 2, polo 1, operación de cierre.

	Segmentos (kHz)			
	0-6.25	*6.25-12.5*	*12.5-25*	*0-25*
MRD	159.01	141.01	116.18	243.37
RSD	36.30	26.54	9.22	36.82
MTD	218.73	201.71	147.61	332.49
TSD	15.56	18.50	15.83	22.94
T	1508.33	1046.43	406.47	1871.59
RR	1.38	1.43	1.27	1.37
Condición	N	N	N	N

N = normal
A = anormal

fue una muestra de tres interruptores de las mismas características (con diferencias en su montaje) y no es representativa para fines estadísticos. Sin embargo, se propone continuar con la caracterización de señales de vibración de interruptores idénticos, incluyendo la mayor cantidad de parámetros descritos arriba, para obtener una tendencia que sea representativa y validar o descartar completamente este concepto.

Por otro lado, con el desarrollo de estas pruebas sí se valida la aplicabilidad de la técnica, pues puede emplearse en cualquier equipo que genere actividad vibracional.

Conclusiones

A través del desarrollo y aplicación de una técnica de diagnóstico no-invasiva, fue posible determinar la condición mecánica de cuatro interruptores de potencia.

Se encontró que la técnica para procesar, analizar y evaluar las señales vibracionales, la cual está en su primera versión de desarrollo en el IIE, es aceptable y confiable para su uso generalizado en el diagnóstico de interruptores de potencia. Sin embargo, se requiere realizar un desarrollo adicional en lo que respecta a la metodología y *software* empleados en esta primera etapa. Esto es con el propósito de simplificar el procesamiento de las señales, así como para desarrollar alguna interfaz gráfica para el manejo de la información a través de la computadora. Asimismo, se requiere llevar a cabo la adquisición y análisis de la información en tiempo real,

donde en los requerimientos futuros de la técnica se considere el uso de una tarjeta de adquisición de datos integrada en un sistema de diagnóstico portátil.

Por otro lado, respecto a la aplicación de la técnica, se llevaran a cabo trabajos en equipo con la CFE, Zona Centro-Sur y Centro Oriente, para iniciar un programa de monitoreo de interruptores donde se involucren diferentes tipos de mecanismos y fabricantes. El propósito es obtener y caracterizar sus señales de vibración y determinar así los parámetros que muestren un mal ajuste en el mecanismo o una falla mecánica del interruptor bajo prueba.

Se espera que esta metodología contribuya notablemente al desarrollo adecuado del análisis de las causas de falla de origen mecánico para permitir que los resultados puedan usarse en diagnóstico y prevención de fallas futuras, con los obvios incrementos en la disponibilidad de los interruptores y la reducción de costos por mantenimiento.

Referencias

Runde, M., T. Aurud, G. E. Ottesen y B. Skyberg (1992), *Non-invasive evaluation of circuit-breakers,*CIGRE, núm. 13-106.

Comisión Federal de Electricidad (1993), "Síntesis de fallas de interruptores de potencia, Gerencia de subestaciones y líneas".

Mazza, G. y R. Michaca (981), "The first international enquiry on circuit-breakers failures and defects in service", *Electra,* núm. 79, pp. 21-29.

Hess, *et al* (1992), *Non-invasive condition assessment and event timing for power circuit breakers,* IEEE trans. on power delivery, vol. 7, núm. 1.

Demjanenko, V., *et al* (1990), *Method and apparatus for diagnosing the state of a machine,* Patente número 4,980,844, diciembre, Estados Unidos.

Lai, M. L., *et. al* (1988), *Mechanical failure detection of circuit-breakers,* IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, núm. 4, octubre, pp. 1724-1731.

Runde, M., *et al* (1992), *Acoustic diagnosis of high voltage circuit-breakers,* IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, núm. 3, julio, pp. 1306-1315.

ROBERTO LIÑÁN GARCÍA



Recibió su grado de licenciatura en ingeniería eléctrica en la Universidad Autónoma de Coahuila. Terminó su maestría en sistemas computacionales en 1984 en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Campus Morelos. Obtuvo su grado de doctor en ingeniería eléctrica en la Universidad de Salford, Inglaterra, en 1993. Ac- tualmente, es investigador del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde 1984.

MARCIANO PÉREZ MARTÍNEZ



Recibió su grado de licenciatura en sistemas eléctricos de potencia en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Obtuvo su grado de maestría en ingeniería eléctrica en la Universidad de Salford, en 1994. Actualmente se desempeña como investigador en el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

J. MANUEL ESTRADA PLATA



Recibió su grado de licenciatura en ingeniería mecánica en el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Actualmente, es investigador del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

¿Necesita estimar cuándo hay que cambiar la tubería del generador de vapor?

Esta tarea puede simplificarse utilizando KarMa (Características de Materiales de Generadores de Vapor), una nueva herramienta de cómputo para estimar el tiempo de vida y las propiedades mecanicas de los materiales de tubería de generadores de vapor.

KarMa es un programa que toma en cuenta el fenómeno de termofluencia, así como el de corrosión. También estima las propiedades mecánicas, espesor mínimo, temperatura máxima y presión máxima de operación, con base en la norma ASME, y cuenta con un catálogo de las fallas más comunes que ocurren en la tubería de un generador de vapor.

KarMa funciona en Microsoft 3.1 y sólo ocupa 600 KBytes en el disco duro; aunque se recomienda, no requiere de un coprocesador matemático.

Llámenos y le daremos más información y si lo desea le enviaremos sin costo un programa de demostración para que personalmente evalúe KarMa.

Comuníquese con nosotros al:
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Departamento de Fisicoquímica Aplicada

Av. Reforma núm. 113
colonia Palmira
62490 Temixco, Morelos, México
Tel. (73) 18 98 48 y
(73) 18 38 11 ext. 7224,
Fax (73) 18 98 54

MX9800136

Sistema de control pre-retroalimentado para la temperatura de vapor sobrecalentado en recuperadores de calor

Hilario López Álvarez y
Guadalupe Madrigal Espinosa

Resumen

El estudio que se presenta corresponde al análisis, diseño y desarrollo de un sistema de control pre-retroalimentado para regular la temperatura de vapor sobrecalentado en los recuperadores de calor de una central termoeléctrica de ciclo combinado [López, 1993]. Los diseños del controlador retroalimentado y del sistema de control prealimentado se realizaron con base en un modelo lineal de la zona de atemperación. Este modelo lineal se obtuvo aplicando técnicas de identificación paramétrica al modelo matemático no-lineal de una central de ciclo combinado.

Introducción

En la actualidad, la generación termoeléctrica desempeña el papel principal en la satisfacción de la demanda de energía eléctrica del país, dado que cerca del 70% de la generación nacional se realiza en las centrales que consumen combustóleo, carbón o gas.

Un tipo de estas centrales son las denominadas de ciclo combinado. En ellas se aprovecha al máximo la energía contenida en el combustible al dividir su operación en dos etapas de generación, turbinas de gas y turbinas de vapor. Los gases generados en el combustor, a presión y temperatura altas, se inyectan a la turbina de gas para una primera etapa de generación de energía eléctrica. Después, los gases de escape de la turbina de gas, que han perdido presión en forma considerable pero mantienen sus altas temperaturas, se hacen pasar a través de los recuperadores de calor, cuya función principal es transferir la energía térmica de los gases de escape a los intercambiadores de calor a fin de generar el vapor requerido para mover la turbina de vapor, lográndose así una segunda etapa de generación de energía eléctrica.

Para desarrollar esta operación con la más alta eficiencia y el mínimo de riesgos, se requiere de sistemas de control con un alto grado de confiabilidad y disponibilidad. Los avances de la tecnología en los campos de la electrónica digital y del control de procesos, permiten actualmente el desarrollo de equipos altamente robustos que satisfacen en gran medida las características requeridas.

En el trabajo que aquí se presenta se desarrolló el sistema de control digital pre-retroalimentado para regular la temperatura de vapor sobrecalentado en los recuperadores de calor de una central termoeléctrica de ciclo combinado (CCC) [López, 1993]. El sistema de control debe mantener la temperatura de vapor sobrecalentado en su punto nominal de referencia, para que la turbina de vapor mantenga una operación confiable y eficiente, bajo condiciones de carga base.

Modelo lineal de la zona de atemperación

Para realizar el diseño del sistema de control fue necesario determinar el modelo lineal que representa el efecto que la temperatura en el hogar del recuperador (TGHR) y la demanda a la válvula de atemperación (XBP) ejercen sobre la temperatura de vapor sobrecalentado (TUM). Esto se realizó con el método de identificación paramétrica de la curva de reacción [Miller *et al,* 1967] y se obtuvieron las funciones de transferencia que rigen el comportamiento dinámico de la zona de atemperación alrededor del punto de referencia nominal.

La identificación se realizó sobre el modelo no-lineal del sistema de atemperación de vapor sobrecalentado, el cual es parte integral de un modelo matemático no-lineal que representa el comportamiento dinámico de una central termoeléctrica de ciclo combinado, [Delgadillo y Fuentes, 1993]. Este modelo no-lineal está integrado por el modelo de la turbina de gas, el modelo de recuperador de calor y el modelo de la turbina de vapor. En particular, el modelo del recuperador de calor está integrado por los sistemas de agua de alimentación, de atemperación de vapor sobrecalentado, de presurización del deareador, de agua de condensado y el de combustible a quemadores posteriores.

En la actualidad, la generación termoeléctrica desempeña el papel principal en la satisfacción de la demanda de energía eléctrica del país, dado que cerca del 70% de la generación nacional se realiza en las centrales que consumen combustóleo, carbón o gas.

Las fu/nciones de transferencia obtenidas de la identificación se presentan en las ecuaciones 1 y 2. Con ellas se diseñó el sistema de control prealimentado y se ajustaron los parámetros de controlador proporcional más integral (PI).

$$\frac{TUM}{XBP}=\frac{-15.78e^{-s}}{9S+1} \quad [1]$$

$$\frac{TUM}{TGHR}=\frac{0.658}{1.8S+1} \quad [2]$$

donde:

TGHR: temperatura en el hogar del recuperador de calor.

TUM: temperatura del vapor sobrecalentado.

XBP: demanda de apertura a la válvula de atemperación.

A la expresión dada en la ecuación 1 se le denomina función de transferencia del proceso, *Gp(s),* y a la expresión dada en la ecuación 2 se le denomina función de transferencia de la perturbación, *Gd(s).*

Un diagrama esquemático de la zona de atemperación de los recuperadores de calor y su relación con las variables del modelo, se presenta en la figura 1.

Sistema de control para atemperación de vapor sobrecalentado

El objetivo del sistema de control de atemperación es regular la temperatura del vapor sobrecalentado en los 952°F (REF). El sistema de control está integrado bajo un esquema pre-retroalimentado, por medio del cual se manipula el flujo de atemperación a través de la válvula de atemperación, como se muestra en la figura 2.

Para el diseño del sistema de control retroalimentado se consideró un controlado- proporcional más integral (PI). La función de transferencia obtenida es:

$$Scon(s)=Kp(1+\frac{1}{STi})(TUM-REF) \quad [3]$$

La ganancia y periodo últimos requeridos para obtener los parámetros del controlador PI, se determinaron del diagrama de Bode de la función de transferencia del proceso, *Gp(s),* y de las ecuaciones 4 y 5, [Coughanowr y Koppel, 1983]. El diagrama de Bode se presenta en la figura 3 y la información contenida en él se resume en el cuadro 1.

$$Ku=\frac{1}{A} \quad [4]$$

$$Pu=\frac{2p}{Wo} \quad [5]$$

FIGURA 1

Diagrama esquemático de la zona de atemperación del recuperador de calor de una central termoeléctrica de ciclo combinado.

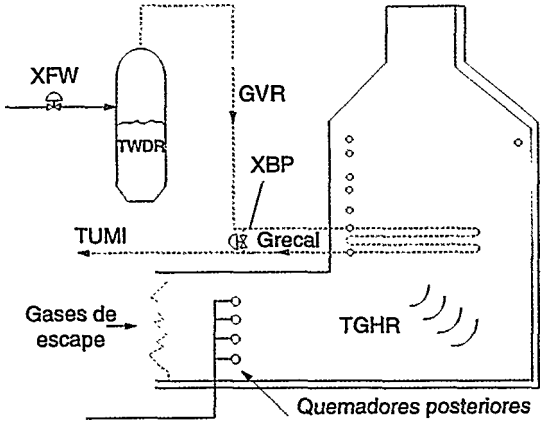


FIGURA 2

Esquema de control pre-retroalimentado para atemperación del vapor sobrecalentado.

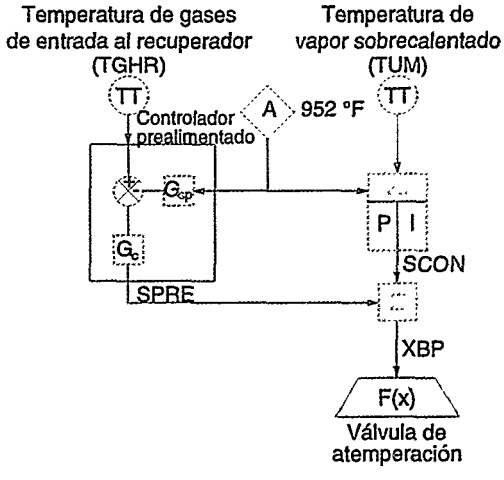
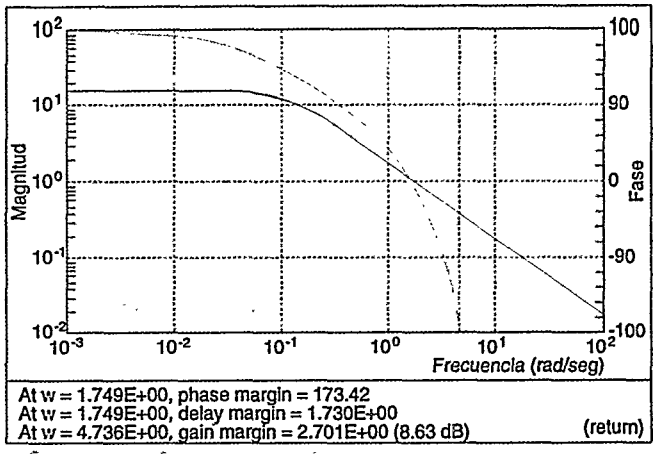


FIGURA 3

Respuesta en frecuencia del sistema de atemperación de vapor sobrecalentado.



CUADRO 1

Resumen de la información contenida en el diagrama de Bode del sistema de atemperación de vapor sobrecalentado.

Margen de ganancia	MG	2.701 (8.63 dB)
Margen de fase	MF	173.31
Razón de amplitud en W_o	A	0.3702 (-8.63 dB)
Frecuencia de oscilación	W_o	4.736

Los valores obtenidos para *Ku* y *Pu* son:

Ku = 2.701
Pu = 1.327

Con estos valores se determinó del cuadro de Ziegler-Nichols [Ziegler y Nichols, 1942] la ganancia proporcional, *Kp,* y el tiempo integral, *Ti,* del controlador PI.

Kp = 1.25
Ti = 1.1

Sistema de control prealimentado

Un sistema de control prealimentado está integrado por dos módulos, denominados *Gc(s)* y *Gsp(s),* que se definen en relación con las funciones de transferencia del proceso, *Gp(s),* y de la perturbación, *Gd(s)* [Stephanopoulos, 1984].

$$Gc(s) = \frac{Gd(s)}{Gp(s)} \quad [6]$$

$$Gsp(s) = \frac{1}{Gd(s)} \quad [7]$$

Para simplificar el diseño del controlador prealimentado del sistema de atemperación de vapor sobrecalentado, no se consideró el tiempo de retardo, *Td,* de la función de transferencia del proceso *Gp(s),* ecuación 1, debido a que la constante de tiempo, *T,* es considerablemente más grande que *Td.*

Así, el diseño del controlador prealimentado se realizó con la función de transferencia dado por la siguiente ecuación:

Este modelo no-lineal está integrado por el modelo de la turbina de gas, el modelo de recuperador de calor y el modelo de la turbina de vapor.

El objetivo del sistema de control de atemperación es regular la temperatura del vapor sobrecalentado en los 952°F (REF).

$$Gp(s) = \frac{-15.78}{9S+1} \quad [8]$$

La función de transferencia que representa el efecto de las perturbaciones sobre la salida del proceso, *Gd(s),* es dada por la ecuación 2.

El sistema de control prealimentado diseñado para regular la temperatura de vapor sobrecalentado se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$Gc(s) = \frac{-0.04(9S+1)}{1.8S+1} \quad [9]$$

$$Gsp(s) = 0.8(1.8S+1) \quad [10]$$

A partir de estas funciones de transferencia se obtiene la siguiente ley de control prealimentado:

$$S_{PRE} = \frac{-0.04(9S+1)}{1.8S+1}[772.3(1.8S+1) - TGHR] \quad [11]$$

Debido a que la temperatura de vapor sobrecalentado se desea mantener fija en 952°F, la ley de control se simplificó en el bloque *Gsp(s)* al eliminar la derivada de la referencia (ecuación 12). Esta simplificación se realizó debido a que la referencia siempre se mantiene constante.

$$S_{PRE} = \frac{-0.04(9S+1)}{1.8*S+1}[772.3 - TGHR] \quad [12]$$

Validación y resultados

Las pruebas realizadas permiten observar el comportamiento dinámico del sistema en lazo cerrado en condiciones extremas en relación con el punto de operación nominal, cuando actúan sobre el proceso perturbaciones externas [López, 1993]. Un conjunto de pruebas que permiten observar el comportamiento del sistema en lazo cerrado alrededor del punto nominal de operación se presentan en [Madrigal y López, 1994].

Las pruebas que se propusieron incluyen perturbaciones tipo escalón y tipo rampa sobre la TGHR, cuando el esquema de control es retroalimentado, prealimentado o pre-retroalimentado.

Las perturbaciones se aplican a los 100 segundos y 300 segundos de simulación, cuando la temperatura en el hogar del recuperador (TGHR) cambia a 1500 y a 1250 grados Fahrenheit respectivamente, tanto en forma escalón como en rampa. Las condiciones extremas establecidas para esta perturbación (hasta 1500 grados Fahrenheit)

La mejor elección es el esquema de control pre-retroalimentado, debido a que permite que la señal de salida del sistema en lazo cerrado posea mejores características dinámicas como un tiempo de asentamiento más rápido, un menor sobrepaso y un mínimo de oscilaciones.

son con el propósito de mostrar el buen desempeño del esquema de control pre-retroalimentado, ya que para estas condiciones extremas, sólo se tienen variaciones en TUM de más-menos dos grados Fahrenheit, como se observa en las figuras 5 y 7.

La figura 4 muestra el tipo de perturbación rampa que se aplica sobre la temperatura en el hogar del recuperador (TGHR). El valor inicial de esta temperatura es de 1150°F. A partir de los 100 segundos de simulación se inicia una rampa ascendente de temperatura hasta alcanzar el valor de los 1500 grados en un tiempo de 200 segundos. A los 300 segundos de simulación se inicia una rampa descendente de temperatura hasta alcanzar un valor de 1250 grados en un tiempo de 200 segundos.

La figura 5 muestra la variable controlada TUM, con el controlador pre-retroalimentado. Se puede apreciar en esta gráfica que solamente se tienen sobrepicos del orden de dos grados Fahrenheit en los instantes de tiempo donde se producen los cambios de rampa, debidos a las perturbaciones sobre TGHR. La figura 6 muestra la señal de control XBP del controlador pre-retroalimentado. Se observa que la demanda a la válvula de atemperación cambia suavemente debido al tipo de señal de perturbación aplicada.

En la figura 7 se muestra una comparación de las respuestas del sistema de lazo cerrado (TUM-1), (TUM-2) y (TUM-3) de las pruebas obtenidas con los controles: prealimentado, retroalimentado, y pre-retroalimentado respectivamente, ante una perturbación del tipo rampa. Se observa que las variaciones más fuertes en la TUM son del orden de dos grados Fahrenheit. En la figura 8 se comparan también las respuestas del sistema de lazo cerrado (TUM-1), (TUM-2) y (TUM-3) para los mismos controladores, pero ante una perturbación del tipo escalón.

Puede observarse que la mejor elección es el esquema de control pre-retroalimentado, debido a que permite que la señal de salida del sistema en lazo cerrado posea mejores características dinámicas como un tiempo de asentamiento más rápido, un menor sobrepaso y un mínimo de oscilaciones.

Conclusiones

Se diseñó el sistema de control digital para regular la temperatura de vapor sobrecalentado en los recuperadores de calor de una central de ciclo combinado. El diseño se basa en una estructura de control pre-retroalimentado

FIGURA 4
Señal de perturbación tipo rampa sobre la temperatura en el hogar del recuperador de calor (TGHR).

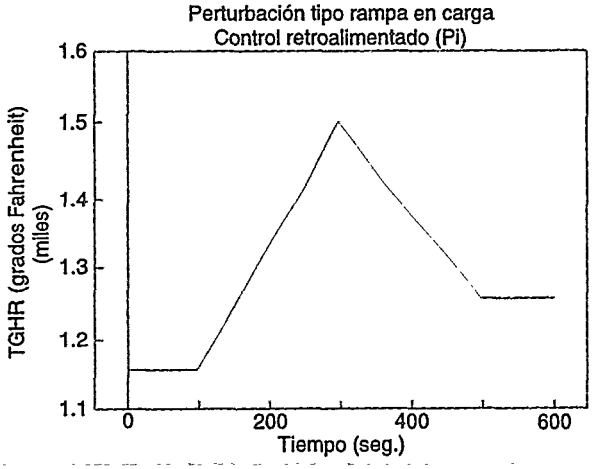


FIGURA 5
Temperatura de vapor sobrecalentado (TUM) ante perturbaciones tipo rampa en la temperatura en el hogar del recuperador de calor (TGHR).

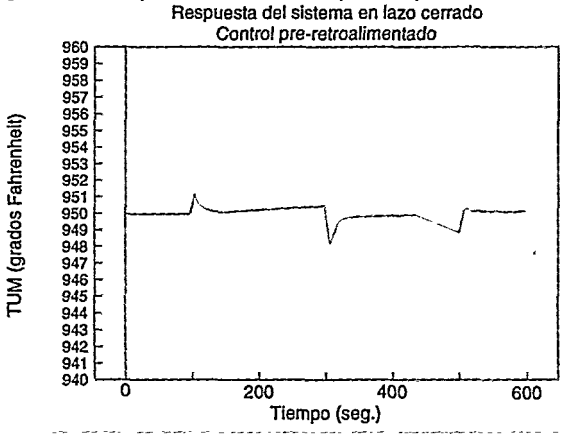


FIGURA 6
Salida del esquema de control pre-retroalimentado (XBP) cuando la TGHR se ve afectada por una perturbación tipo rampa.

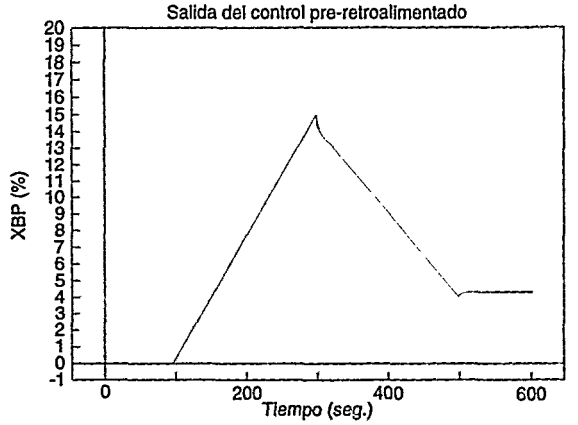


FIGURA 7

Comparación de las respuestas de temperatura de vapor sobrecalentado (TUM) ante una perturbación tipo rampa en la TGHR para los tres esquemas de control.

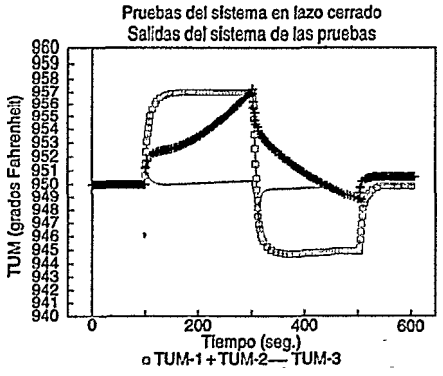
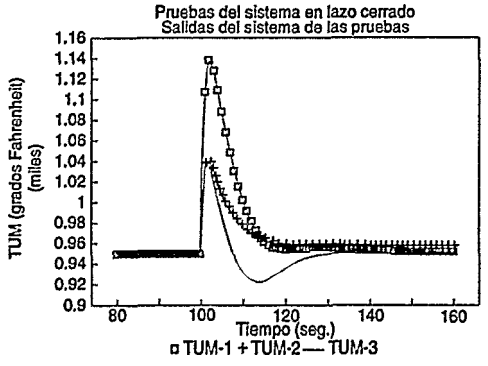


FIGURA 8

Comparación de las respuestas de temperatura de vapor sobrecalentado (TUM) ante una perturbación tipo escalón en la TGHR para los tres esquemas de control.



dadas las características mismas del proceso, ya que se dispone de una medida de prealimentación como es la temperatura en el hogar del recuperador de calor. El diseño del controlador prealimentado se basó en un modelo lineal de la zona de atemperación, obtenido mediante la técnica de identificación de la curva de reacción. Como controlador retroalimentado se eligió un algoritmo de control proporcional más integral (PI).

Las características dinámicas mostradas por los controladores al regular la temperatura de vapor sobrecalentado en su punto de operación nominal permitieron establecer una comparación del desempeño de los tres esquemas de control. De esta comparación se concluye que las limitaciones presentadas por los controladores retroalimentado y prealimentado en cuanto al desempeño mostrado por cada uno de ellos, fueron corregidas por el esquema de control pre-retroalimentado.

Referencias

Astrom, K. J. y B. Wittenmark (1984), *Computer controlled systems theory and desing*, Ed. Prentice Hall.

Coughanowr, D. R. y L. B. Koppel (1983), *Process systems analysis and control*, Mc Graw-Hill Inc.

Delgadillo, M. A. V. y E. Fuentes (1993), "Modelo matemático de una central termoeléctrica de ciclo combinado", Informe Interno, Departamento de Instrumentación y Control, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

López Álvarez, H. (1993), Tesis de licenciatura: "Diseño del sistema de control para regular la zona de temperaturas de los recuperadores de calor de una central termoeléctrica de ciclo combinado", Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas.

Madrigal E., G. y H. López A. (1994), "Diseño del sistema de control para regular la temperatura de vapor sobrecalentado en centrales de ciclo combinado", Reunión de verano de Potencia de la IEEE, julio, Acapulco, Guerrero, pp. 91-96.

Miller J. A., A. M. López, C. L. Smith y P. W. Murrill (1967), *A comparison of controller tuning techniques,* Control Engineering.

Stephanopoulos, G. (1984), *Chemical process control: introduction to theory and practice,* Ed. Prentice-Hall.

Zigler, J. G. y N. B. Nichols (1942), *Optimun setting for automatic controller,* Taylor Technical Data Sheet, Taylor Company, Rochester, Nueva York, Estados Unidos.

HILARIO LÓPEZ ÁLVAREZ



Ingeniero electricista en control egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Realizó su tesis de licenciatura en el Instituto de Investigaciones Eléctricas y con ella ganó el primer lugar en el Certamen Nacional de Tesis 1993-1994, en el área de Sistemas de Control. En febrero de 1994 se incorporó como investigador al Departamento de Equipos Eléctricos del IIE. Actualmente se desarrolla en el área de aislamientos internos, participando en el proyecto de Servicio de diagnóstico de generadores, así como en el análisis de sistemas aislantes de mediana y alta tensión y en el desarrollo del diseño de un laboratorio móvil totalmente automatizado para el diagnóstico de máquinas eléctricas.

GUADALUPE MADRIGAL ESPINOSA



Ingeniero en comunicaciones y electrónica del Instituto Politécnico Nacional, con grado de maestro en ciencias de ingeniería eléctrica del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav) en la especialidad de control automático. En enero de 1987 se incorpora como investigador al Instituto de Investigaciones Eléctricas, donde ha participado en proyectos de los departamentos de Simulación, Automatización de Procesos e Instrumentación y Control, relacionados con los sistemas de automatización y control para generadores de vapor de centrales termoeléctricas. Desde 1991, participa en el proyecto institucional de desarrollo tecnológico para la modernización del sistema de control de la central termoeléctrica de ciclo combinado Gómez Palacio. Ha participado en la publicación de diversos artículos técnicos en congresos nacionales e internacionales. Ha dirigido varias tesis de maestría y de licenciatura, dos de las cuales han obtenido reconocimiento en el Certamen Nacional de Tesis, en el área de Sistemas de Control. Desde 1988, colabora con el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el programa de maestría en ingeniería electrónica.

MX9800137

Grado de conversión de SO_2 en SO_3 y emisiones de SO_X en generadores de vapor

Jesús Espinoza Garza, Adriana Penna García y Mario Huerta Espino

Resumen

Una gran parte de la energía eléctrica generada en el país se obtiene utilizando combustibles fósiles como fuente primaria de energía. Estos combustibles son principalmente carbón, combustóleo y gas natural. Los dos primeros tienen altos porcentajes de azufre, con lo cual se producen y emiten a la atmósfera diferentes cantidades de dióxido de azufre (SO_2) y trióxido de azufre (SO_3). La relación entre estos dos contaminantes varía dependiendo del tipo de generador de vapor, la capacidad nominal y, sobre todo, de la concentración de azufre en el combustible y de las condiciones de operación del sistema de combustión.

Introducción

Los residuos de la combustión de combustibles con azufre, aun en concentraciones muy pequeñas (0.25 a 0.5 %), son causantes de problemas tanto operacionales como de contaminación, ya que producen corrosión en las zonas de baja temperatura de los generadores de vapor y provocan la emisión de ácido sulfúrico y partículas ácidas.

Los compuestos de azufre, que forman parte de los combustibles sólidos y líquidos, se oxidan en SO_2, de acuerdo con la siguiente reacción:

$$S + O_2 \Rightarrow SO_2$$

Durante el proceso de combustión una pequeña cantidad de este SO_2 (1 - 3%), se oxida posteriormente en SO_3:

$$SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow SO_3$$

lo que resulta en concentraciones del rango de 10 a 50 ppm en la chimenea de los generadores de vapor. En la atmósfera, el SO_2 y el SO_3, se combinan rápidamente con el oxígeno y la humedad, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), causante de la contaminación por lluvia ácida:

$$SO_2 + O_2 \Rightarrow SO_3$$

$$SO_3 + H_2O \Rightarrow H_2SO_4$$

Mecanismos de formación del SO_3

Existen dos mecanismos para la oxidación del SO_2 en SO_3: fase homogénea y fase heterogénea.

Fase homogénea

La oxidación en fase homogénea es altamente dependiente de la temperatura, por lo que tiene lugar en el interior de la flama y a la salida del hogar de los generadores de vapor, donde las temperaturas de gases son superiores a 900°C. A estas temperaturas, la conversión de SO_2 en SO_3 es mínima [Squires, R. T., 1982], como se muestra en la figura 1. A temperaturas entre 400 y 600°C ocurre la máxima conversión de SO_2 en SO_3 y si existiera el tiempo de residencia suficiente a temperaturas inferiores a 400 °C, todo el SO_2 sería convertido en SO_3. Sin embargo, debido al corto tiempo de residencia de los gases en la zona de convección, en la mayoría de los casos la producción de SO_3 en esta etapa es menor que 10 ppm.

Fase heterogénea

La oxidación en fase heterogénea ocurre por los efectos catalíticos de los depósitos [Levy, A. y Merryman, 1963], producidos por la oxidación de los metales contenidos en el combustóleo durante el paso de los gases por los bancos de tubos convectivos. En esta fase ocurre el mayor porcentaje de conversión de SO_2 en SO_3.

Factores para el grado de conversión de SO_2 en SO_3

El tipo y las propiedades del combustible, las condiciones de operación y las características de diseño son los tres

Los residuos de la combustión de combustibles con azufre, aun en concentraciones muy pequeñas (0.25 a 0.5 %), son causantes de problemas tanto operacionales como de contaminación, ya que producen corrosión en las zonas de baja temperatura de los generadores de vapor y provocan la emisión de ácido sulfúrico y partículas ácidas.

FIGURA 1
Conversión de SO_2 en SO_3 en función de la temperatura.

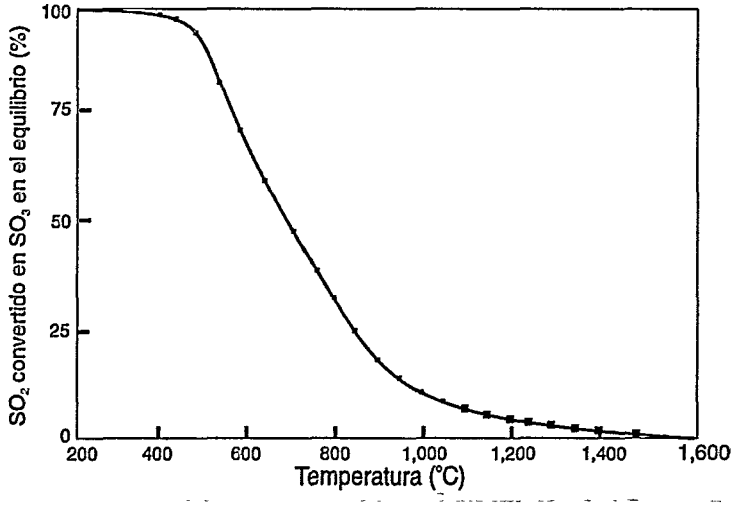
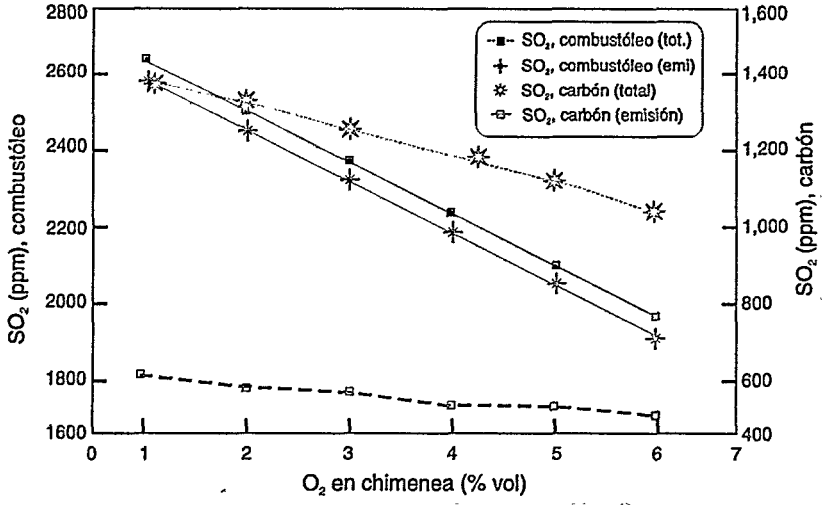


FIGURA 2
Producción total y emisión de SO_2.



factores que determinan la producción total de SO_3, tanto en fase homogénea como heterogénea.

Tipo y propiedades del combustible

Los combustibles típicos que se utilizan para la generación de energía eléctrica son el carbón y el combustóleo, cuyos contenidos de azufre oscilan entre 1 y 4% respectivamente. Observando la figura 2, es posible cuantificar las diferencias que existen en la producción y la emisión de SO_2 a la atmósfera con estos dos combustibles [Espinoza, G. J. *et al,* 1992].

Las otras propiedades del combustible son parámetros que determinan tanto la emisión de SO_2 como la producción de SO_3 en fase heterogénea. En los cuadros 1, 2 y 3, se presentan las características de los combustibles típicos utilizados para la generación de electricidad.

La producción de SO_2 con combustóleo es aproximadamente el doble que la producción de SO_2 con carbón para porcentajes de 4 y 1% de azufre respectivamente. Con gas natural no se considera la producción de SO_2 ya que el porcentaje de azufre es mínimo.

El SO_2 total producido para cualquier tipo de combustible [Espinoza, G. J. *et al,* 1993] puede obtenerse mediante la siguiente relación:

$$SO_2 = \frac{\frac{S}{32}(20.9 - O_2) \times 10{,}000}{\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + 0.79\left[\frac{H}{4} - \frac{O}{32}\right] + 0.21\frac{N}{28}}$$

donde:

C,H,O,N,S son las fracciones en peso de cada elemento en el combustible [adim], O_2 es la concentración de oxígeno en los gases de combustión (%) y SO_2 es el bióxido de azufre total (ppm).

La falta de proporcionalidad en la relación S/SO_2 para combustóleo y carbón, se debe a las otras propiedades de estos combustibles, las cuales también influyen en la emisión final hacia la atmósfera. Como se puede observar en la figura 2, más del 95% del SO_2 producido con combustóleo sale por la chimenea, mientras que del SO_2 producido con carbón, menos del 50% es expulsado a la atmósfera. Esto último se debe a las propiedades reductoras de los compuestos que contiene la ceniza del carbón combustible.

Tampoco el grado de conversión de SO_2 en SO_3 es proporcional al contenido de azufre en el combustible [Rendle, L. K., 1959], por ejemplo, de acuerdo con la figura 3, para combustóleo con 1% de azufre, el grado de conversión es del orden de 3%, mientras que para el 4% de azufre, el valor supera sólo un poco al 1%. Lo anterior se debe a la menor reactividad del SO_2, con respecto a la formación de otros productos intermedios de la combustión, como pueden ser el monóxido de carbono (CO), partículas (PST), óxidos de nitrógeno (NO_x), etc., los cuales absorben más rápido el O_2 para anticipar su oxidación, lo cual impide que se oxiden grandes cantidades de SO_2.

Aunque la relación de cambio de SO_2 en SO_3 es mayor para combustóleo con bajo contenido de azufre, la cantidad total producida de SO_3, tanto en fase homogénea como heterogénea es menor que para combustóleo con mayor contenido de azufre, como se observa en la figura 3.

Condiciones de operación

El grado de conversión depende altamente del exceso de oxígeno con que opere el sistema de combustión. Como puede corroborarse en la figura 4, con mayores excesos de oxígeno la oxidación del SO_2 en SO_3 aumenta [Milán,

CUADRO 1
Características del carbón combustible.

Elemento	*% peso*
Carbono	44.20
Hidrógeno	4.12
Oxígeno	8.45
Nitrógeno	0.82
Azufre	0.99
Cenizas	37.62
Humedad	3.80
Poder cal. sup.(kcal/kg)	4867.0

CUADRO 2
Características del combustóleo.

Elemento	*% peso*
Carbono	85.02
Hidrógeno	10.29
Oxígeno	0.36
Nitrógeno	0.40
Azufre	3.93
Poder cal. sup.(kcal/kg)	10,200

CUADRO 3
Características del gas natural.

Elemento	*% peso*
Metano	95.27
Etano	3.40
Butano	0.13
Propano	0.54
Bióxido de carbono	0.31
Nitrógeno	0.45
Poder cal. sup. (btu/ft^3)	1043

FIGURA 3
Grado de conversión de SO_2 en SO_3 para combustibles con diferente contenido de azufre.

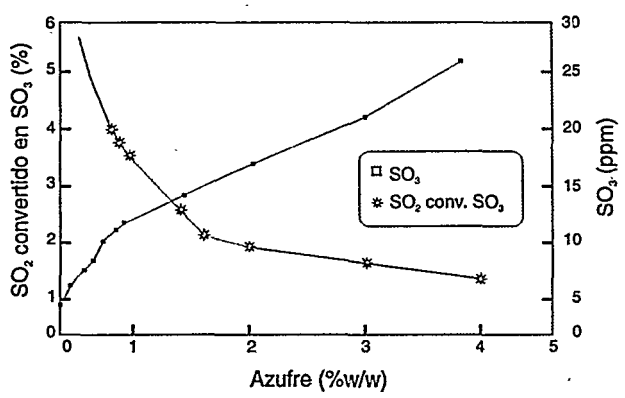
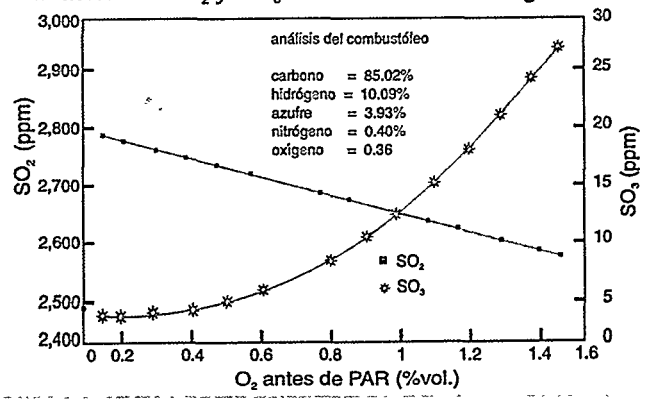


FIGURA 4
Variación *de SO_2 y SO_3 con el exceso de oxígeno.*



F. J., 1987]. Se ha encontrado [Espinoza, G. J., 1993] que para exceso de O_2 de 1.0% se puede tener un buen control de la producción de SO_3, manteniendo en condiciones óptimas los parámetros de atomización y aerodinámica, así como la relación aire-combustible de cada quemador, con el objeto de evitar también la producción excesiva de CO y PST.

Otro factor operativo de importancia es la carga de la unidad. Como se observa en la figura 5, al operar a bajas cargas y con excesos de oxígeno (O_2) superiores al 1%, se presentan valores hasta 4 veces menores que para máxima carga [Bunz, *et al,* 1967]. Esto se asocia con las altas temperaturas de gases y depósitos en la zona convectiva, afectando sólo la formación de SO_3 en fase heterogénea, ya que la fase homogénea permanece casi constante [Burdett, N. A. *et al,* 1983], como puede observarse en la figura 6 al comparar dos diseños extremos.

Características de diseño

La formación de SO_3 es influenciada por el tamaño del generador de vapor y, a su vez, por los tiempos de residencia de los gases de combustión en las zonas de radiación y convección, así como por los flujos térmicos en el hogar y en los bancos de tubos de sobrecalentadores y recalentadores, donde hay contacto con los depósitos catalíticos a altas temperaturas.

En el diseño se toma en cuenta que a mayor flujo térmico en el hogar [Squires, R. T., 1982] se produce la mayor cantidad de SO_3. Para obtener el control a diferentes capacidades de diseño se debe mantener constante el flujo térmico, a fin de dejar variable sólo el SO_3 en fase heterogénea, el cual es poco probable de controlar debido a que

El tipo y las propiedades del combustible, las condiciones de operación y las características de diseño son los tres factores que determinan la producción total de SO_3, tanto en fase homogénea como heterogénea.

FIGURA 5
Formación de SO_3 para diferentes cargas térmicas.

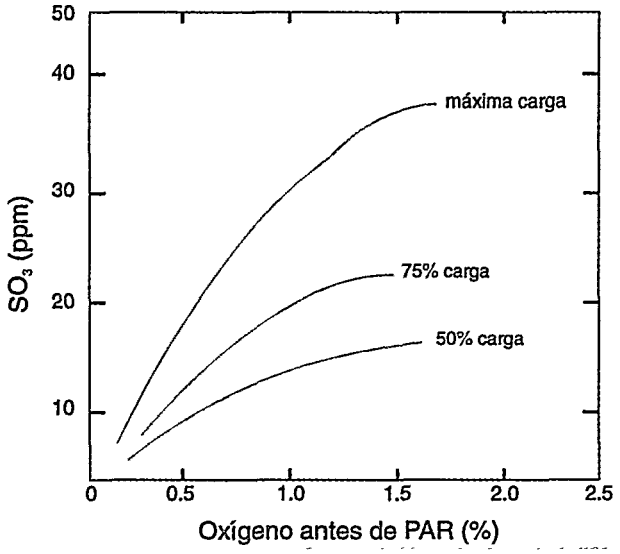
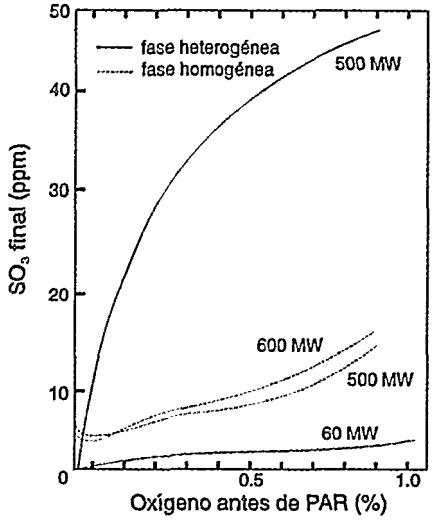


FIGURA 6
Contribución de las fases homogénea y heterogénea a la formación de SO_3 total.

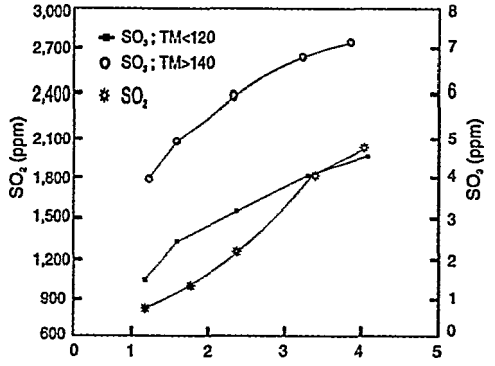


en altas capacidades de generación de vapor se manejan altas temperaturas en la zona convectiva. En la figura 6 se observa que para dos generadores de vapor con capacidad de 60 y 500 MWe [Burdett, N. A. *et al,* 1983], el SO_3 en fase homogénea tiene poca variación con el exceso de O_2, en tanto que para grandes capacidades, la formación de SO_3 en fase heterogénea aumenta exponencialmente.

Emisión de SO_2 y SO_3 en generadores de vapor

El quemado de combustóleo y carbón es una de las principales causas de emisión de SO_2 y SO_3 a la atmósfera. Como se mencionó anteriormente, la mayor emisión se debe al combustóleo por las altas concentraciones que contiene de azufre y por el alto grado de conversión de

FIGURA 7
Emisiones de SO_2 y SO_3 en chimenea para diferentes contenidos de azufre en el combustóleo (O_2=5%).



SO_2 en SO_3. Sin embargo, los valores de SO_3 medidos en chimeneas de generadores de vapor con capacidades de 25 a 350 MW (figura 5) no exceden por mucho las 7 ppm [Espinoza, G. J. *et al,* 1992] para combustóleo con contenidos de azufre de hasta 4%, aunque se tengan valores cercanos a las 30 ppm antes de los precalentadores de aire regenerativos (PAR) como se observa en la figura 8. Analizando las figuras 7 y 8 se puede argumentar que entre el 60 y 80% del SO_3 se deposita o neutraliza en la superficie de intercambio de calor de los PAR, durante el paso de los gases de combustión por los mismos. En la figura 7 se muestran dos curvas de SO_3, la superior describe el comportamiento encontrado en PAR cuya temperatura de metal (TM), en la zona fría de la superficie de intercambio de calor, fue igual o mayor que 140°C; la curva inferior se presentó para valores de TM del orden de 120 °C o menores. Lo anterior se relaciona con el punto de rocío ácido y con el potencial de neutralización y depósito del SO_3 a bajas temperaturas de metal.

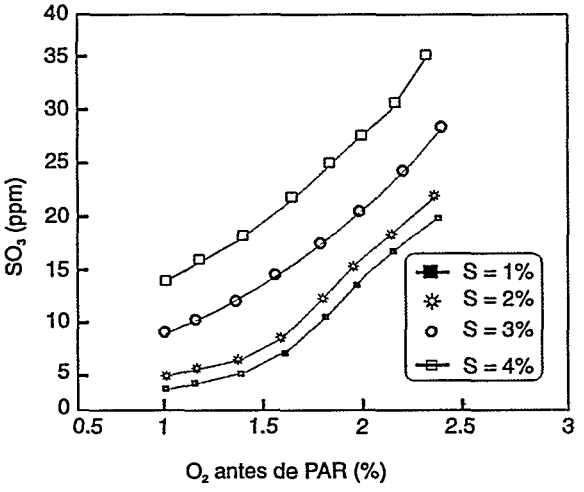
En generadores de vapor que utilizan carbón, la neutralización del SO_2 y SO_3 es mayor por el alto contenido de cenizas. Por ello, las emisiones de SO_2 (figura 2) y de SO_3 son bajas. Esto también está asociado con el bajo contenido de azufre (aproximadamente 1%, cuadro 1) y con los bajos excesos de aire con que pueden operar estos generadores de vapor ($O_2 \leq 2\%$), comparado con el que normalmente se utiliza en el mundo (3%) para cualquier tipo de carbón combustible.

Conclusiones

1. Los combustibles que mayor participación tienen en la emisión de SO_2 y SO_3 a la atmósfera son el carbón y el combustóleo por el alto contenido de azufre. De ellos, el más problemático es el combustóleo.

2. En la combustión de ambos combustibles, la principal conversión de SO_2 en SO_3 ocurre en la fase hetero-

FIGURA 8
Formación de SO_3 en función del contenido de azufre del combustible y del exceso de O_2.



génea, asociada con las altas temperaturas tanto de gases, como de vapor generado y de depósitos catalíticos en los bancos de tubos de sobrecalentadores y recalentadores de generadores de vapor con capacidades de 150 MW o más.

3. La producción de SO_3 en fase homogénea es poco variable con la temperatura de la flama y el exceso de O_2, sólo es afectada por el flujo térmico por unidad de área en el hogar, de forma tal que a mayor flujo térmico, menor conversión de SO_2 en SO_3.

4. La mayor conversión de SO_2 en SO_3 ocurre en fase heterogénea, en la zona convectiva de los generadores de vapor en el rango de temperatura de 400 a 600°C.

5. El exceso de oxígeno (O_2) en el sistema de combustión y el nivel de ensuciamiento en la superficie de intercambio de calor, son las condiciones operativas que mayor influencia presentan en la producción de SO_3.

6. El flujo térmico por unidad de área en el hogar y el tiempo de residencia en la zona convectiva, son las características de diseño que más afectan la producción de SO_3.

7. Las emisiones de SO_2 y SO_3 en chimeneas de generadores de vapor que utilizan carbón, son bajas principalmente por el efecto neutralizante de la ceniza del combustible y por el bajo contenido de azufre.

Referencias

Bunz, P., *et al* (1967), "Influences of fuel oil characteristics and combustion conditions of flue gas properties in water-tube boilers", *J. Inst. of Fuel*, septiembre, pp. 406-416.

Burdett, *et al* (1983), *Factors determinig the effectiveness of magnesia-basedadditives for SO_3 control in oil-fired boilers,* The effectiveness of fuel additives conference, The Institute of Energy, octubre.

Espinoza, G. J. *et al* (1992), "Evaluación de la contaminación ambiental en centrales termoeléctricas de CFE", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad, (Reporte final, módulos 4.1.1 y 4.1.4).

Espinoza, G. J. *et al* (1993), "Servicios de asesoría en el área de combustión", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad, (Informe final).

Espinoza, G. J. y F. M. Martínez (1993), "Teoría y pruebas de combustión: texto para curso", Instituto de Investigaciones Eléctricas/Comisión Federal de Electricidad.

Levy, A. y E. L. Merryman (1963) *Sulfur chemistry and its role in corrosion and deposits*, J. of Energy for Power, (ASME No. 62-WA-124), pp. 229-234.

Milán, F. J., Espinoza, *et al* (1987), "Diagnóstico para la puesta a punto del sistema de combustión de generadores de vapor", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad, (Informe final).

Rendle, L. K. (1959), "Fireside corrosion in oil-fired boilers", *Combustion*, agosto.

Squires, R. T. (1982), "The kinetics of SO_3 formation in oil-fired boilers", Journal *Institute of Energy*, marzo, pp. 41-46.

JESÚS ESPINOZA GARZA



Ingeniero químico por la Universidad Autónoma de Coahuila en 1976. En la misma Universidad de 1976 a 1978, desempeñó las funciones de catedrático y asesor técnico en el Laboratorio de Transferencia de Masa. Laboró de 1978 a 1980 en Química Mexama, S. A., como jefe de área en la producción de ácido cítrico. Desde 1980 colabora en el IIE como investigador y jefe de proyecto en temas relacionados con combustión, transferencia de calor y operación de plantas térmicas. Trabajó en la CFE en la central carboeléctrica Carbón II desempeñando el cargo de supervisor en el departamento de operación y resultados. Realizó estudios de maestría en ingeniería mecánica-térmica en el Cenidet de 1993-1995. Actualmente se desempeña como director y asesor de proyectos en el Departamento de Sistemas de Combustión del IIE.

ADRIANA PENNA GARCÍA



Estudió ingeniería química en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (UAEM). Cuenta con experiencia en la evaluación y reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, producto del proceso de combustión en fuentes fijas. Actualmente se desempeña como investigadora del Departamento de Sistemas de Combustión del Instituto de Investigaciones Eléctricas, utilizando disciplinas como la mecánica de fluidos y los fenómenos de transporte.

MARIO HUERTA ESPINO



Ingeniero químico por la Universidad Veracruzana (1985). Desde febrero de 1987 se ha desempeñado como investigador en los departamentos de Combustibles Fósiles y Sistemas de Combustión del IIE, donde ha participado en proyectos relacionados con la optimación del proceso de combustión. Ha publicado artículos nacionales e internacionales en el área de combustión y control ambiental.

MX9800138

especialmente un DMS o un EMS, podría ser necesaria una oficina LAN consistente de PCS y estaciones de trabajo para ejecutar funciones de soporte como planificación de operación, administración de mantenimiento o facturación. Es un arreglo típico enlazar la LAN de operación con la oficina LAN por medio de un puente, un *router* o una compuerta. Si la compañía tiene un EMS así como un DMS sería ventajoso enlazar las dos LAN y en última instancia, enlaces entre el EMS o el DMS y otras redes en la compañía se instalarían para un intercambio de información más eficiente.

Con la disponibilidad de comunicaciones digitales de banda amplia, como son relevadores de marco, ATM y BISDN, la tendencia hacia un trabajo en una red de elementos automáticos de operación se acelerará de manera impresionante. Unidades terminales remotas, servidores DAC, centros de control, SCADAS de centrales eléctricas y subestaciones se vincularán vía trabajo Internet. Así arribaremos al grado, parafraseando un *slogan* de Microsystems, de que la red es el centro de control.

Versión en español de Alan Sandoval A. del Departamento de Difusión Tecnológica del IIE.

XX

REUNIÓN NACIONAL DE ENERGÍA SOLAR

del 2 al 4 de octubre de 1996, Jalapa, Veracruz, México

Organizan: Asociación Nacional de Energía Solar
Universidad Veracruzana

Temario

- Helioarquitectura
- Aplicaciones fotovoltaicas
- Colectores solares
- Destilación solar
- Energía y medio ambiente
- Energía eólica
- Instrumentación
- Materiales
- Procesos térmicos
- Radiación solar
- Refrigeración solar
- Secado solar
- Política energética
- Educación

Durante el evento se incluirá una exposición titulada *Veinte años de esfuerzo solar en México* con una retrospectiva fotográfica de los trabajos relevantes que han realizado las instituciones de investigación y educación superior y las empresas privadas del país sobre energía solar y sus derivadas: eólica, biomásica y pequeña hidro.

Para mayor información

Ing. Ricardo Saldaña Flores
Director técnico de la XX Reunión Nacional de la ANES
Apartado Postal 1-475,
CP 62001 Cuernavaca, Morelos
Teléfono (73) 18 38 11, extensión 7254
Fax (73) 18 98 54
Correo electrónico rsf@iie.org.mx

El programa Quetzal/II para el estudio de la dispersión de contaminantes en flujos con recirculación

Hermilo Ramírez León

El fenómeno que nos ocupa en este estudio es una cavidad que puede formarse cerca de una central termoeléctrica y atrapar en forma parcial o total las emisiones producidas. Ello puede provocar que se depositen en forma violenta en las cercanías de las zonas donde fueron emitidas.

Resumen

En este artículo se describe un modelo físico-matemático para el estudio del transporte de contaminantes atmosféricos cuando son atrapados en las cavidades producidas por la acción del viento sobre las centrales termoeléctricas. La característica principal de estas cavidades es que involucran zonas de alta turbulencia donde las variables físicas cambian de magnitud y dirección considerablemente. El modelo desarrollado permite analizar estos flujos, así como su evolución en el espacio y en el tiempo y su influencia sobre el transporte de los contaminantes; la turbulencia se representa por medio de un modelo $\kappa-\varepsilon$.

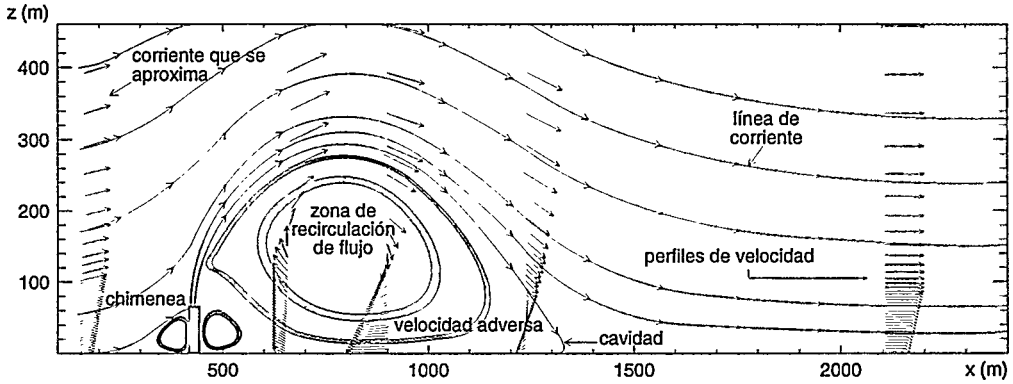
Introducción

En el presente trabajo se estudia un flujo con recirculación producido cuando una corriente de aire se impacta contra un obstáculo como se muestra en la figura 1; por causa del impacto se producen tres fenómenos principalmente: zonas de vorticidad al pie del obstáculo, una cavidad después del mismo y, consecuentemente, la deflexión de las líneas de corriente. El fenómeno que nos ocupa en este estudio es una cavidad que puede formarse cerca de una central termoeléctrica y atrapar en forma parcial o total las emisiones producidas. Ello puede provocar que se depositen en forma violenta en las cercanías de las zonas donde fueron emitidas.

En tal caso, la evolución de las concentraciones depende de los patrones de la corriente de aire cerca de la chimenea y de las características físicas y químicas de los gases emitidos. La influencia del fenómeno de recirculación sobre la dispersión de la pluma ha sido objeto de estudios en túneles de viento y de campo en diversas condiciones atmosféricas. Por lo mismo, existe en la literatura un gran número de fórmulas matemáticas, modelos y algoritmos, los cuales se han incorporado a códigos de cómputo gaussianos. Sin embargo, los modelos gaussianos no son apropiados para estimar la distribución de la concentración en flujos con recirculación y los resultados que de ellos se obtienen pueden alejarse de la realidad. Se han propuesto otro tipo de modelos, pero han tenido deficiencias en cuanto a la predicción de las concentraciones, debido a que no simulan adecuadamente la recirculación y consecuentemente la captura parcial o total de la pluma [Zannetti, 1990].

El método que se propone considera una formulación euleriana deducida de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos y de las teorías estadísticas de la turbulencia; los resultados que se están obteniendo son satisfactorios e interesantes ya que las principales carac-

FIGURA 1
Definición de un flujo con recirculación producido por una chimenea.



terísticas de este problema se han reproducido adecuadamente.

Ecuaciones estadísticas para la capa límite atmosférica

El problema físico-matemático se resuelve considerando que las ecuaciones que permiten el estudio de este fenómeno son la ecuación de continuidad, de *momentum,* de la energía y de conservación de especies; de la misma forma se considera una ecuación de estado. Las ecuaciones se simplifican debido a que la región de la atmósfera en la cual sucede este fenómeno es pequeña comparada con la escala global de la atmósfera [De Moor, 1983]. Posteriormente se considera la descomposición estadística de Reynolds sobre las variables físicas que intervienen en las ecuaciones, de tal forma que una variable se expresa como la suma de una cantidad media y una fluctuante, como se ilustra en la figura 2.

Las variables físicas pueden escribirse entonces como:

$$\Phi = \overline{\Phi} + \phi \qquad [1]$$

En donde $\Phi(\vec{x},t)$ representa una variable física instantánea, $\overline{\Phi}(\vec{x},t)$ es la cantidad media y $\phi(\vec{x},t)$ es la cantidad fluctuante. Al introducir esta descomposición en las ecuaciones y al considerar los postulados de Reynolds, puede deducirse el siguiente sistema de ecuaciones estadístico para un flujo incompresible [Monin y Yaglom, 1971]:

Ecuación de estado:

$$\overline{P} = R\overline{\rho}\overline{T} \qquad [2]$$

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad [3]$$

Ecuación para las velocidades:

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + g_i \frac{\rho_E - \rho_N}{\rho_N} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j}}_{(*)} \qquad [4]$$

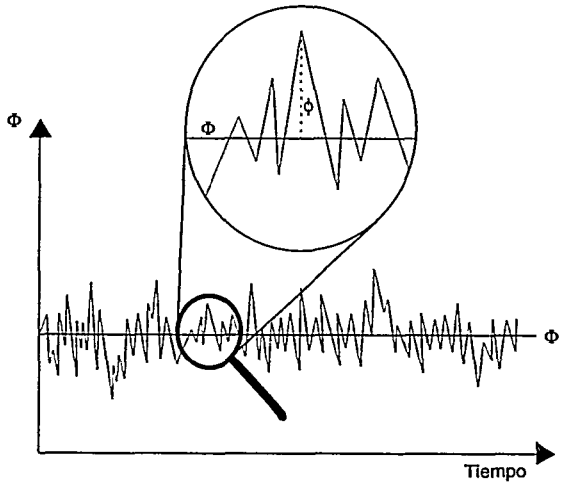
Ecuación para la temperatura:

$$\frac{\partial \overline{T}}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} = -\underbrace{\frac{\partial \overline{u_i \theta}}{\partial x_i}}_{(*)} \qquad [5]$$

Ecuación para las especies:

$$\frac{\partial \overline{C}_\alpha}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \overline{C}_\alpha}{\partial x_j} = -\underbrace{\frac{\partial \overline{u_i c_\alpha}}{\partial x_i}}_{(*)} \qquad [6]$$

FIGURA 2
Descomposición estadística de las variables.



El tratamiento estadístico de las ecuaciones introduce momentos de segundo orden, denotados por (*) en las ecuaciones 4, 5 y 6 y son conocidos como tensiones de Reynolds, flujo de calor y flujo de masa, respectivamente. Estos momentos introducen el problema de la modelación matemática propiamente dicho. Además, son los términos que permiten considerar la estructura turbulenta del flujo y por ello se debe representarlos correctamente. Existen diferentes métodos y procedimientos que permiten la modelación de estos términos; en este trabajo se ha elegido representarlos mediante un modelo de turbulencia de primer orden con dos ecuaciones para el campo dinámico. El campo térmico y el de especies se relacionan directamente con el campo dinámico mediante coeficientes empíricos optimados numéricamente. Este modelo de turbulencia se describe a continuación.

El modelo de turbulencia de primer orden

En este modelo, los esfuerzos de Reynolds se evalúan en términos del modelo $\kappa-\varepsilon$ estándar mediante la siguiente formulación:

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_T\left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i}\right) + \frac{2}{3}\kappa\delta_{ij} \qquad [7]$$

donde el coeficiente de viscosidad turbulenta cinemática ν_T se obtiene por medio de:

$$\nu_T = C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \qquad [8]$$

κ, energía cinética de la turbulencia, para el modelo $\kappa-\varepsilon$ estándar está definida por:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \overline{U}_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = P + B - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_\kappa}\frac{\partial \kappa}{\partial x_i}\right) \qquad [9]$$

y ε, la disipación de κ, por:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\overline{U}_i\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}=C_{\varepsilon 1}(P+B)-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{\kappa}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) \qquad [10]$$

En estas ecuaciones, P y B determinan los términos de producción y de flotación, respectivamente y se definen mediante:

$$P=\nu_T\left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} \quad ; \quad B=\frac{1}{T}g\frac{\nu_T}{P_{RT}}\frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} \qquad [11]$$

Los valores de las constantes corresponden a las definidas para el modelo $\kappa-\varepsilon$ estándar [Rodi, 1982]:

$$C_{\varepsilon 1}=1.44 \quad ; \quad C_{\varepsilon 2}=1.92 \quad ; \quad C_\mu=0.09 \quad ;$$

$$\sigma_k=1.0 \quad ; \quad \sigma_\varepsilon=1.3$$

El método que se propone considera una formulación euleriana deducida de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos y de las teorías estadísticas de la turbulencia; los resultados que se están obteniendo son satisfactorios e interesantes ya que las principales características de este problema se han reproducido adecuadamente.

Por otro lado, el flujo de calor se obtiene mediante la relación

$$\overline{u_i\theta}=-K_{T_i}\frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} \quad \Rightarrow \quad K_{T_i}=\frac{\nu_{T_i}}{P_{RT}} \qquad [12]$$

donde K_{T_i} es el coeficiente de difusividad térmica equivalente y P_{RT} el número de Prandtl turbulento. En forma análoga el flujo de masa se obtiene a partir de:

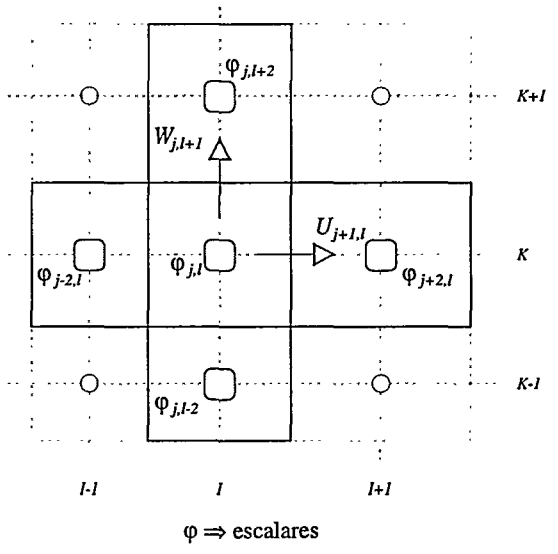
$$\overline{u_i c_\alpha}=-D_{T_i}\frac{\partial \overline{C_\alpha}}{\partial x_i} \quad \Rightarrow \quad D_{T_i}=\frac{\nu_{T_i}}{Sch_T} \qquad [13]$$

siendo D_T el coeficiente de difusión de masa equivalente y Sch_T el número de Schmitd turbulento [Donalson, 1973].

Solución numérica

El sistema de ecuaciones se resuelve mediante diversas técnicas de discretización numérica que involucran la célula

FIGURA 3
Célula de discretización.



MAC para un flujo bidimensional (figura 3); se consideran diferencias centradas para los términos de difusión y un esquema ponderado "hacia adelante" para los términos de advección. La ecuación de la divergencia de la velocidad se resuelve mediante una derivación del esquema de compresibilidad artificial implícita propuesto por Chorin [1967], el cual consiste en relajar simultáneamente velocidades y presiones hasta que dicha ecuación converja hacia un valor tendiente a cero [Peyret y Taylor, 1983]. Debido a la alta variación de las cantidades físicas en la zona de recirculación, fue necesario realizar un estudio de malla con objeto de optimarla; finalmente, se consideró una malla en progresión logarítmica para ambas direcciones.

Estructura del programa Quetzal/II

Las ecuaciones discretizadas y el algoritmo de cálculo están contenidas en el programa Quetzal/II, desarrollado en el IIE para el estudio de la dispersión de contaminantes en la atmósfera [Ramírez, 1994]. La estructura de este programa puede verse en la figura 4.

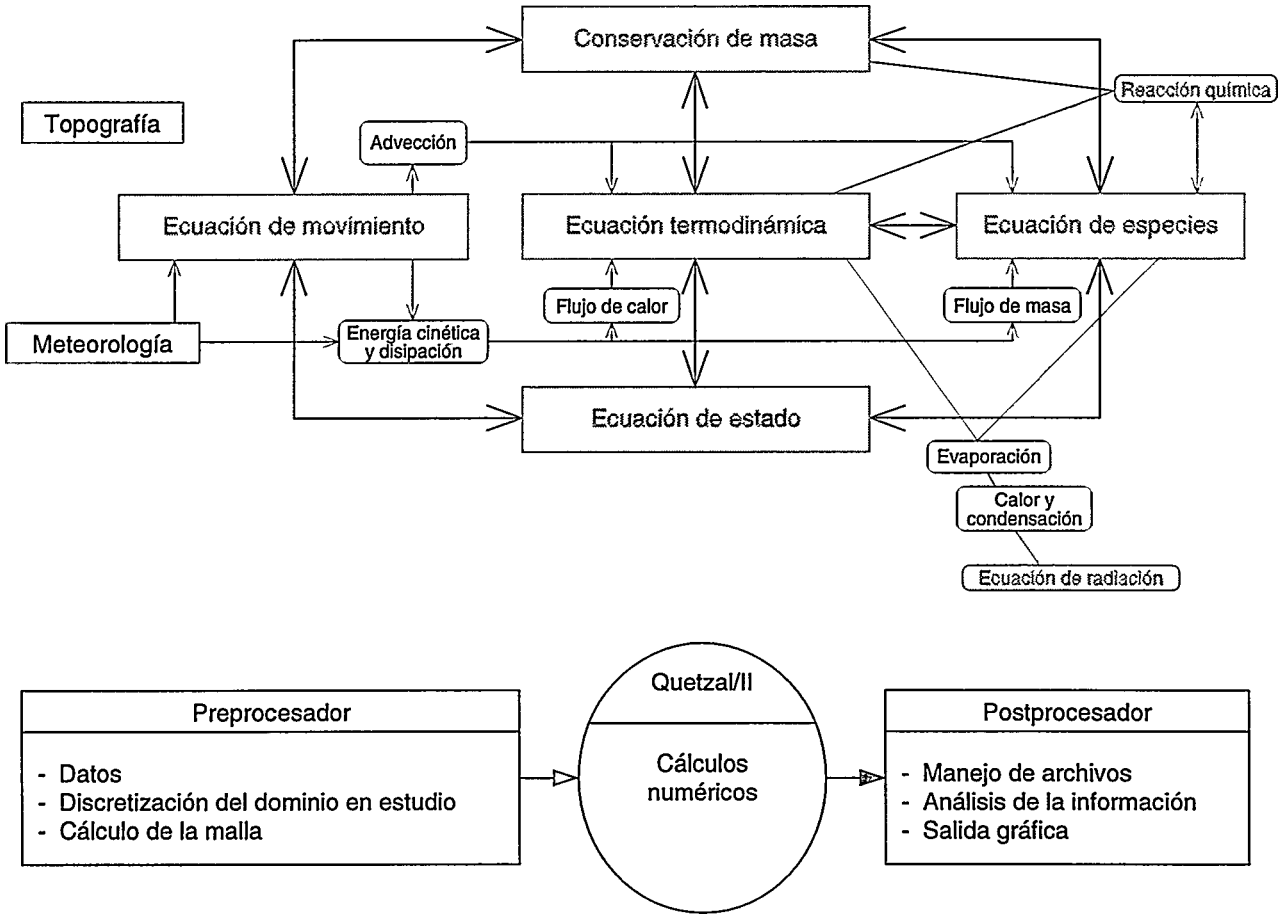
Aplicación al estudio de los flujos con recirculación

El estudio del flujo con recirculación es similar al mostrado en la figura 1; para el cual las condiciones de emisión de la chimenea están dadas en el cuadro 1.

Por otro lado, las condiciones de la atmósfera están definidas para una atmósfera inestable y sobre un terreno rural y plano; el perfil vertical de la velocidad del viento se obtiene con la fórmula siguiente [Sutton, 1953]:

$$v=U_{V10}\left(\frac{Z_\ell}{Z_0}\right)^n \qquad [14]$$

FIGURA 4
Organización del programa QUETZAL/II.



CUADRO 1
Condiciones de emisión.

Velocidad We (m/s)	*Temperatura ΔTe (K)*	*Concentración Ce (g/m³)*
5	20	15.02

donde las variables se definen como sigue: altura de referencia $H_{V10} = 10\,m$; velocidad de referencia $v_{10} = 1\,m/s$; rugosidad equivalente $Z_0 = 0.5\,m$, y finalmente el coeficiente *n*, que se define principalmente en términos de la estabilidad de la atmósfera se toma como $n = 0.2$. Los perfiles de presión y de temperatura se evalúan considerando los siguientes gradientes verticales, respectivamente: $\Delta P_N = -11.40$ y $\Delta T_N = -0.018$.

Una vez optimada la malla, se realizaron simulaciones para la calibración de algunas de las constantes que aparecen en el modelo, en particular los números de Prandtl (ecuación 12) y Schmidt (ecuación 13); los valores encontrados como óptimos son $P_{RT} = 0.5$ y $Sch_T = 0.7$. Los resultados obtenidos se muestran de las figuras 5 a 8, en donde puede verse la evolución del fenómeno tanto en el tiempo como en el espacio. En la parte (a) de las figuras se grafican los vectores de velocidad y las líneas de corriente; en la parte (b) la evolución de la viscosidad equivalente turbulenta ν_T, dada por la ecuación 8; en la parte (c) la evolución de la especie en estudio emitida por la chimenea; finalmente, en la (d) puede verse la concentración obtenida sobre el piso y la máxima concentración registrada, así como su ubicación en el espacio.

Conclusiones

Con la aplicación del programa Quetzal/II se logró reproducir la evolución de la viscosidad turbulenta ν_T, la cual involucra la energía cinética de la turbulencia (κ) y su disipación (ε), variable que representa la estructura turbulenta del flujo. Por otro lado, las ecuaciones están acopla-

FIGURA 5
Resultados para t= 30 s.

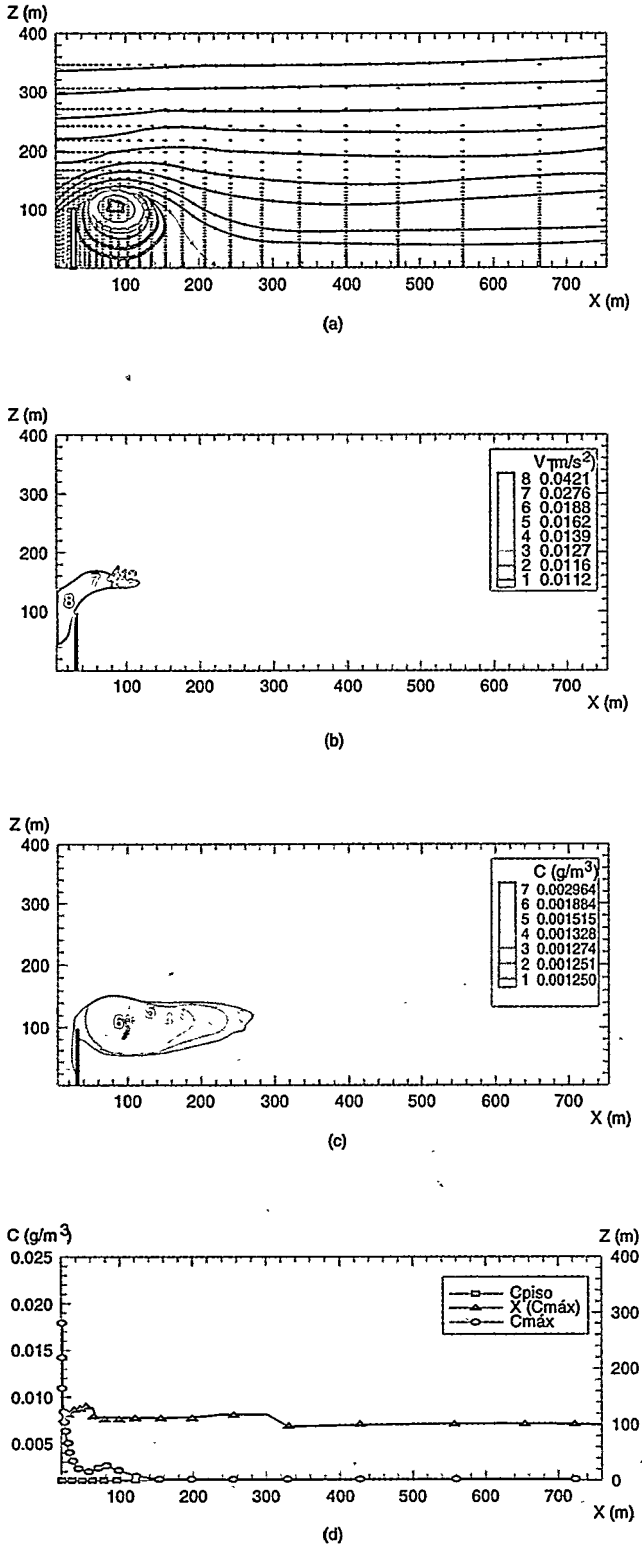


FIGURA 6
Resultados para t= 60 s.

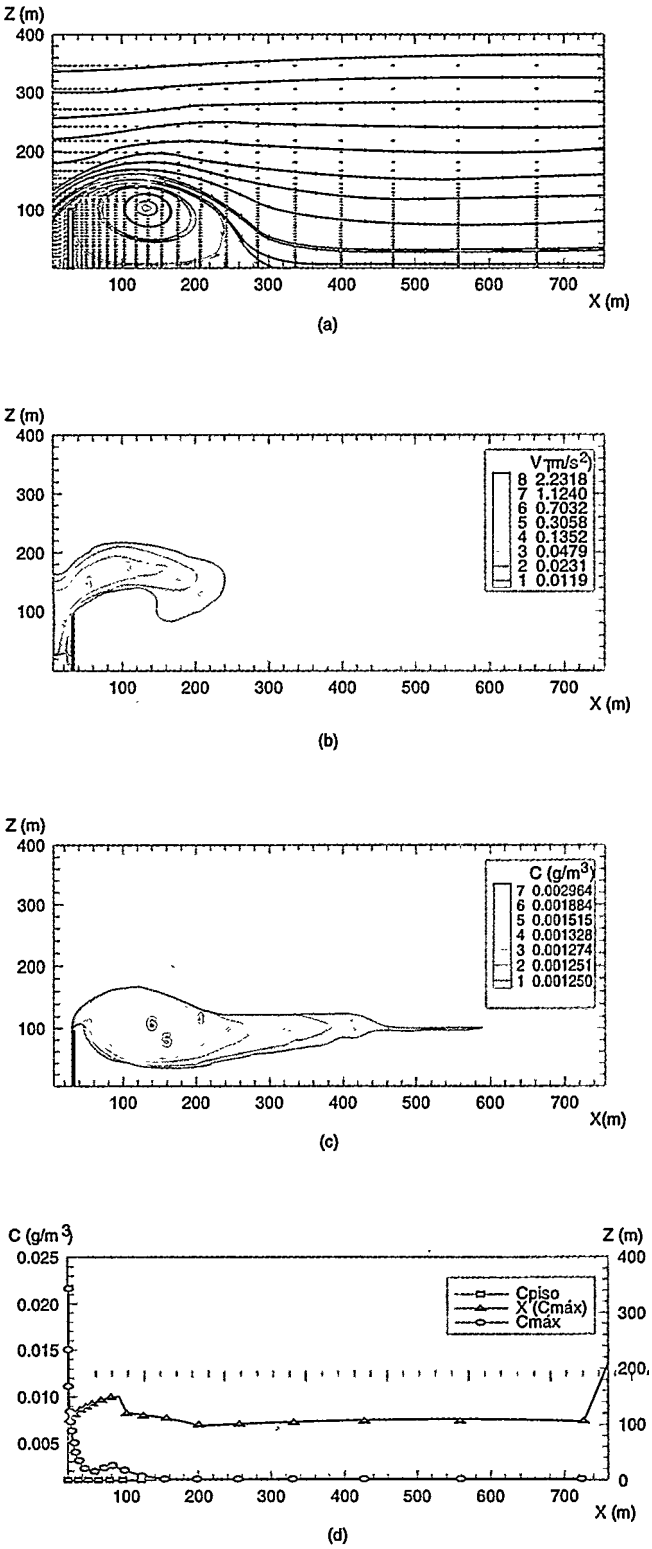
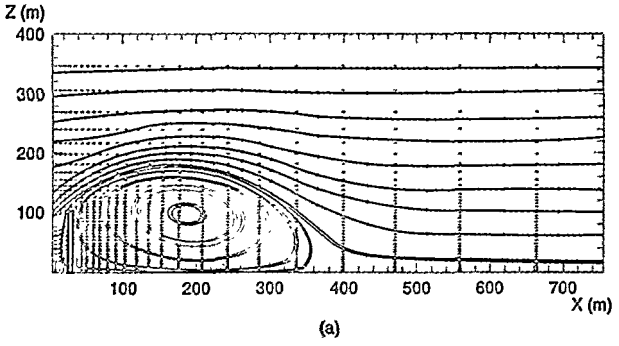
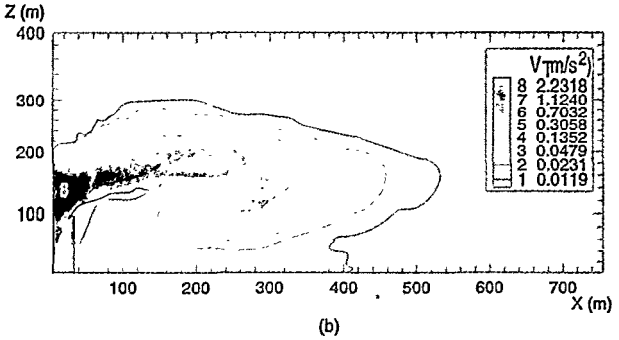


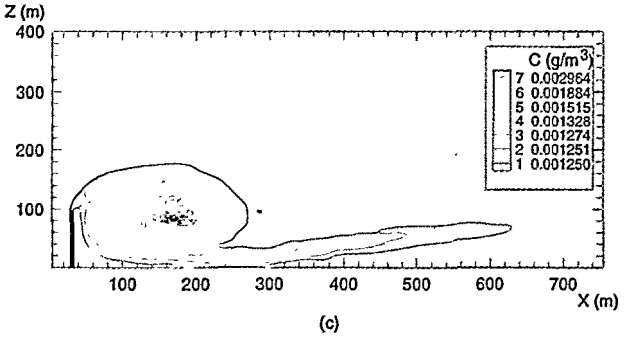
FIGURA 7
Resultados para t= 120 s.



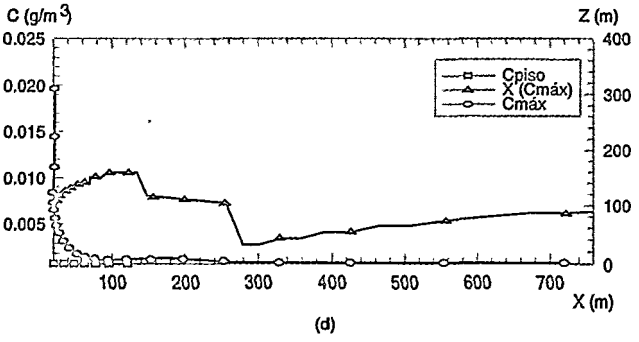
(a)



(b)

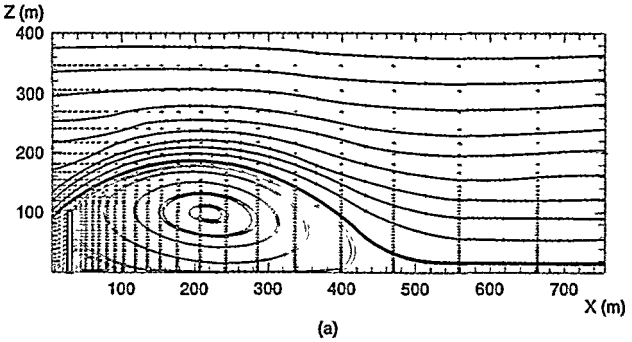


(c)

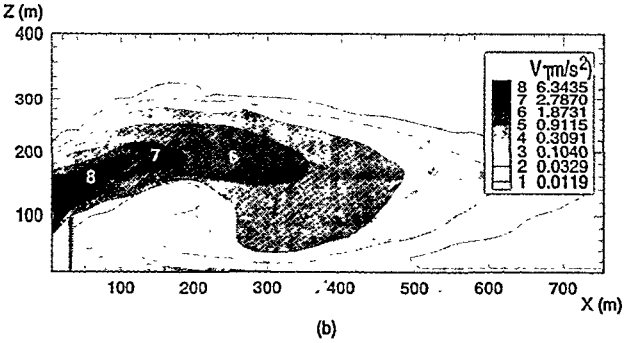


(d)

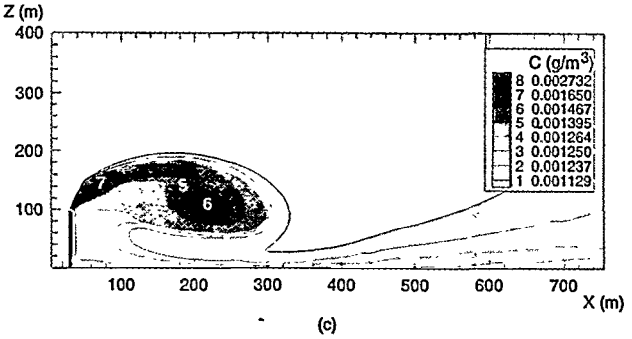
FIGURA 8
Resultados para t= 180 s.



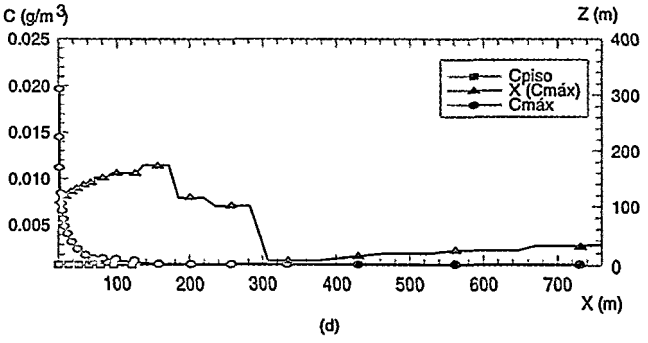
(a)



(b)



(c)



(d)

das entre sí y se eligió un método de solución parabólico en el tiempo y elíptico en el espacio, lo cual facilita la consideración de los procesos químicos. Actualmente el modelo se está ampliando de tal forma que pueda considerarse el mecanismo de reacción química sobre los contaminantes; en particular, se está desarrollando un estudio de dispersión contaminantes sobre la central termoeléctrica de Lerdo (ubicada en la ciudad de Lerdo, Durango) con objeto de introducir una subrutina que pueda considerar la evolución de los procesos químicos; ya se han obtenido algunos resultados para el SO_2 [Ramírez y Muriel, 1995].

Referencias

Chorin, A. J. (1967), "A numerical method for solving incompressible viscouss flow problems", *Journal of computational physiscs*, 2, 12-26.

De Moor, G. (1983), *Les théories de la turbulence dans la couche limite atmosphérique*, Ecole Nationale de Metéorologie, Toulouse-Miral, Francia.

Du P., Donaldson C. (1973), *Construction of a dynamic model of the production of atmospheric turbulence and dispersal of atmospheric pollutants,* Workshop on Micrometereology (edited by Haugen P. A.), pp. 313-392. American Meteorological Society, Boston, M. A., Estados Unidos.

Monin, A. S. y A. M. Yaglom (1971), *Statistical fluid mechanics*, Ed. Lumley, MIT Press, Cambridge, Estados Unidos.

Peyret, R. y T. D. Taylor (1983), *Computational methods for fluid flow*, Ed. Springer-Verlag, Estados Unidos.

Ramírez León, H. (1994), "El programa Quetzal/II para el estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos", VII seminario IIE-IMP-ININ, Instituto Mexicano del Petróleo.

Ramírez León, H. y Muriel García M. (1995), "Numerical and experimental study on the SO_2 pollution produced by Lerdo power plant in Mexico", sometido a la revista *Atmospheric Environment.*

Rodi, W. (1982), *Turbulent buoyant jets and plumes,* HMT, the science and applications of heat and mass transfer; vol. 6, Pergamon Press Ltd. Gran Bretaña.

Sutton, O. G. (1953), *Micrometeorology: a study of physical processes in the lowest layers of earth's atmosphere,* New York, Ed. McGraw Hill, Estados Unidos.

Zannetti, P. (1990), *Air pollution modeling. Theories, computational methods and available software,* Van Nostrand Reinhold, New York, Estados Unidos.

HERMILO RAMÍREZ LEÓN



Licenciado en ingeniería civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (1984), estudió la maestría en ingeniería hidráulica en 1988 en nuestra máxima casa de estudios para posteriormente obtener el doctorado en ciencias de la ingeniería con especialidad en dinámica de fluidos y transferencias (1991) en la Ecole Centrale de Nantes, Francia, donde también tuvo una estancia posdoctoral (1994) trabajando sobre modelación matemática de procesos de transferencia, efectos térmicos y dispersión de contaminantes. En 1992 ingresó al IIE como investigador del Departamento de Sistemas de Combustión realizando estudios sobre la dispersión de contaminantes atmosféricos. Participante en diversos foros nacionales e internacionales, ha publicado diversos artículos técnicos en congresos y revistas del país y del extranjero. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde 1992.

MX9800139

Asfaltenos en combustóleos mexicanos

Rigoberto Longoria Ramírez

Resumen

En este artículo se subrayan los principales aspectos en los que el IIE ha trabajado para contribuir a la solución de problemas debidos a la presencia de asfaltenos en combustóleos nacionales. El incremento de estos compuestos, que concentran elementos nocivos, en los últimos diez años ha llegado hasta un 22% del peso del combustóleo. Se demuestra que la cuantificación de los asfaltenos depende del tipo de solvente utilizado.

Generalidades

Los estudios realizados sobre la calidad de productos residuales del petróleo han sido benéficos para las compañías generadoras de electricidad, ya que para 1985 la calidad de los combustóleos se había deteriorado notablemente, manifestándose en problemas ocasionales durante su almacenamiento, manejo y combustión.

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (máximo consumidor de combustóleo) ha tenido conocimiento, desde principios de los años ochenta, del deterioro en la calidad de los combustóleos que consume, razón por la que los estudios realizados en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) sobre caracterización y combustión de combustóleos se han orientado en dos sentidos:

- Encontrar mejores condiciones para manejar combustóleos de menor calidad.
- Encontrar alternativas que hagan viable la utilización de combustibles de mejor calidad en la generación de electricidad.

La calidad de los combustóleos se ha visto afectada por cambios en la misma industria petrolera mundial: avance tecnológico para la extracción de crudos, modificaciones de los procesos de refinación y mercado más amplio, entre otros. Estos cambios, además de provocar mayor variación en la calidad de los crudos, han originado mayor concentración de los residuos por procesos de refinación más eficientes y una frecuencia mayor en mezclado de residuos incompatibles.

En el caso de nuestro país, también ha sido notorio el cambio en la calidad de los combustóleos y se pretende dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Cómo han cambiado?, ¿cómo se espera que varíe su calidad en el futuro?, ¿cómo deberán los consumidores (CFE) reaccionar frente al deterioro de la calidad?, ¿qué opciones se tienen para afrontar un mayor deterioro de su calidad?

Las propiedades de los combustóleos que mayormente han influido sobre el control de los proceso de combustión en la promoción de fenómenos de corrosión en zonas de alta y baja temperatura de las calderas y en la emisión de contaminantes durante la combustión son la densidad, el valor calorífico y la viscosidad, el contenido de azufre, metales y asfaltenos.

Otro reflejo del deterioro de la calidad de los combustóleos se encuentra en una menor estabilidad, lo que trae como resultado la formación de sedimentos en los tanques de almacenamiento, ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor, taponamientos de filtros, etcétera.

El concepto de estabilidad referido a combustóleos es muy amplio, en la práctica se le considera como la resistencia a la separación de sus componentes.

La estabilidad debe considerarse en dos partes: la de combustóleos no mezclados y la de sus mezclas.

Desde el punto de vista químico, los combustóleos están compuestos por una variedad de hidrocarburos, de los cuales cuatro son los tipos más importantes por su contenido en volumen y que en orden de inestabilidad creciente son: parafinas (C_nH_{2n+2}), nafténicos (C_nH_{2n}), aromáticos (C_nH_{2n-6}) y olefínicos (C_nH_{2n}). La estabilidad de estos hidrocarburos está gobernada por su resistencia a la oxidación, ya que cuando se oxidan, se forma un nuevo producto, el cual puede ser insoluble y finalmente sedimentarse formando lodos. Cuando el proceso de refinación por altas temperaturas y presiones es excesivo, se produce carbón y otros compuestos insolubles que pueden permanecer suspendidos mientras no representen una proporción importante.

En las mezclas, la formación de lodos y su cantidad está en función de la composición del residual y del diluyente; el precipitado orgánico o sedimento está formado por asfaltenos; el tipo de diluyente y su proporción, así como la cantidad de asfaltenos en el aceite residual, son los factores determinantes en la forma-

Los estudios realizados en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) sobre caracterización y combustión de combustóleos se han orientado en dos sentidos: encontrar mejores condiciones para manejar combustóleos de menor calidad y encontrar alternativas que hagan viable la utilización de combustibles de mejor calidad en la generación de electricidad.

ción de lodos. Pequeñas cantidades de diluyentes no precipitan grandes cantidades de lodos, lo cual se debe al establecimiento de un equilibrio que puede romperse por la adición de más diluyente; esto se generaliza de la siguiente manera: "cuanto mayor contenido de diluyente tanto mayor cantidad de precipitado".

Con relación a las características de los diluyentes, se dice que son mejores aquellos que se derivan de procesos de rompimiento térmico *(crakeo)* que los obtenidos de procesos catalíticos ya que los primeros contienen mayor proporción de hidrocarburos aromáticos que contribuyen a mantener el equilibrio en el residuo después del mezclado.

Como resultado de la presencia de sólidos suspendidos en la parte líquida del combustóleo se obtienen condiciones que afectan la combustión, puesto que, en realidad, se está quemando material en estado líquido y en estado sólido que requiere, por separado, diferentes proporciones de aire. Lo anterior, junto con una posible mala atomización, redunda en la modificación de los patrones de tamaño de flama, la acumulación de sólidos y el incremento en la emisión de inquemados.

Una porción importante de la parte sólida de los combustóleos mexicanos la constituyen los asfaltenos que se señalan como la causa de la formación de tamaños de flama más largas, lo cual, de acuerdo con estudios realizados en el IIE, se asocia con la alta frecuencia de carburización en calderas que, a su vez, provocan altas velocidades de corrosión en tubería de sobrecalentadores y recalentadores [Longoria, R. *et al,* 1993; López, D., 1994].

No siempre se logra una homogeneización de las fracciones al mezclarse combustóleos ligeros y pesados, produciéndose una separación o estratificación en los tanques de almacenamiento con los componentes ligeros en la parte superior, los mezclados en la parte media y los pesados en el fondo; esto provoca que al quemador llegue material de diferente viscosidad.

Algunos puntos indicativos de la inestabilidad de los combustóleos pueden ser acumulación excesiva y en forma rápida de lodos en el fondo de los tanques de almacenamiento; formación de gran cantidad de carbón por descomposición térmica de los componentes pesados; alta formación de hollín por la combustión incompleta de los compuestos pesados, insolubles y precipitados, y formación de sustancias con apariencia de gomas y ceras que se acumulan en los filtros [Schmidt, Paul].

La calidad de los combustóleos se ha visto afectada por cambios en la misma industria petrolera mundial: avance tecnológico para la extracción de crudos, modificaciones de los procesos de refinación y mercado más amplio, entre otros. Estos cambios además de provocar mayor variación en la calidad de los crudos, han originado mayor concentración de los residuos por procesos de refinación más eficientes y una frecuencia mayor en mezclado de residuos incompatibles.

Composición de los combustóleos

Los combustóleos resultantes de la mezcla de componentes cuyos puntos de ebullición son de 537.8°C o más; con fracciones de temperaturas de ebullición entre 204-343°C y fracciones relativamente menores con puntos de ebullición intermedios, 343-537.8°C, a pesar de que cumplan con las especificaciones de viscosidad, densidad, azufre, metales, etc., mostrarán perfiles de combustión difíciles de predecir y, por lo tanto, patrones propios de comportamiento en los equipos de combustión, sobre todo si el origen de las diferentes fracciones no es el mismo, lo que provocará problemas de almacenamiento y de compatibilidad y se reflejará en un comportamiento pobre al ser quemadas [EPRI P-5788, 1988].

Por el origen de los crudos, los combustóleos pueden constituirse por altas fracciones de hidrocarburos de cadenas rectas y bajas concentraciones de compuestos cíclicos (aromáticos y nafténicos) si el crudo de origen es ligero. Por lo contrario, si el crudo de origen es pesado, la fracción predominante estará compuesta por hidrocarburos aromáticos, nafténicos y olefinas.

Uno de los constituyentes importantes de los combustóleos mexicanos son los asfaltenos, que suelen estar presentes como soluciones coloidales, es decir, como una suspensión de pequeñas partículas en fase líquida que no alcanzan a precipitar. La solución se puede mantener estable mientras los asfaltenos estén en una concentración tan baja que permita su propia dilución. Si cambian las condiciones, al incrementar, por ejemplo, una fracción no compatible, los asfaltenos se precipitarán.

La incompatibilidad en los combustóleos puede originarse cuando son obtenidos de mezclas de residuos altamente parafínicos, con residuos nafténicos, ocasionando que se precipiten ciertos componentes, como moléculas pesadas de asfaltenos.

La precipitación puede ocurrir rápida o lentamente en los tanques de almacenamiento. Una precipitación lenta conduce a la formación de dos fases, quedando en el fondo del tanque la más pesada y rica en asfaltenos.

La incompatibilidad ocurre más frecuentemente cuando se tienen las condiciones siguientes: contenido de azufre mayor a 1.0%, mezclas de residuos de origen aromático con residuos de origen parafínico si se mezclan combustóleos diferentes en su densidad en grados API mayores a tres o cuatro grados y falta de recirculación en los tanques por varios días [EPRI P-5788, 1988].

Asfaltenos

Los asfaltenos son las fracciones del petróleo de más alto punto de ebullición. Pueden obtenerse por varios procedimientos: destilación al vacío

del crudo del petróleo, tratamiento del residuo del petróleo con pentano bajo condiciones controladas y contacto del residuo del petróleo con aire a temperaturas de 100 a 280°C [Bodusznski, M.].

Los asfaltenos, que en la actualidad representan una fracción importante de los combustóleos, son núcleos aromáticos condensados con un número de anillos que varía de 6 a 15 o 20, que contienen sistemas laterales con radicales alkilo o alicíclicos, con heteroelementos (N,O,S) integrados en su estructura [Podobaeva, T. P. *et al*]. No tienen una estructura molecular definida, son sólidos friables de color obscuro, son insolubles en solventes no polares de tensión superficial menor de 25 dinas/cm a 25 grados (propano y heptano normales), son solubles en líquidos con tensiones superficiales mayores a 25 dinas /cm (benceno, tetracloruro de carbono), su contenido de carbón es de 82 3.0%, entre otras características [Speight, J.].

Los asfaltenos son una mezcla químicamente indeterminada precipitada de bitúmenes, residuos de petróleo y carbón, con solventes hidrocarbonados no polares. Esta mezcla compleja tiene compuestos de un amplio rango de pesos moleculares, polaridades y grupos funcionales (figura 1).

De acuerdo con estudios realizados en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en 1979 el contenido de asfaltenos en combustóleos mexicanos (cuantificados como insolubles en n-pentano) era del orden de 5% en peso, porcentaje que se incrementó hasta un 15% en los siguientes tres años, llegándose a obtener un promedio de 16% en el periodo de 1987 a 1991. Durante el año de 1992 se analizaron 95 muestras de combustóleo procedente de diferentes centrales termoeléctricas del país, encontrándose contenidos de asfaltenos hasta de 22% en peso y, con excepción de dos muestras con 13.4 y 13.6 %, el resto estuvieron por encima del 16% [Longoria, R. *et al*, 1993; 1992] (figura 2).

La composición de los precipitados (asfaltenos) puede cambiarse si se varía la cantidad y tipo de solvente.

Con el propósito de encontrar una relación entre el número de átomos de carbón en los hidrocarburos saturados normales y la cantidad de asfaltenos precipitados por estos solventes, en el Laboratorio de Análisis de Combustibles (LAC) del IIE, se efectuaron pruebas a muestras procedentes de las refinerías de Tula y Salamanca y de las centrales termoeléctricas de Mérida y Manzanillo, obteniéndose una marcada disminución en la cantidad de asfaltenos con el incremento del número de átomos de carbón del solvente parafínico, así como una notable diferencia en el contenido de asfaltenos entre las diferentes muestras [Logoria, R. *et al*, 1994] (cuadro 1, figura 3).

Si se comparan estos resultados con los reportados en la literatura, se encuentran las mismas tendencias, sólo que con resultados más altos de asfaltenos, como se podría esperar de acuerdo con la calidad de nuestros combustóleos [Long, Robert].

La pérdida de grupos funcionales aumentan la solubilidad de asfaltenos en solventes no polares.

La pérdida de cadenas laterales y de otras partes no saturadas del esqueleto aromático disminuyen la solubilidad en no polares.

La disminución del peso molecular aumenta la solubilidad.

La condensación de aromáticos disminuye la solubilidad, ya que esto se refleja en un aumento de peso molecu-

FIGURA 1
Estructuras de constituyentes de asfalteno

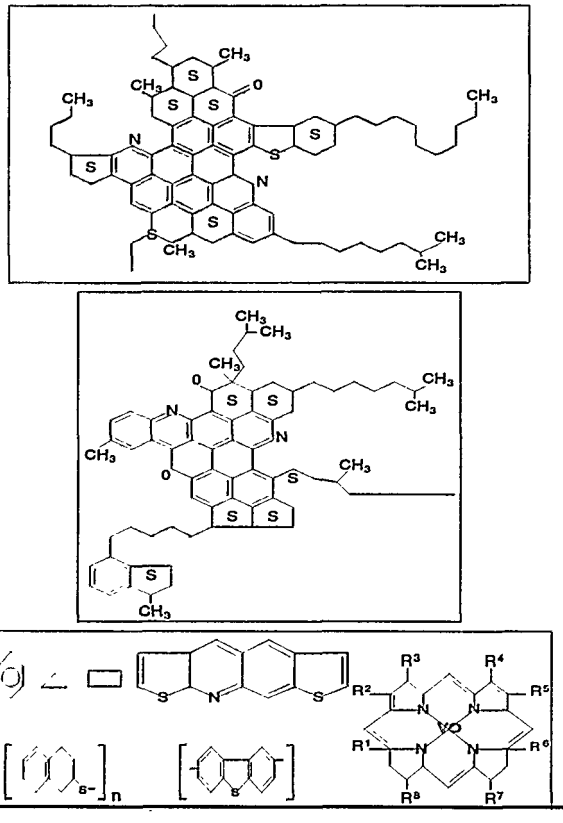
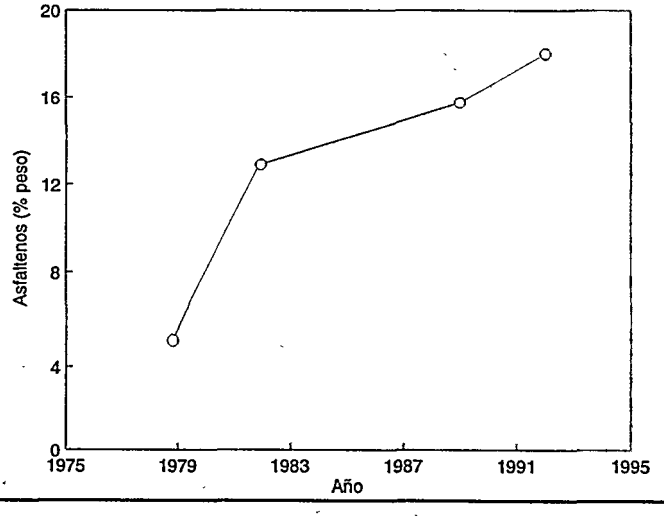


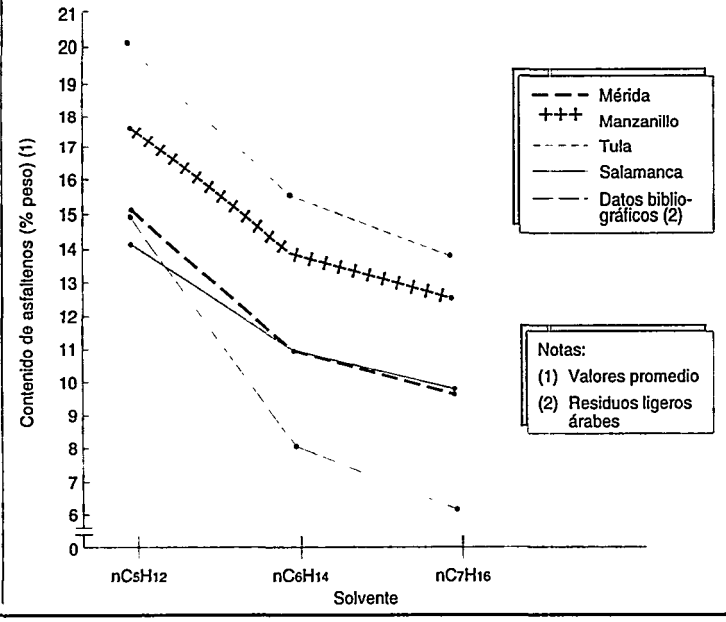
FIGURA 2
Variación del contenido de asfaltenos en los combustibles mexicanos.



CUADRO 1
Contenido de asfaltenos contra solventes parafínicos, porcentaje en peso.

Origen de la muestra	*Solventes parafínicos*		
	n-pentano	*n-hexano*	*n-heptano*
Mérida	15.16	10.98	9.61
Manzanillo	17.65	13.89	12.53
Salamanca	14.32	11.03	9.70
Tula	20.20	15.51	13.70

FIGURA 3
Dependencia del contenido de asfaltenos con el número de átomos de carbono del solvente.



Las propiedades de los combustóleos que mayormente han influido sobre el control de los proceso de combustión en la promoción de fenómenos de corrosión en zonas de alta y baja temperatura de las calderas y en la emisión de contaminantes durante la combustión son la densidad, el valor calorífico y la viscosidad, el contenido de azufre, metales y asfaltenos.

lar.

Por todo lo anterior se puede considerar que los asfaltenos obtenidos en n-pentano contienen más grupos funcionales y mayor peso molecular que los asfaltenos de n-heptano, es decir, son menos solubles en n-pentano que en n-heptano por el contenido de grupos funcionales.

Descomposición térmica de asfaltenos

La descomposición térmica de los asfaltenos especialmente estudiados mostraron que a 343°C o menos se tiene una pequeña descomposición. Por encima de 343°C hay rompimiento de uniones de azufre, lo que se evidencia por el desprendimiento del ácido sulfhídrico. Arriba de 399°C ocurren rompimientos de uniones c-c y a 490°C hay indicaciones de la formación de coque [Vercier, P. *et al;* Bunger, James *et al,* 1981].

Si una muestra de combustóleo se piroliza, en los vapores generados puede detectarse azufre y nitrógeno [Vercier, P. *et al*] (ambos clasificados como tipo I).

El residuo carbonoso aún contiene azufre y nitrógeno (tipo II).

Los elementos de segundo tipo se concentran selectivamente en los asfaltenos; su contenido y el de asfaltenos muestran una buena correlación.

Los elementos de tipo I se encuentran unidos a moléculas de pesos moleculares bajos que pueden destilar o romperse durante un tratamiento térmico, mientras que los de tipo II pertenecen a moléculas que tienden a coquizarse en la primera etapa.

Las moléculas de los residuos que contienen azufre son más propensas a destruirse por calentamiento que las que contienen nitrógeno. La presencia de azufre en los volátiles resultantes de la pirólisis se ha relacionado con moléculas de forma tiofénica en los asfaltenos originales [Vercier, P. *et al*].

De un análisis termogravimétrico realizado a una muestra de asfaltenos y maltenos (solubles en n-parafinas), se encontró que entre 25 y 1000°C con una velocidad de calentamiento de 5°/min, los asfaltenos empiezan a descomponerse a 200°C, alcanzando a 400°C la velocidad más alta de descomposición, la cual se completa aproximadamente a 600°C con la obtención de un residuo de 31% a 1000 °C [Strausz, O. P. *et al*].

La descomposición térmica de los maltenos se inicia a 100 °C debido a la evaporación y se completa aproximadamente a 570 °C con un remanente residual de 8% a 1000 °C.

En la obtención de los productos de descomposición de combustóleos (hidrocarburos de C_1-C_7, monóxido de carbono, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico), la presión tiene un marcado efecto en la distribución de productos. Una disminución de presión favorecerá la formación de etileno, propileno, propano, i-butano, butano y dióxido de carbono. La formación de hidrocarburos con átomos de carbón

La presencia de las resinas es la causa por la que los asfaltenos permanecen en "solución" o dispersos en el combustóleo. De hecho, es posible dispersar asfaltenos en su correspondiente fracción de aceite sólo con añadir resinas. Sin embargo, los asfaltenos se dispersarán en el aceite de otros crudos sólo si las resinas agregadas provienen de su propio crudo; si no es así, la dispersión será difícil.

C_5-C_7 decrece con la disminución de presión.

Sin embargo, la cantidad de metano y monóxido de carbono parece no ser afectada por la presión.

Se cree que la descomposición de algunos asfaltenos a temperaturas relativamente bajas (menores de 350°C), resulta de la eliminación de grupos situados en sitios periféricos.

La distribución de los productos de descomposición térmica de los asfaltenos varía a temperaturas por encima de 350°C. Por ejemplo, la generación de parafinas de C_1-C_4 se incrementa de un contenido de 81.5 m mol/100 g de asfaltenos a 185.5 m mol/100 g de asfaltenos a 400°C.

También el ácido sulfhídrico es un componente importante de los productos gaseosos, obteniéndose únicamente 5 m moles/100 g de asfaltenos a 300°C y 24.5 m moles/100 g de asfaltenos a 400°C [Strausz, O. P. *et al;* Moschopedis, S. *et al*].

Es también significativo que los productos gaseosos contienen proporciones substanciales de O_2 y de azufre que originalmente se encuentra en los asfaltenos.

La curva de descomposición o generación de compuestos durante un tratamiento térmico de muestras de asfaltenos muestra un punto de inflexión en el rango de 350-450°C, sugiriendo que ocurren dos procesos térmicos. A temperaturas menores de 350°C se eliminan los grupos situados en sitios periféricos, en tanto que a temperaturas mayores a 350°C ocurre la degradación térmica de la molécula de asfaltenos.

CUADRO 2
Análisis comparativo de combustóleo de Tula con los correspondientes asfaltenos en n-pentano y n-heptano.

Variable	*Análisis de combustóleo*	*Análisis de asfaltenos (n-pentano)*	*(n -heptano)*
Carbón % peso	84.2	84	82.9
Hidrógeno % peso	10.3	7.6	7.4
Nitrógeno % peso	0.43	0.92	0.79
Oxígeno % peso	0.35	0.63	1.81
Azufre % peso	4.61	6.78 (26 %)*	7.00(18 %)*
Vanadio ppm	271	1262 (82 %)*	1285 (56 %)*
Níquel ppm	34.6	182.6 (92 %)*	271 (94 %)*
Fierro ppm	4.9	4.7	16.0
Asfaltenos % peso		(17.5)	(12.0)
Relación H/C	1.46	1.08	1.12

* Porcentaje del contenido en el combustóleo.

CUADRO 3
Análisis comparativo de combustóleo de Salamanca con los correspondientes asfaltenos en n-pentano y n-heptano.

Variable	*Análisis de combustóleo*	*Análisis de asfaltenos (n-pentano)*	*(n -heptano)*
Carbón % peso	85.0	84.8	84.7
Hidrógeno % peso	10.5	7.9	7.7
Nitrógeno % peso	0.33	0.87	0.97
Oxígeno % peso	0.16	0.45	0.78
Azufre % peso	4.05	6.30 (22 %)*	5.76 (12 %)*
Vanadio ppm	150	1036 (97 %)*	1211 (70 %)*
Níquel ppm	23.0	145 (87 %)*	223 (82 %)*
Fierro ppm	4.5	7.7	30
Asfaltenos % peso		(14.0)	(8.6)
Relación H / C	1.47	1.12	1.09

* Porcentaje del contenido en el combustóleo.

Análisis elemental de los combustóleos y asfaltenos

Según algunos estudios, el 41.1% del nitrógeno de los combustóleos se encuentra en los asfaltenos, 37.1% en las resinas y 21.8% en los aceites [Vercier, P.].

El 31.8% de nitrógeno total se encuentra como tipo II.

El vanadio se ha encontrado en un 82% en los asfaltenos y 17.4% en las resinas. Para el níquel la distribución respectiva sería de 79% y 5.9%. La concentración de elementos del tipo II se incrementa en los asfaltenos obtenidos con solventes saturados, conforme se aumenta el número de átomos de carbón, indicando con ello que estos elementos se encuentran en moléculas de más altos pesos moleculares.

El alto contenido de N, V y Ni en los asfaltenos con respecto al combustóleo puede ser indicativo de la concentración de porfirinas.

Las porfirinas identificadas en combustóleos que se han reportado por algunos trabajos son de las fórmulas siguientes: $C_{20}H_{12}N_4VO$, $C_{23}H_{16}N_4VO_3$, $C_{22}H_{14}N_4VO$, $C_{20}H_{12}N_4Ni$ y $C_{22}H_{14}N_4Ni$ [Schweighardt, F. K.].

En los cuadros 2 y 3 se dan los resultados de un análisis elemental realizado en laboratorios del IIE a muestras de combustóleo procedente de dos refinerías, Tula y Salamanca, en cuyos resultados se ve básicamente la diferencia en los valores de asfaltenos en función del solvente parafínico utilizado y la concentración de metales en las fracciones asfalténicas obtenidas con n-pentano y con n-heptano.

Se observa, además, una relación H/C menor en las fracciones asfalténicas, lo que significa una mayor proporción de compuestos aromáticos y olefínicos que en el combustóleo respectivo. Esta relación resulta ser un parámetro importante para determinar tanto la naturaleza de los hidrocarburos que se estén manejando como su capacidad energética. Por ejemplo: la relación H/C en asfaltenos derivados de carbón mineral es aproximadamente 60% de la relación H/C de los asfaltenos derivados del petróleo.

Con base en resultados de estudios de espectroscopía de masas, puede asegurarse que por lo menos algunos de los heteroelementos (O,N,S) existen en los sistemas de anillos, lo que ha sido soportado por trabajos de descomposición térmica gradual de asfaltenos, donde se ha reportado que el N y el S no se desprenden en las primera etapas de calentamiento, en tanto que se elimina el O; esto es un gran soporte a la idea de que la estabilidad térmica de N y S se deba a que están integrados a los ciclos, pero el O no [Speight, T.].

Asfaltenos derivados de carbón mineral

Los asfaltenos derivados del carbón consisten de unidades de tres a diez anillos de compuestos heteroatómicos con 1, 2 o 3 de estas unidades por molécula [Aczel, T. *et al*].

Respecto al peso molecular de asfaltenos derivados del carbón se ha estimado de 400 a 600 unidades, en tanto que para los derivados del petróleo ha sido estimado entre 2600 y 8100 según algunos autores [Schweighardt, F. K., University of Southern California].

En lo que se refiere a la estructura molecular de los asfaltenos se han considerado algunas características: con el aumento del peso molecular se ha encontrado un incremento en la aromaticidad y en la proporción de heteroátomos.

Conclusiones

La presencia de las resinas es la causa por la que los asfaltenos permanecen en "solución" o dispersos en el combustóleo [Schweighardt, F. K]. De hecho, es posible dispersar asfaltenos en su correspondiente fracción de aceite sólo con añadir resinas. Sin embargo, los asfaltenos se dispersarán en el aceite de otros crudos sólo si las resinas agregadas provienen de su propio crudo; si no es así, la dispersión será difícil.

La cantidad de resinas requeridas para lograr la dispersión de asfaltenos está de acuerdo con la relación original asfaltenos/resinas encontrada en el crudo o hasta en una relación 10% menor.

El grado de aromaticidad y la proporción de heteroátomos en las resinas juegan un papel importante en su habilidad para mantener en solución a los asfaltenos.

Si las resinas agregadas tienen aromaticidad menor que las del mismo crudo de los asfaltenos, estos no se disolverán. Las resinas de igual aromaticidad pero con un mayor contenido de heteroátomos son mejores desde el punto de vista de disolución de asfaltenos.

Una oxidación moderada de los asfaltenos provoca una reducción en el peso molecular observado. También una hidrogenación o desulfuración tiene el mismo efecto, debido presumiblemente a una reducción de la interacción en la formación de puentes hidrógeno.

El poder disolvente del diluyente para mantener los asfaltenos en solución puede interpretarse de varias maneras: relación resinas/asfaltenos, contenido de heteroátomos, origen de los diluyentes con respecto a los asfaltenos, etcétera.

De las variables cuantificables de los combustóleos mexicanos, la que mayor cambios ha mostrado es la de contenido de asfaltenos, alcanzando máximos de 22%.

Se espera que el mejoramiento de los procesos de extracción y de refinación de crudos, impacte en forma negativa la calidad futura de los combustóleos.

Los consumidores de combustóleo deberán adecuar los diseños de sus equipos y sistemas de combustión tanto para minimizar su deterioro como para tener la capacidad de optimar las variables de combustión.

La calidad de los combustóleos puede mejorarse mediante procesos de hidrogenación que reducen el peso molecular y el contenido de azufre y de metales en los asfaltenos.

Agradecimientos

El autor quiere expresar un sincero reconocimiento al personal técnico del Laboratorio de Análisis de Combustibles, Francisco Ramírez G. y Víctor Sosa H. por su apoyo entusiasta durante el análisis de muestras. Así como a los becarios Ricardo R. Martínez M. y Olga Bonilla P.

Referencias

Aczel, Thomas, R. B. Williams, N. F. Chamberlain y H. E. Lumpkin, *Composition of asphaltenes from coal liquids,* Exxon Research and Engineering Company, Baytown, TX 77520. Bunger, James W., University of Utah, Li, Norman C., Duquesne University, *Chemistry of asphaltenes.*

Boduszński, Mieczyslaw M., *Asphaltenes in petroleum asphalts. Composition and formation,* Department of Petroleum and Coal Chemistry, Polish Academy of Sciences, 1-go Mojá 62,44-100 Gliwice, Polonia.

Bunger, James W. y Norman C. Li (1981), ``*Chemistry of asphaltenes*´´, University of Utah, Duquesne University, *Advances in Chemistry* Series 195, American Chemical Society, Washington, D. C, Estados Unidos.

EPRI P-5788 (1988), *Residual fuel oil quality: market trends and management options,* vol. 1, mayo, Estados Unidos.

Long, Robert B., *The concept of asphaltenes,* Exxon Research and Engineering Company, P. O. Box 45, 07036 Linden, N. J., Estados Unidos.

Longoria, R. y D. López (1993), "El incremento de asfaltenos en los combustóleos mexicanos y su repercusión en centrales termoeléctricas", XVI Congreso Internacional y Exposición Industrial de Calderas y Recipientes a Presión, octubre, León, Guanajuato, México.

Longoria, R., F. Ramírez y V. Sosa (1992), "Estudio de la contaminación ambiental en centrales termoeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad. Caracterización de combustóleos", IIE/3266/I 05/F, noviembre.

Longoria, R. y R. Martínez (1994), "Los combustóleos mexicanos y su contenido de asfaltenos", XXX Congreso Mexicano de Química, octubre, Cancún, Quintana Roo, México.

López, D. L. (1994), "Investigación sobre corrosión, carburización y ruptura de tubos de acero inoxidable en generadores de vapor. Tesis doctoral", Universidad Autónoma de México, Facultad de Química.

Parkash, Sat, Speros Meschopedis y James Speight (1979), *Physical properties and surface characteristics of asphaltenes,* Alberta Research Council, 11315-8th Avenue, Edmonton, T6G 2G2, Alberta, Canadá, Fuel, vol. 58, diciembre.

Podobaeva, T. P., M. G. González, A. A. Polyakova, L. O. Kogan y G.V. Vasilenko, *Determination of metal porphyrins in asphaltenes.*

Schmidt, Paul F., *Fuel oil manual,* Industrial Press Inc., 200 Madison Avenue, Nueva York, N.Y. 10016, Estados Unidos.

Schweighardt, F.K., *Air products and chemicals,* P. O. Box 538, PA 18105, Allentown.

Speight, James G., *On the molecular nature of petroleum asphaltenes,* Exxon Research and Engineering Company, P. O. Box 45 Linden, N.J. 07036, Estados Unidos.

Speros, E., Moschopedis, Sat Parkash y James G. Speight, *Thermal decomposition of asphaltenes.*

Strausz, O. P., N. Kamal y Douglas S. Montgmery, *Chemical composition of gases in athabosca bitumen and in low-temperature thermalysis of oil sand, asphaltene and maltene,* Hydrocarbon Research Center, Department of Chemistry, University of Alberta, T6G 2G2 Edmonton, Alberta, Canadá.

Structural differences between asphaltenes osolated from petroleum and from coal liquid, The Fu Yen, School of Engineering, University of Southern California, L. A. California, 90007, Estados Unidos.

Vercier, P., *Programmed pyrolysis, programmed combustion and specific nitrogen and sulfur detection. A new tool for studyng heavy ends of petroleum and butimens,* Research Center, Boite Portale 27, 26700 Harfuleur, Francia.

RIGOBERTO LONGORIA RAMÍREZ



Ingeniero químico graduado de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtuvo el grado de doctor en la Universidad de Aberdeen, Gran Bretaña, estando relacionado el trabajo de tesis doctoral con la determinación de mecanismos y velocidades de reacción de los nitratos de alkilo como contribuyentes a la formación de smog en los grandes centros urbanos. Trabajó cinco años en el Grupo Alfa de Monterrey, Nuevo León, como ingeniero de proceso y control de calidad en la producción de fibras sintéticas (poliéster, nilón, likra) recibiendo entrenamiento en varias plantas de Du Pont en los Estados Unidos. Ingresó al IIE en 1984 y de 1985 a 1996 ha sido coordinador de la especialidad de procesos químicos y el responsable del Laboratorio de Análisis de Combustible. Ha dirigido varios proyectos bajo contrato y de infraestructura relacionados con contaminación ambiental y el control químico del agua en centrales termoeléctricas. Es evaluador de laboratorios del Sistema Nacional de Laboratorios de Pruebas (Sinalp) de la DGN. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde 1989.

UIT: a la vanguardia de los servicios informativos

La Unidad de Información Tecnológica (UIT) del Instituto de Investigaciones Eléctricas, pone a disposición del público en general una estructura de información que se mantiene al día sobre los avances mundiales en las diferentes áreas del sector eléctrico.

Servicios que proporciona la UIT

Referencias: servicio de alerta y actualización en el que se contempla la información bimestral más completa en 15 temas técnicos.

Búsqueda bibliográfica: búsqueda de información en fuentes nacionales e internacionales sobre temas específicos solicitados por el usuario. La información se presenta de manera accesible, incluye citas bibliográficas y fotocopias de los documentos disponibles en el acervo de la UIT.

Pregunta-respuesta: proporciona a los interesados datos teóricos, estadísticos o de cualquier naturaleza técnica. La respuesta puede ser desde un dato específico hasta documentos completos.

La UIT cuenta con acceso a cerca de 600 bases de datos, convenios de intercambio con 98 centros de información, ocho colecciones de normas, catálogos y directorios de empresas y fabricantes, casi 47 mil monografías, cerca de 17 informes técnicos y 1,000 títulos de publicaciones periódicas, lo que la convierte en un completo y avanzado centro especializado a la vanguardia de los servicios informativos.

Para mayor información sobre costos y facilidades con que cuenta la UIT, se puede contactar a través de correo electrónico en:

INTERNET: UITEC@IIEVMS1.IIECUER.UNAM.MX

Por teléfono al (73) 18 38 11 y 18 24 60
Fax: (73) 18 24 61
o directamente en el Instituto de Investigaciones Eléctricas
Unidad de Información Tecnológica
Av. Reforma número 113, col. Palmira,
62490 Temixco, Morelos, México.

Modernización de los sistemas de control de la central termoeléctrica de ciclo combinado Gómez Palacio, Durango, parte I: aspectos generales

Marino Sánchez Parra, Raúl Garduño Ramírez, Guadalupe Madrigal Espinosa, Octavio Gómez Camargo y Rubén Gutiérrez Aguilar

Resumen

En este artículo se expone la problemática que dio origen al proyecto de modernización de los sistemas de control de la central de ciclo combinado Gómez Palacio (CCC-GP) en Durango. También se describe el proceso de ciclo combinado, los aspectos relevantes del sistema de control original de la planta y las características relevantes de los sistemas de control digital desarrollados en el Departamento de Instrumentación y Control del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para las turbinas de gas, la turbina de vapor y los recuperadores de calor.

Introducción

La central de ciclo combinado localizada en la zona industrial del municipio de Gómez Palacio, Durango, consiste de dos turbinas de gas W-501 de 65 MW cada una, dos recuperadores de calor-generadores de vapor y una turbina de vapor con capacidad nominal de generación de 110 MW con un condensador.

Debido a problemas de obsolescencia del equipo de control, llamado sistema PACE 260, que se manifestaba de varias formas (baja confiabilidad de arranques de turbinas, mantenimiento correctivo frecuente, etc.) y a la falta de partes de repuesto que ocasionaban poca disponibilidad y baja eficiencia con la consecuente disminución de la energía generada, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) decidió cambiar el equipo de control original de la central [Hernández, R. *et al,* 1990] sustituyéndolo por un Sistema de Control Distribuido (Sicodi) [Chávez Trujillo, R. *et al,* 1993] a fin de contar con una mayor automatización de la operación, que requirió del desarrollo de sistemas de control digital para controlar, supervisar y en su caso activar las protecciones del proceso que a continuación se describe, conservando las estrategias de control originalmente diseñadas para la operación óptima de la planta.

Durante el periodo febrero-marzo de 1993 se retiró el equipo del sistema PACE y en su lugar se instaló el equipo suministrado por el IIE habiéndose procedido a la puesta en servicio de los sistemas de control digital total desarrollados para las turbinas de gas, la turbina de vapor, los recuperadores de calor-generadores de vapor y el sistema de condensados. A partir del periodo mencionado, el Sicodi gradualmente fue evolucionando hasta la fecha actual en la que se ha logrado integrar en su totalidad las diversas funciones que lo componen, como se describe en el texto del artículo.

El proceso de ciclo combinado

La central de ciclo combinado de Gómez Palacio, Durango recibe este nombre debido a que transforma la energía calorífica del gas combustible a energía eléctrica mediante el empleo de dos ciclos termodinámicos, el Brayton y el Rankine. En esta central se conjugan ambos ciclos para obtener mayor eficiencia en el proceso de transformación de energía.

El proceso completo consiste en generar energía por medio de dos turbinas de gas (TG) y una de vapor (TV). Las dos turbinas de gas son idénticas, por lo que procederemos a describir el proceso para una de ellas. La energía calorífica del gas se convierte a energía térmica mediante la combustión que se realiza en la cámara de combustión, esto es una reacción química entre el oxígeno del aire que inyecta el compresor y el gas; los gases producto de esta combustión pasan a la turbina, haciéndola girar a 3600 rpm, la flecha de esta se encuentra acoplada a la del generador para producir la energía eléctrica.

El gas que sale de la turbina de gas conserva un alto contenido de energía calorífica que ya no se puede aprovechar en la turbina; con el fin de que no se pierda, el gas se hace pasar por un sistema de recuperación de energía en donde el

La central de ciclo combinado localizada en la zona industrial del municipio de Gómez Palacio, Durango, consiste de dos turbinas de gas W501 de 65 MW cada una, dos recuperadores de calor-generadores de vapor y una turbina de vapor con capacidad nominal de generación de 110 MW con un condensador.

MX9800198

Refrigeración industrial por absorción/ compresión

Ramón Ayala Delgado y Christopher L. Heard

En México se estima que se desperdicia el 50% de los alimentos debido a la falta de refrigeración en los centros productores y al deficiente sistema de distribución, así como al clima cálido de nuestro país. Por otro lado, México ocupa el tercer lugar mundial en la producción de energía eléctrica a partir del calor geotérmico, pero no existe ninguna aplicación directa para utilizarlo. Las causas por las cuales en la República no hay aplicaciones directas se deben principalmente a la legislación que hasta hace un par de años solamente permitía que la Comisión Federal de Electricidad explotara estos recursos; con los cambios en la legislación, actualmente existen algunos proyectos para que la iniciativa privada pueda aprovecharla. Las aplicaciones directas por su misma naturaleza serían específicas y con el ahorro del consumo de energía eléctrica al usar la energía geotérmica directamente, se diversificarían las inversiones en el sector, que en este caso serían por parte del usuario.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha experimentado con unidades piloto de refrigeración por absorción a partir de la energía geotérmica usando amoníaco como refrigerante. En los estudios se han desarrollado varios prototipos con buenos resultados, adquiriéndose experiencia en el diseño, instalación y evaluación de estas unidades con tecnología mexicana. Este tipo de refrigeradores ayudarían a cubrir la necesidad de refrigeración usando la energía geotérmica o de desecho en nuestro país.

Refrigeración por absorción

Un refrigerador por absorción consume menos del 10% de energía eléctrica que consumiría un refrigerador por compresión mecánica de vapor similar; el resto de la energía es térmica. Dicha energía térmica puede ser vapor de desecho, combustibles fósiles, nuclear, geotérmica o solar. Esto hace que este tipo de refrigeración tenga una amplia gama de aplicaciones, pero es muy importante considerar qué nivel de temperatura del calor se necesita para operar dichos sistemas, además de su eficiencia global.

El sistema de refrigeración por absorción más conocido por su mayor uso es el sistema bromuro de litio/agua ($LiBr/H_2O$), el cual se emplea para aire acondicionado con temperatura de lado frío de 5°C. Sin embargo, para refrigeración industrial se requieren temperaturas menores a 0°C, lo cual hace viable al sistema amoníaco/agua (NH_3/H_2O). Este sistema no ha sido utilizado en forma generalizada por su baja eficiencia y su alto costo de inversión. Debido al contenido de vapor de agua en la corriente del condensador, es riesgoso combinarlo con sistemas de compresión. Otra opción que actualmente se encuentra disponible es un desarrollo tecnológico del IIE; se trata de refrigeración por absorción usando amoníaco/nitrato de litio ($NH_3/LiNO_3$), el cual ha demostrado tener un coeficiente de comportamiento mayor que el del sistema NH_3/H_2O y costos de inversión menores [Best, R. *et al,* 1986 y 1990; Ayala, R. 1992 y 1995; Heard, C. L. *et al,* 1995]. Una de las grandes ventajas de este sistema es el no tener agua y producir amoníaco al 100% en el condensador, permitiendo combinar estos sistemas con los de compresión mecánica de amoníaco sin complicaciones. El hecho de combinar tales sistemas de absorción con compresión genera la posibilidad de tener un sistema de absorción/compresión (híbrido), que pueden operar con energía eléctrica y/o calorífica.

Refrigeración por absorción/ compresión (híbrido)

Un sistema de refrigeración híbrido es el que puede funcionar por los dos tipos de ciclos termodinámicos en proporciones variables dependiendo de la aplicación específica, buscando algunas ventajas de operación y eficiencia energética. Existen dos modos para operar un sistema híbrido. La primera es tener un compresor de capacidad moderada con el fin de mejorar un sistema de absorción y poder manejar presiones de evaporación menores que los que podría dar un sistema de absorción normal. La segunda es utilizar un sistema de absorción para incrementar la eficiencia de un sistema de compresión grande, es decir, utilizar el calor de sobrecalentamiento del refrigerante a la salida del compresor como fuente de calor para operar el sistema de absorción.

En México se estima que se desperdicia el 50% de los alimentos debido a la falta de refrigeración en los centros productores y al deficiente sistema de distribución, así como al clima cálido de nuestro país.

Historia de los sistemas por absorción/compresión

Los sistemas híbridos fueron inventados desde hace 100 años [Osenbrück, A., 1895], pero hasta hace unas dos décadas se ha continuado con la investigación de dichos sistemas, debido a las tendencias de

eficiencia energética mundiales y a la utilización de refrigerantes que no destruyen la capa de ozono [Groll, E. A. *et al,* 1993].

Un sistema de compresión de vapor normal está constituido por dos intercambiadores de calor, un condensador, un evaporador, el compresor y la válvula de expansión. El sistema de absorción, además de lo anterior, cuenta con un circuito extra donde circula una solución que absorbe el refrigerante. Este circuito está formado por el generador, absorbedor, economizador, bomba de solución y una válvula de expansión.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha experimentado con unidades piloto de refrigeración por absorción a partir de la energía geotérmica usando amoníaco como refrigerante.

Un sistema híbrido simple se puede ver en la figura 1, donde se muestra la integración del compresor a un sistema de absorción en un diagrama presión/temperatura. La succión del compresor puede ser del absorbedor en la sección donde sólo absorba refrigerante o directamente a la salida del evaporador, con la finalidad de mantener baja la presión en el evaporador, lo que dependerá de las condiciones de operación del sistema. La figura 2 muestra un diagrama esquemático con más detalles del sistema desarrollado en el IIE con la inclusión de un compresor.

Estado actual de la refrigeración por absorción con $NH_3/LiNO_3$ y los sistemas híbridos

El IIE desarrolló el primer prototipo de refrigeración por absorción con $NH_3/LiNO_3$ en el mundo, utilizando energía geotérmica de baja temperatura como fuente de calor. Conjuntamente con la empresa mexicana LAJ Internacional, se completó un estudio económico analizando los costos de los intercambiadores que esta empresa fabrica, resultando que existe una

FIGURA 1
Diagrama presión temperatura de un sistema híbrido.

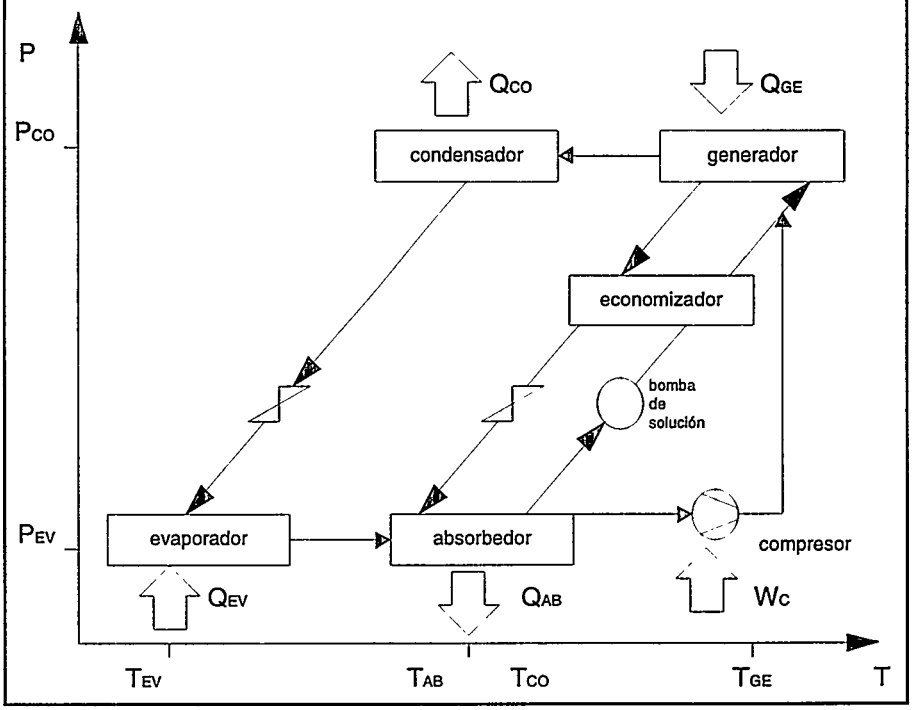
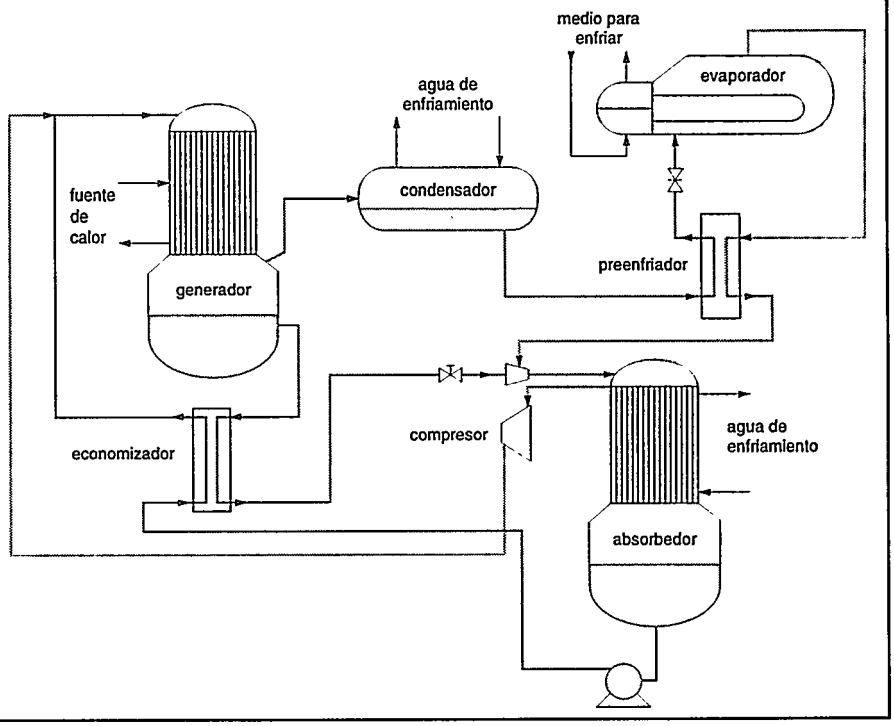


FIGURA 2
Diagrama esquemático de un refrigerador por absorción/compresión usando $NH_3/LiNO_3$.



ventaja económica al usar también calor de desecho. Inclusive en algunos casos en que se quema combustible, es económicamente más rentable que unidades de compresión. Con base en este estudio, el IIE concretó un contrato de transferencia de tecnología con dicha empresa para la comercialización de los sistemas de refrigeración por absorción usando $NH_3/LiNO_3$; este contrato permite que la empresa privada promueva unidades en el mercado nacional. Actualmente está en desarrollo el estudio experimental para la evaluación del primer sistema híbrido utilizando $NH_3/LiNO_3$ con capacidad de una tonelada de refrigeración, que según el modelo teórico incrementará la capacidad y la eficiencia con la inclusión del compresor.

Un refrigerador por absorción consume menos del 10% de energía eléctrica que consumiría un refrigerador por compresión mecánica de vapor similar; el resto de la energía es térmica.

Es importante mencionar que la eficiencia de un sistema híbrido se calcula mediante el coeficiente de comportamiento para enfriamiento (COP) que se define por la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{Q_{EV}}{(Q_{GE} + W_{co})}$$

donde el Q_{EV} es el calor removido en el evaporador, el Q_{GE}, es el calor suministrado al generador y W_{CO} la energía eléctrica suministrada al compresor. En esta ecuación se involucran las dos fuentes de energía para hacer funcionar al refrigerador; en esta etapa, el IIE se encuentra estudiando experimentalmente los efectos en la eficiencia al variar las proporciones de las dos fuentes de energía.

Futuro de la refrigeración por absorción/compresión

Existen grandes oportunidades para la aplicación de tal tecnología en México debido a la falta de refrigeración industrial y a la necesidad de sustituir compresores en algunas empresas en las que tienen hasta 20 años de uso, pero dada la actual situación económica es difícil que en el corto plazo se utilicen ampliamente. Por otro lado, con la posibilidad de usar energía eléctrica o térmica para estos sistemas, existen plantas en las cuales es muy ventajoso su uso, ya que permitiría utilizar cualquiera de las dos fuentes de energía mediante un análisis económico por costos horarios o por disponibilidad. Asimismo, los resultados en la evaluación del primer sistema híbrido y los planes a corto plazo del IIE junto con LAJ de tener una unidad de demostración portátil funcionado, ayudará a que esta tecnología se transfiera al sistema productivo nacional lo más pronto posible.

Referencias

Ayala, R. (1992), *An experimental study of heat driven absorption cooling systems,* Ms. Sc. Thesis, University of Salford, Inglaterra.

Ayala, R. (1995), *An experimental study of heat driven absorption cooling systems,* Ph. D. Thesis, University of Salford, Inglaterra.

Best, R., C. L. Heard, H. Fernández y J. Siqueiros (1986), *Developments in geothermal energy in Mexico-part five: the commissioning of an ammonia/water absorption cooler operating on low enthalpy geothermal energy,* J. Heat Recovery Systems, 6, 3, 209216.

Best, R., C. L. Heard, P. Peña, H. Fernández y F. A. Holland (1990), *Developments in geothermal energy in Mexico-part twenty six: experimental assessment of an ammonia/water absorption cooler operating on low enthalpy geothermal energy,* J. Heat Recovery Systems & CHP, 10, 1, 61-70.

Groll, E. A. y R. Radermacher (1993), *Vapor compression heat pump with solution circuit and desorber/absorber heat exchange,* International Absorption Heat Pump Conference AES-vol. 31, pp. 463-469.

Heard, C. L., J. Pardubiki y R. Ayala (1995), "Comparación de costos de un sistema de compresión contra uno de absorción", Informe interno, en prensa.

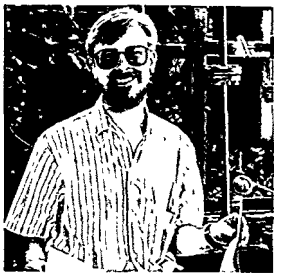
Osenbrück, A. (1895), *Verfahren zur kälteerzeugung bei Absorptionsmaschinen,* Patente Alemana DRP 84084.

RAMÓN AYALA DELGADO



Ingeniero químico con mención honorífica de la Universidad Autónoma de Guadalajara (1980-1984), cursó su maestría y doctorado en la Universidad de Salford, Reino Unido, en refrigeración por absorción (1990-1995). Ha sido catedrático en la Universidad Autónoma de Guadalajara, Facultad de Ciencias Químicas, y en la Universidad Autónoma de Baja California, Extensión Universitaria. Se incorporó como investigador al IIE desde 1986; de 1986 a 1993, trabajó en el Centro Cerro Prieto donde colaboró en proyectos bajo contrato con el EPRI; a partir de 1993 se incorporó al Departamento de Geotermia en el área de aprovechamiento integral. Su labor en los últimos años se ha enfocado específicamente al desarrollo de sistemas de refrigeración por absorción para la utilización de calor geotérmico en usos directos. Es autor de varios artículos técnicos nacionales e internacionales sobre transferencia de calor y refrigeración por absorción usando energía geotérmica o de desecho.

CHRISTOPHER LIONEL HEARD



Licenciado en estudios de la energía por la Universidad de Sheffield (1976-1979) en donde obtuvo también su doctorado en ingeniería del medio ambiente en edificios (1979-1983). Ha publicado diversos artículos en revistas internacionales con arbritraje y presentado trabajos en conferencias nacionales e internacionales. Ha sido asesor de tesis de licenciatura, maestría y doctorado. En 1983 se incorpora al IIE como investigador del Departamento de Geotermia. Entre sus actividades actuales destaca el desarrollo y diseño para uso industrial de un refrigerador por absorción/compresión de amoníaco/nitrato de litio piloto. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde 1987.

Nuevas tecnologías para el sector eléctrico del siglo XXI

Conferecia impartida por Narain G. Hingorani* durante el coloquio *Nuevas tecnologías para el sector eléctrico del siglo XXI,* realizado con motivo del 20 aniversario del IIE.

Temas

Alrededor del mundo la industria se está transformando. Cada país cambia a su manera, pero la dirección general es clara: privatización, competitividad y desregulación. Este es el resultado de dos perspectivas: 1) reconocimiento de que los monopolios de la electricidad regulados han conducido al más alto costo de la electricidad y 2) la carencia de recursos gubernamentales suficientes para proveer infraestructura.

Conjuntamente con la privatización viene la tendencia hacia la relativamente pequeña generación distribuida en donde la subtransmisión radial y la distribución tradicionales no se utilizarán mucho para conectarse a la pequeña generación.

La desregulación y privatización llegan con sus numerosas oportunidades de alianzas en negocios relacionados con la manufactura, contratistas de servicio, compañías de comunicación, de gas, de agua, agencias de suministro de energía, etcétera.

La competencia también trae consigo un enfoque hacia el cliente; muchos consumidores, industriales y comerciales, necesitan más potencia confiable. En muchos países es difícil y costoso conseguir nuevos derechos de vía para transmisión.

* Presidente de Power Electronics Inc., Estados Unidos.

Tecnologías

Creo que, para la planeación estratégica de investigación y desarrollo, las tecnologías son igualmente importantes, si no es que más, que los temas, puesto que tarde o temprano afectarán a la sociedad independientemente de los propios temas. Es por esto que es valioso sintetizar y seleccionar primeramente las tecnologías relevantes para armar estrategias sustentables de investigación y desarrollo y posteriormente usar los temas para delinear permanentemente el camino al éxito y el nivel de financiamiento para esas tecnologías.

La electrónica de potencia jugará un papel esencial en todos los aspectos de la electricidad incluyendo pequeña generación (fotovoltaica, viento, celdas de combustible, hidroeléctricas de velocidad variable); transmisión (corriente directa en alto voltaje y sistemas flexibles de transmisión AC {FACTS}); distribución (potencia a la medida para cumplir con las necesidades futuras de los consumidores industriales y comerciales), y uso final. La electrónica de potencia es una tecnología base capaz de incrementar el valor de la energía eléctrica en el siglo XXI (cuadro 1).

Muchos consumidores, industriales y comerciales, necesitan más potencia confiable. En muchos países es difícil y costoso conseguir nuevos derechos de vía para transmisión.

Específicamente, México necesitaría corriente directa en alta tensión para conectarse con los Estados Unidos, pero por el alto costo, es improbable que sea redituable para las

CUADRO 1

Temas de transmisión y distribución.

- Cambios en la industria/privatización/competencia.
- Oportunidades de acceso a energía de menor costo.
- Cabida a la pequeña generación distribuida.
- Oportunidad de alianzas.
- Enfoque hacia el cliente.
- Confiabilidad en el suministro de energía.
- Dificultades para acceder a nuevos derechos de vía.
- Sistemas avanzados de transmisión y distribución.
- Corriente directa en alto voltaje (HVDC).
- Sistemas flexibles de transmisión AC.
- Potencia a la medida.
- Almacenamiento de energía y adaptación del sistema.
- Adaptación a la generación distribuida.
- Sistemas de información.
- Automatización de la distribución.
- Relevadores de protección digitales.
- Centro de control avanzado.
- Mantenimiento centrado en la confiabilidad.
- Mantenimiento predictivo.
- Apartarrayos de óxido de zinc.
- Protecciones contra descargas atmosféricas.
- Transformador de acero amorfo.
- Aisladores no cerámicos.
- Cables e instalaciones subterráneas.

MX9800140

viene de la página 120

asignar el uso recurrente de los recursos del sistema a cada una de las diferentes tareas de la aplicación durante periodos predefinidos y resuelve las situaciones de conflicto entre tareas con base en un esquema de prioridades de ejecución. El *software* de la aplicación es el conjunto de programas que realizan las funciones utilitarias del controlador; se consideran agrupadas conforme a su objetivo funcional: adquisición de señales del proceso, evaluación de algoritmos de control, envío de señales al proceso, comunicaciones, diagnósticos del sistema y tolerancia a fallas [Ramírez, C. *et al,* 1995]. La base de datos está formada por un conjunto de tablas y archivos de datos que contienen toda la información empleada por el sistema operativo y el *software* de aplicación.

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 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 se manejan por las distintas aplicaciones del sistema. Se tienen los siguientes tipos: entradas analógicas (EA), salidas analógicas (SA), internas analógicas (IA), constantes (CTE), entradas lógicas (EL), salidas lógicas (SL)e internas lógicas (IL). Cada tipo tiene diversos atributos (ver cuadro), cuyos valores se consignan como elementos de arreglos predefinidos y se declaran e inicializan en diferentes archivos (ver cuadro 1).

CUADRO 1

Atributo	*EA*	*SA*	*IA*	*CTE*
Valor U I	valor Uning[]	tabsal_flo[]	analog_int[]	constan[]
Valor sup.	varsu_ent[]	varsu_sal[]	varsu_int[]	varsu_cons[]
Valor inf.	varin_ent[]	varin_sal[]	varin_int[]	varin_cons[]
Ptje var.	porcent_ent[]	porcent_sal[]	porcent_int[]	porcent_cons[]
Arch. inic.	TG_ANAS.C	TG_ANAS.C	TG_ANAS.C	TG_CONS.C
Arch. decl.	VARDEC1.C	VARDEC1.C	VARDEC1.C	VARDEC1.C

Atributo	*EL*	*SL*	*IL*
Estado	tab_ent[]	tab_sal[]	tab_in[]
Arch. Inic.	TG_LOGS.C	TG_LOGS.C	TG_LOGS.C
Arch. Decl.	VARDEC1.C	VARDEC1.C	VARDEC1.C

Organización del software *en lazos de control.*

Lazo de velocidad/carga.
Lazo de IGV.
Lazo de temperatura.

Conclusiones

Un análisis retrospectivo de la modernización del sistema de control muestra que los retos tecnológicos más relevantes fueron la integración e instalación del equipo, el diseño de una estrategia global y unificada de automatización, control y protección, y el desarrollo de la programación del sistema. Se considera importante resaltar la importancia del desarrollo de la programación. Dada la madurez actual del *hardware,* puede considerarse en gran medida que el desarrollo del sistema de control digital es básicamente el desarrollo de un sistema de *software* en tiempo real, hecho a la medida, y con requerimientos estrictos de seguridad. Su realización constituye otro proyecto completo por sí mismo, en donde los conceptos dominantes son del campo de la ingeniería de *software.*

Referencias

"Control analógico de turbinas de gas", diagramas funcionales y esquemáticos, 7363D02/03/04/05/06/07/08/09/10/11/12/19/20/22, Westinghouse Electric Corporation.

Delgadillo Valencia, M. A. (1990), "Modernización del control digital para las turbinas de gas de la central de ciclo combinado Dos Bocas, Veracruz", IIE-Departamento de Instrumentación y Control, informe interno.

Digital Control System, volume 7, gas turbines, Westinghouse Electric Corporation.

Garduño Ramírez, R. (1994), "Protocolo de pruebas de aceptación del CDT para las turbinas de gas de la CCC Gómez Palacio, Durango", IIE Departamento de Instrumentación y Control.

Garduño Ramírez, R. y M. Sánchez Parra (1995), *Control system modernization: turbogas unit case study,* IFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems, diciembre, Cancún, Quintana Roo, México, volumen II, POWER PLANTS, pp. 245-250.

Madrigal Espinosa, G. (1991), "Diseño digital del sistema de control analógico de las turbinas de gas de la CCC Gómez Palacio, Durango", Informe interno IIE, Departamento de Instrumentación y Control.

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

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

Uram, Robert (1977), *Computer control in a combined cycle power plant, part II: the digital gas turbine system,* IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y., del 30 de enero al 4 de febrero.

RAÚL GARDUÑO RAMÍREZ

Ver curriculum en el Boletín IIE *marzo/abril de 1996, página 93.*

GUADALUPE MADRIGAL ESPINOSA

Ver curriculum en el Boletín IIE *marzo/abril de 1996, página 93.*

MARINO SÁNCHEZ PARRA

Ver curriculum en el Boletín IIE *marzo/abril de 1996, página 92.*

Alternativas de solución al problema de contaminación en aisladores

José Luis Fierro Chávez

Resumen

De acuerdo con estadísticas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) la contaminación del aislamiento está catalogada como la segunda causa de salidas de las líneas de transmisión. En este artículo se presenta una revisión de las diferentes alternativas disponibles para solucionar o disminuir este problema. La aplicación de estas alternativas debe hacerse dentro de un marco técnico-económico y de costo-beneficio.

Introducción

Los problemas de contaminación en aisladores eléctricos ocurren cuando el medio que los rodea lleva diversas sustancias, especialmente salinas e industriales. Estas sustancias se depositan sobre los aisladores creando una capa que en condiciones secas no causan mayores problemas, pero ante la presencia de humedad, rocío, neblina o lluvia ligera, reducen sus características dieléctricas, lo cual puede llegar a causar fallas en el sistema.

En todo el mundo se han realizado diferentes investigaciones acerca del proceso de flameo por contaminación en aisladores y se han llevado a la práctica diferentes alternativas para combatir este problema en líneas y subestaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Estas alternativas pueden variar dependiendo por una parte del tipo y cantidad de contaminante depositado en el aislamiento y por otra en la factibilidad de su aplicación.

Proceso de flameo en aisladores contaminados

El flameo de los aisladores debido a la contaminación es un fenómeno dinámico que se presenta en varias etapas. Aunque este proceso ha sido presentado en muchas publicaciones, las etapas principales del fenómeno se presentan a continuación en forma resumida y en forma esquemática en la figura 1.

a) Sobre la superficie del aislamiento expuesto al medio ambiente se deposita una capa de partículas contaminantes. La formación de esta capa depende principalmente del tamaño de las partículas y su composición, las fuerzas que se ejercen sobre las partículas, el acabado superficial y el perfil del aislamiento, por lo que la capa no es homogénea.

b) Se presenta un proceso de humectación de la capa contaminante dado por niebla, rocío o lluvia ligera.

c) Cuando la contaminación está húmeda, empieza a circular una corriente sobre la capa, cuya magnitud depende de la conductividad del contaminante húmedo.

d) La circulación de corriente genera una disipación de calor por efecto Joule, lo cual se manifiesta por la evaporación de la humedad. La evaporación se incrementa en las zonas de mayor densidad de corriente.

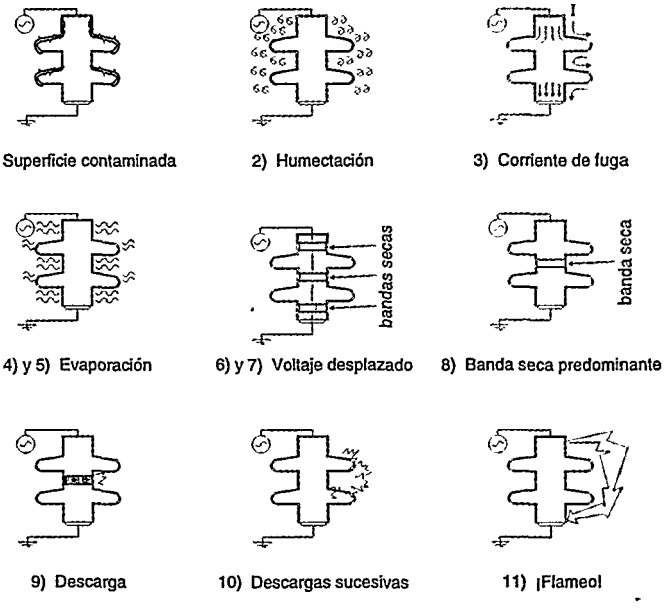
e) Se forman zonas o bandas secas de alta resistencia eléctrica en donde hubo mayor evaporación de humedad.

f) El voltaje aplicado en las terminales del aislamiento se desplaza y concentra en los extremos de las bandas secas causando elevados gradientes de voltaje.

g) Se generan descargas eléctricas en la bandas secas debido al esfuerzo eléctrico concentrado en las mismas. Estas descargas implican picos de corriente que pueden mantener o provocar la formación de otras bandas secas, en las cuales también se presentan descargas.

h) Cuando las descargas llegan a encadenarse se presenta la falla de fase a tierra causando la salida de la línea.

FIGURA 1
Mecanismo de flameo en un aislador contaminado.



En general, la evaluación del efecto de la contaminación en el voltaje de flameo de los aisladores puede realizarse mediante alguno de los métodos normalizados de laboratorio o a través de mediciones en campo tanto en líneas operativas como en estaciones de prueba. Sin embargo, los resultados obtenidos en laboratorio y en campo muestran que no existe una solución única o generalizada al problema de contaminación del aislamiento, debido principalmente a los diversos tipos y niveles de contaminantes encontrados en diferentes lugares.

Los problemas de contaminación en aisladores eléctricos ocurren cuando el medio que los rodea lleva diversas sustancias, especialmente salinas e industriales. Estas sustancias se depositan sobre los aisladores creando una capa que en condiciones secas no causan mayores problemas, pero ante la presencia de humedad, rocío, neblina o lluvia ligera, reducen sus características dieléctricas, lo cual puede llegar a causar fallas en el sistema.

Alternativas consideradas en el mundo

Las alternativas de solución al problema de contaminación en aislamientos se pueden analizar desde dos puntos de vista:

- Materiales y diseño.
- Mantenimiento.

Materiales y diseño

El diseño de aisladores para uso en ambiente contaminado se ha basado en las propiedades de los materiales usados y en el conocimiento y la experiencia ganados sobre la vida de la industria eléctrica.

Porcelana y vidrio

El uso de porcelana y vidrio como materiales aislantes ha tenido efectos positivos y negativos en el diseño de los aisladores para áreas contaminadas. La capacidad del aislador para soportar descargas superficiales locales ha permitido la tolerancia de corrientes de fuga de muy alta magnitud. A través de la experiencia en campo, se ha demostrado que las cintilaciones y el arqueo localizado no causan peligro al material del aislador aunque la presencia de descargas eléctricas superficiales generadas por el fenómeno de formación de bandas secas puede resultar en problemas tales como radiointerferencia y flameo.

Por otra parte, el uso de porcelana y vidrio como material aislante ha limitado la cantidad de distancia de fuga, la cual puede utilizarse eficientemente por unidad de longitud del aislador, debido a la dificultad encontrada en el proceso de fabricación del aislador. Al ser la distancia de fuga el único parámetro importante para un aislador en condiciones contaminadas, las limitaciones de estos materiales han tenido una severa restricción. Para superar esto, muchos diseños han evolucionado con el paso del tiempo teniéndose actualmente varios diseños para aplicaciones especiales como se muestra en la figura 2.

Existen localidades donde la contaminación es tan fuerte que requiere medidas heroicas a fin de mantener la continuidad en el servicio. En estas áreas se han utilizado distancias de fuga del orden de 6 cm/kV (voltaje de línea a tierra). En la gran mayoría de los casos, esta práctica se realiza en las subestaciones y, consecuentemente, se ha tenido que aumentar la longitud total del aislamiento a fin de obtener la distancia de fuga específica requerida. En otros casos, el uso de aisladores con muy alta distancia de fuga por unidad de longitud del aislador ha sido muy ventajoso. En la figura 3 se muestra una comparación entre los voltajes de flameo de aisladores estándar, tanto en posición vertical como en ``V´´, y aisladores con gran distancia de fuga [Holte *et al*, 1977].

Aisladores sintéticos

En los años sesenta se inició la investigación y el desarrollo en varias partes del mundo sobre aisladores poliméricos, tomando la ventaja de varias propiedades de los polímeros:

FIGURA 2

Perfil de diferentes tipos de aisladores (A) aislador estándar, (B) aislador niebla de vidrio de 11" de diámetro, (C) aislador niebla de porcelana de 11.5" de diámetro, (D) aislador superniebla de 12.6" de diámetro, (E) aislador aerodinámico.

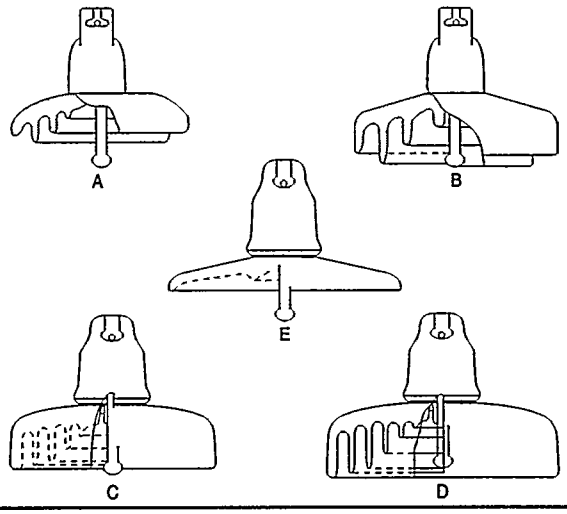


FIGURA 3
Voltaje de flameo de aisladores con diferente distancia de fuga.

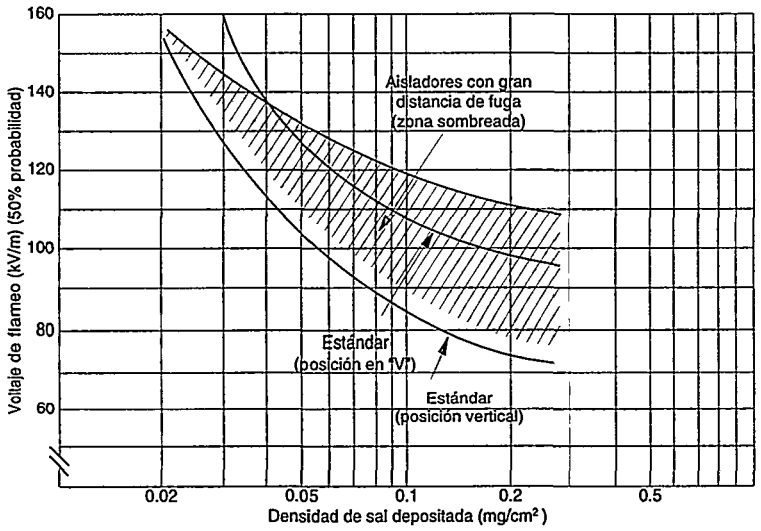
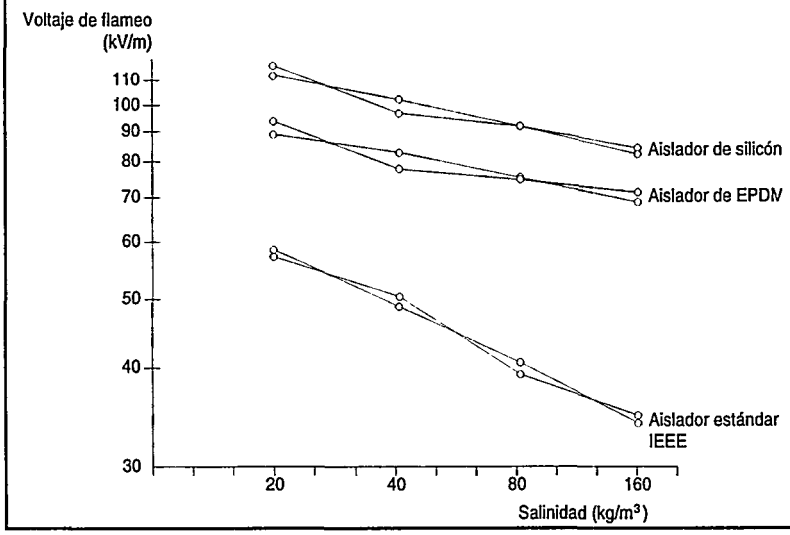


FIGURA 4
Resultados en cámara de niebla salina.



peso ligero, buen comportamiento en contaminación, facilidad de manejo e instalación, mayor resistencia al vandalismo, alta resistencia mecánica en relación con el peso, etcétera.

Durante la primera aplicación de estos aisladores surgió un sinnúmero de preguntas respecto a su comportamiento, las cuales no pudieron contestarse debido a la falta de experiencia. Después de más de 30 años de pruebas continuas y experiencia en campo, se ha logrado una posición más sólida y en la actualidad se tienen varias tecnologías muy maduras. Durante este tiempo, la experiencia en el mercado ha mostrado el desarrollo de estos aisladores en tres áreas principales: aisladores de suspensión (transmisión), aisladores para distribución y aisladores tipo poste para línea.

El nivel de contaminación que se deposita en un aislador depende de la cantidad y tipo de contaminante, así como de las propiedades superficiales y su diseño. Una de las principales propiedades de los aisladores sintéticos es la hidrofobicidad superficial, la cual tiene un efecto importante en su comportamiento. En una superficie hidrofóbica el agua forma gotas y no permite la humectación total de la superficie. Esto reduce la corriente de fuga y la probabilidad de formación de bandas secas, lo cual lleva a una vida mayor del aislador y a un mejor comportamiento en contaminación comparado con el aislamiento de vidrio y porcelana. En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos al evaluar en laboratorio dos aisladores sintéticos en cámara de niebla salina (A= silicón, B=EPDM), los cuales estuvieron operando por un periodo de cuatro años en una estación de prueba en Inglaterra (envejecidos), y son comparados con el aislador estándar IEEE de porcelana. Los resultados obtenidos en campo mostraron que aunque existió una disminución de sus propiedades dieléctricas (voltaje de flameo) respecto a su condición nueva, aún mantienen valores de flameo superiores al de porcelana [Houlgate, 1992].

En general, la evaluación del efecto de la contaminación en el voltaje de flameo de los aisladores puede realizarse mediante alguno de los métodos normalizados de laboratorio o a través de mediciones en campo tanto en líneas operativas como en estaciones de prueba.

Asimismo, algunos experimentos han mostrado que las descargas superficiales y corona destruyen la hidrofobicidad superficial. Sin embargo, después de algunas horas de no presentarse descargas, la superficie recupera su hidrofobicidad [Karady *et al*, 1994].

Compuestos de grasa y recubrimientos hidrofóbicos

El comportamiento de los aisladores en un ambiente contaminado puede mejorarse considerablemente me-

diante el uso de recubrimientos hidrofóbicos, principalmente a base de silicón, ya sea en forma de grasa o de película, aplicados sobre el aislamiento convencional. Esta práctica se ha utilizado satisfactoriamente como un medio de prevención del flameo por contaminación durante más de 30 años. El tipo de aplicación es relativamente caro y requiere de mantenimiento periódico para remover y volver a aplicar. La frecuencia con que se realiza el recubrimiento puede variar entre varios meses y algunos años, dependiendo del tipo y nivel de contaminación y de las condiciones ambientales. En la actualidad la utilización de grasas ha sido remplazada prácticamente por la aplicación de películas.

Las alternativas de solución al problema de contaminación en aislamientos se pueden analizar desde dos puntos de vista: materiales y diseño, y mantenimiento.

Mantenimiento

En muchos casos, el diseño adecuado del aislamiento reduce las salidas causadas por contaminación. Sin embargo, en áreas con contaminación severa o baja incidencia de lluvias, se requiere del mantenimiento de los aisladores [Ham, 1992; Contreras, 1992]. El mantenimiento normalmente toma alguna de las siguientes formas:

- Lavado periódico, ya sea en línea energizada o desenergizada.
- Limpieza manual periódica en aisladores desenergizados.
- Limpieza periódica en seco con material abrasivo tanto en línea energizada como desenergizada.
- Recubrimiento periódico con compuestos de grasa de silicón e hidrocarburos y película de hule de silicón en línea energizada o desenergizada.

La clase y cantidad de limpieza o engrasado dependen del tipo de aislador y de las condiciones de contaminación ambiental. El usuario debe confirmar la aplicabilidad y seguridad del método mediante experimentación en campo. Desafortunadamente, los costos asociados con estos procedimientos son elevados.

Lavado del aislador

El lavado con agua a presión ha mostrado ser el método más económico para remover la contaminación de la superficie del aislador. Es muy efectivo en polvos, sales, suciedad y ácidos que no se adhieren fuertemente a la superficie aislante. En algunas áreas, el lavado natural por lluvia es suficiente para prevenir flameos debido a la contaminación de los aisladores. Sin embargo, en regiones donde la lluvia no es frecuente, el lavado natural debe complementarse durante la temporada de secas.

Frecuencia del lavado

La frecuencia del lavado varía dependiendo del gradò de contaminación, las condiciones ambientales y el diseño particular del aislador. Donde se requiere lavado frecuente, sobre todo en subestaciones, es más económico instalar un sistema de tuberías en torres o sistemas de boquillas permanentes para facilitar el lavado.

Los aisladores deben lavarse antes de alcanzar niveles críticos de contaminación. Esto puede estimarse mediante:

- Experiencia basada en periodos entre flameos.
- Medición del DESD en aisladores muestra desenergizados o aisladores energizados en el área bajo consideración.
- Presencia de actividad eléctrica en los aisladores durante condiciones críticas.
- Presencia de radiointerferencia.

Limpieza a mano

La limpieza del aislamiento a mano es completa y eficiente, pero también es un proceso tedioso, consume mucho tiempo y es caro, ya que en muchas ocasiones requiere la desenergización del equipo. Esta práctica se usa normalmente en aisladores donde el lavado a presión es impráctico debido a la inaccesabilidad, proximidad de equipos energizados o inefectivo debido a la fuerte adherencia de los depósitos en la superficie.

Limpieza con material abrasivo a presión

La limpieza de aisladores energizados o desenergizados con materiales abrasivos a presión es un medio muy efectivo, eficiente y económico para remover los depósitos o compuestos de grasas endurecidas en la superficie del aislador. Los materiales abrasivos más comunes son el olote molido, la cáscara de nuez y polvos finos de cal. El olote molido se utiliza normalmente para remover capas de grasa de silicón saturadas o contaminantes suaves. El polvo de cal y la cáscara de nuez se usan generalmente para remover contaminantes fuertemente adheridos como el cemento. Estos materiales son suficientemente abrasivos para efectuar el trabajo de limpieza sin dañar la superficie del aislador.

En todos los casos mencionados es importante analizar dichas alternativas desde un punto de vista técnico-económico o costo-beneficio.

En áreas con contaminación severa o baja incidencia de lluvias, se requiere del mantenimiento de los aisladores.

Alternativas aplicadas en México

Así como en otros países, en México se tienen lugares con muy alta contaminación, con sus consecuentes problemas en el sistema eléctrico. De acuerdo con las estadísticas de fallas en líneas de transmisión, la contaminación está catalogada como la segunda causa de fallas [CFE, 1994].

Hasta hace unos 10 años, las alternativas adoptadas por las compañías eléctricas mexicanas para contrarrestar los efectos de la contaminación habían estado basadas principalmente en el uso de perfiles tipo niebla (mayor distancia de fuga), en el mantenimiento del aislamiento (lavado y sustitución) y en la aplicación

de grasas de silicón (zonas costeras). Durante los últimos años, en algunas líneas con problemas específicos de contaminación, se han aplicado otras medidas como es el uso de perfiles más adecuados al tipo de contaminación, recubrimientos a base de una película de material hidrofóbico (silicón) y últimamente los aisladores sintéticos, con lo cual se ha reducido la incidencia de fallas.

De lo anterior se puede establecer que las prácticas adoptadas en México son congruentes con lo realizado en otros países, pero es posible también observar que no existe una solución única y definitiva para los diferentes niveles y tipos de contaminantes, requiriéndose en algunos casos la combinación de algunas de éstas, sobre todo con las prácticas de mantenimiento [Fierro, 1995].

Un aspecto importante a considerar es el hecho de que las regulaciones en términos de emisiones contaminantes por parte del sector industrial no han sido efectivas, lo cual paradójicamente ha repercutido en un incremento en el nivel de depósito de contaminantes en los aislamientos, lo que a su vez, incrementa el número de interrupciones del servicio afectando a dichas industrias.

Siguiendo con la misma trayectoria de alternativas mencionadas en la primera parte para disminuir las interrupciones causadas por la contaminación, la CFE tiene elevadas erogaciones encaminadas a los programas de mantenimiento del aislamiento de las líneas tanto de transmisión como de distribución. En combinación con esto, ha iniciado la aplicación de las alternativas restantes en diferentes zonas del país como se menciona a continuación:

En el aspecto de diseño, la utilización de perfiles con mayor distancia de fuga es una práctica más o menos común (aisladores tipo niebla). Sin embargo, a raíz de un proyecto de investigación realizado por el IIE, el cual consistió en evaluar el comportamiento en laboratorio de diferentes perfiles de aisladores (estándar, niebla, aerodinámico y superniebla), recientemente se están utilizando aisladores de este tipo en el área de Monterrey, pero con una distancia de fuga y diámetro mucho mayores que los convencionales tipo niebla [Ponce *et al*, 1994]. Las características de los aisladores evaluados se presentan en el cuadro 1. Se incluyen en este cuadro los resultados de voltaje de flameo obtenidos para un nivel de contaminación similar al medido en campo (Monterrey). Lo anterior está encaminado a dar una distancia específica de fuga (DEF) que sea congruente con los niveles de contaminación particulares de la zona, ya que, de acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos en este proyecto, se ha demostrado que sólo aisladores con una DEF mayor a los 50 mm/kV son adecuados para operar en forma más eficiente que el aislamiento normalmente utilizado en esas líneas. Los resultados del proyecto están sirviendo de base a la CFE para hacer modificaciones en el aislamiento actualmente utilizado en zonas de alta contaminación, a fin de disminuir el número de interrupciones causadas por la contaminación.

Asimismo, el uso de recubrimientos hidrofóbicos a base de silicón en aisladores convencionales de vidrio o porcelana, tanto estándar como niebla, ha permitido aumentar la confiabilidad del sistema disminuyendo los costos de mantenimiento por lavado que anteriormente se tenían. Quizá esta práctica sea la más utilizada en el país, tanto en el aislamiento de líneas como en las subestaciones, aunque los costos de su aplicación sean elevados. Por otra parte y a pesar del buen comportamiento que han tenido los recubrimientos durante varios años de instalación, existe la incertidumbre en el personal operativo del tiempo o vida útil de estos materiales, lo cual ha llevado a una sustitución y reaplicación del recubrimiento en un término máximo de unos tres años, con lo cual los costos asociados se incrementan.

El nivel de contaminación que se deposita en un aislador depende de la cantidad y tipo de contaminante, así como de las propiedades superficiales y su diseño.

CUADRO 1

Características de los aisladores bajo estudio.

Aislador	*Diámetro (mm)*	*Distancia de fuga (mm)*	*Área superficial (cm²)*	*Voltaje de flameo (kV/AISL)*
Estándar	254	292	1440	11.3
Aerodinámico	330	295	1770	13.9
Niebla	292	482	3232	19.2
Superniebla	320	612	4060	21.6

CUADRO 2

Voltaje de flameo de diferentes perfiles de aisladores con y sin recubrimiento hidrofóbico.

	Voltaje de flameo (kV/AISL)			
Condición	*Estándar*	*Aerodinámico*	*Niebla*	*Superniebla*
Sin rec.	11.3	13.9	19.2	21.6
Rec. total	16.9	14.6	21.9	28.0

En el cuadro 2 se presenta una comparación de los voltajes de flameo de los cuatro perfiles bajo estudio, con y sin recubrimiento hidrofóbico. La capa de contaminación se logró depositar por medios artificiales, sin embargo, el depósito de contaminantes en campo puede ser diferente debido tanto al perfil del aislador como a la condición superficial del recubrimiento hidrofóbico. Lo anterior conlleva a que no se debe utilizar el recubrimiento en forma indiscriminada en cualquier perfil de aislador. Por esta razón, para lograr la optimación del comportamiento es necesario analizar cada perfil con el recubrimiento, de tal forma que se minimice la acumulación del contaminante.

Desde el punto de vista de la utilización de aisladores sintéticos, y debido a malas experiencias, aunque no asociadas con fallas por contaminación, desde 1981 estos aisladores no habían tenido participación en la red nacional de transmisión como alternativa de solución a la problemática de contaminación, aunque su uso en la red de distribución ha sido muy extenso. Actualmente existe un consenso más amplio en este aspecto y afortunadamente se cuenta a la fecha con tecnologías muy desarrolladas tanto en diseño como en materiales, de tal forma que el panorama de aplicación de tales aisladores está más abierto. A mucho de esto contribuye el hecho de que internacionalmente la experiencia operativa ha sido bastante satisfactoria, principalmente en zonas de muy alta contaminación donde la aplicación de los materiales convencionales como el vidrio y la porcelana han presentado deficiencias o limitaciones para resolver esta problemática tanto en corriente alterna como en corriente directa.

Recientemente, el IIE inició un proyecto con la CFE para la aplicación de aisladores sintéticos a base de hule silicón para instalarse en una línea de transmisión de 230 kV ubicada en Lázaro Cárdenas, Michoacán. Las condiciones operativas de dicha línea podrían catalogarse como excepcionales debido a los recursos que se utilizan para su continuidad, sobre todo en el aspecto de mantenimiento por lavado, el cual se realiza en línea energizada por un periodo aproximado de nueve meses al año (dos veces al mes). Además, existen problemas de corrosión de las partes metálicas de los aisladores, lo cual implica una sustitución frecuente del aislamiento convencional. Aunque se sabe que los aisladores sintéticos pueden presentar problemas de degradación con el tiempo, la utilización de estos aisladores debe hacerse mediante un análisis técnico-económico y de costo-beneficio. Inicialmente, los aisladores sintéticos presentan valores de voltaje de flameo muy por encima de los convencionales de vidrio y porcelana debido principalmente a sus propiedades hidrofóbicas y a su diseño aerodinámico. Sin embargo, la degradación que sufran con el tiempo puede disminuir dichas propiedades por lo que debe mantenerse un seguimiento de los mismos. En el cuadro 3 se presentan los resultados obtenidos al evaluar comparativamente una cadena de aisladores de porcelana tipo niebla (perfil utilizado en dicha línea) y un aislador sintético a base de hule silicón. Esta evaluación se realizó en una cámara de niebla salina a diferentes severidades de contaminación.

Diagnóstico del aislamiento en zonas de contaminación

La complejidad del problema de contaminación hace necesario obtener información rápida relacionada con el estado superficial del aislamiento bajo las condiciones normales en las que opera. Actualmente se están llevando a la práctica diferentes técnicas de diagnóstico con las cuales se busca medir la severidad de la contaminación ya sea en forma directa o indirecta, para correlacionarla con un riesgo de falla del aislamiento y de esta forma efectuar actividades de mantenimiento o reemplazo.

Entre las técnicas de diagnóstico de aislamiento contaminado, algunas de ellas desarrolladas y aplicadas hace ya muchos años en diferentes países, se pueden mencionar las siguientes:

- Medición de DESD.
- Medición de la conductancia superficial.
- Medición de corriente de fuga.
- Medición de resistencia superficial.

La elección de la técnica de diagnóstico depende, entre otras cosas, de la naturaleza de la contaminación, del tipo de instalación existente y sobre todo del costo asociado con el equipo de diagnóstico. La medición de la DESD es una técnica muy conocida y que ha sido empleada por el IIE en proyectos anteriores para determinar los niveles de contaminación de aisladores instalados en diferentes zonas del país. Es una técnica costosa y que consume mucho tiempo, además de tener limitaciones con algunos tipos de contaminantes.

Recientemente se han desarrollado proyectos en el IIE aplicando las técnicas de medición de resistencia superficial y de corriente de fuga para la evaluación del comportamiento de aisladores contaminados tanto en transmisión como en distribución.

La técnica de medición de la resistencia superficial considera que es

CUADRO 3

Valores comparativos de voltaje de flameo entre una cadena de 15 aisladores tipo niebla y un aislador sintético de hule silicón.

Salinidad	*kV/m de longitug axial*		*kV/m de dist. de fuga*	
(kg/m³)	*Porcelana*	*Sintético*	*Porcelana*	*Sintético*
10	71.2	-	24.6	-
20	63.4	-	21.9	-
40	59.3	-	20.5	-
112	-	89.1	-	32.9
160	-	81.0	-	29.9

posible determinar el riesgo de flameo de un aislador en función del valor de la resistencia superficial de un aislador testigo energizado con bajo voltaje y expuesto a las mismas condiciones ambientales y de contaminación que los aisladores de la línea. Con base en los resultados obtenidos en laboratorio, se ha establecido que los aisladores de una línea de transmisión, con depósitos contaminantes naturales, tienen un alto riesgo de flameo cuando su resistencia superficial llega a ser del orden de 400 kΩ, mientras que para un aislador de distribución el valor de la resistencia superficial crítica es de 200 kΩ. Esta técnica se ha implementado en ocho estaciones de prueba de la Gerencia de Distribución de la CFE en diferentes localidades (Monterrey, Guadalajara, Vallarta, Veracruz, Tampico y Coatzacoalcos) [Del Razo *et al*, 1994]. En el caso de transmisión, se tienen tres estaciones de monitoreo en el área de Monterrey [Fierro *et al*, 1995].

Además, para el caso de transmisión se ha implementado un sistema para la medición de la corriente de fuga de cadenas de aisladores en una línea de 400 kV, siendo el primer sistema de monitoreo de este tipo que se instala en la red de transmisión. Dicho sistema consiste en un sensor instalado en las cadenas, con el cual se monitorea la corriente de fuga que circula permanentemente por la cadena de aisladores y se cuantifica, según su magnitud, en cinco niveles o rangos, el número de picos de corriente generados por las descargas superficiales [Fierro *et al*, 1995].

De pruebas realizadas en laboratorio se ha encontrado que a medida que el número de picos de corriente se incrementa en los rangos superiores, el riesgo de falla es mayor. Para el diagnóstico del aislamiento de la línea de 400 kV (A3450) del área de Monterrey, se instrumentaron 10 estructuras con este sistema; a la fecha se tienen resultados preliminares de dichas mediciones [Fierro *et al*, 1995]. Durante el transcurso de 1996 se podrá obtener información más completa.

Conclusiones

Debido a los diferentes tipos y niveles de contaminantes depositados en los aislamientos externos de la red eléctrica, el problema de contaminación no tiene una solución única y simple.

Existen diferentes alternativas para atacar el problema, pero es necesaria la combinación de algunas de las técnicas descritas en este trabajo a fin de disminuir la incidencia de interrupciones causadas por la contaminación. Lo anterior debe realizarse bajo un criterio costo-beneficio.

Por otra parte, es necesario aplicar técnicas de diagnóstico que permitan establecer el estado operativo del aislamiento instalado en zonas de alta contaminación, a fin de contribuir a las labores de mantenimiento en forma oportuna.

Referencias

CFE (1994), "Síntesis de fallas de líneas de transmisión", preparado por la Subdirección de Transmisión, Transformación y Control, CFE, México.

Contreras, R. (1992), "Alternativa de solución a la problemática de contaminación por siliconado, sobreaislamiento, lavado en vivo y Sylgard", VIII Reunión de intercambio de experiencias de ingenieros de subestaciones y líneas de transmisión, Mazatlán, Sinaloa, México.

Del Razo, J., J. L. Fierro y G. Montoya (1994), "Campos de prueba de aisladores y la predicción del riesgo de flameo en aisladores mediante la medición de la resistencia superficial", RVP'94, IEEE Sección México, Acapulco, México.

Fierro, J. L. (1994), *Effects of pollution conditions on insulators: the case of Mexico,* Simposio Internacional sobre Coordinación de Aislamiento, noviembre, CIGRE, México.

Fierro, J. L., Ramírez y Montoya (1995), "Instrumentación de líneas aéreas", preparado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (Reporte IIE/03/31/5289/RF/95).

Fierro, J. L., Ramírez y Montoya (1995), "Mediciones para el diagnóstico del aislamiento en la línea de transmisión Monterrey-Frontera", preparado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (Reporte IIE/03/31/5291/RF/95).

Fierro, J. L., I. Ramírez, G. Montoya, L. Ocaña, A. Ortega, R. Rico y E. Martínez (1995), "Monitoreo en línea de la corriente de fuga de cadenas de aisladores para 400 kV en zonas de contaminación", RVP'95, IEEE Sección México, Acapulco, México.

Ham, H. (1992), "Experiencia de aplicación y resultados de recubrimientos elastoméricos en líneas de transmisión de 400 y 115 kV", VIII Reunión de intercambio de experiencias de ingenieros de subestaciones y líneas de transmisión, Mazatlán, Sinaloa, México.

Holte, K. C. *et al* (1977), *Application guide for insulators in a contaminated environment,* IEEE PES Summer Meeting, julio, México, D. F.

Houlgate, R. G. (1992), *The performance of composite insulators in a coastal environment,* IEEE Colloquium on "Non ceramic insulators for overhead lines", octubre, digest núm. 1992/182, Londres, Inglaterra.

Karady, G. *et al* (1994), *Review of CIGRE and IEEE research into pollution performance of nonceramic insulators: field aging effects and laboratory test techniques,* CIGRE Session, paper 33-103.

Ponce, M., A. Montesinos y T. Campillo (1994), "Selección del perfil de aislador tipo suspensión", preparado por Instituto de Investigaciones Eléctricas (Reporte IIE/03/31/5292/RF-001/94).

JOSÉ LUIS FIERRO CHÁVEZ



Ingeniero industrial electricista egresado del Instituto Tecnológico de Chihuahua (1979) con maestría en ingeniería eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna (1980) y doctorado en ingeniería eléctrica en la Universidad de Salford, Inglaterra (1992). Desde 1981 trabaja para el IIE en el Departamento de Materiales. Su área de especialidad se ubica en el desarrollo, diseño y evaluación en campo y laboratorio de aislamientos para alta tensión, así como en la aplicación de técnicas de prueba de alta tensión en laboratorio. Ha trabajado en diversos proyectos de investigación relacionados con la operación de aislamientos en ambientes contaminados. En 1991 realizó una estancia de tres meses en la Compañía National Grid Ltd. del Reino Unido, trabajando en un proyecto para la evaluación en laboratorio del envejecimiento de aisladores sintéticos. En ese mismo año, colaboró con la Compañía Electricity Association Technology, para el desarrollo de técnicas de diagnóstico de aisladores sintéticos en campo. A partir de 1994 se desempeña como coordinador del Área de Aislamientos Externos del Departamento de Materiales. Desde 1993 colabora con el Grupo de Especialistas de Aisladores de la Comisión Federal de Electricidad y coordina el Comité de Aisladores de la IEEE Sección México. Ha presentado diversas publicaciones técnicas nacionales como internacionales sobre el tema de aisladores.

MX9800141

Análisis experimental de la contaminación ambiental en equipos eléctricos

María Teresa Campillo Ruiz y Marco Antonio Ponce Vélez

Resumen

En el presente trabajo se muestra un resumen de los principales factores que originan los problemas de contaminación en aislamientos. Esto, como resultado de diversos estudios realizados tanto en estaciones de prueba experimentales como en líneas de transmisión, distribución y laboratorio por el Departamento de Materiales del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

Introducción

La contaminación ambiental de los aislamientos externos afecta la confiabilidad de las líneas de transmisión, distribución y subestaciones. La contaminación atmosférica en los equipos eléctricos provoca problemas como corrosión en las partes metálicas y flameo. Esto se debe a la ruptura dieléctrica del área exterior del aislador, lo que interrumpe la operación del sistema forzando un retiro parcial o total de la carga.

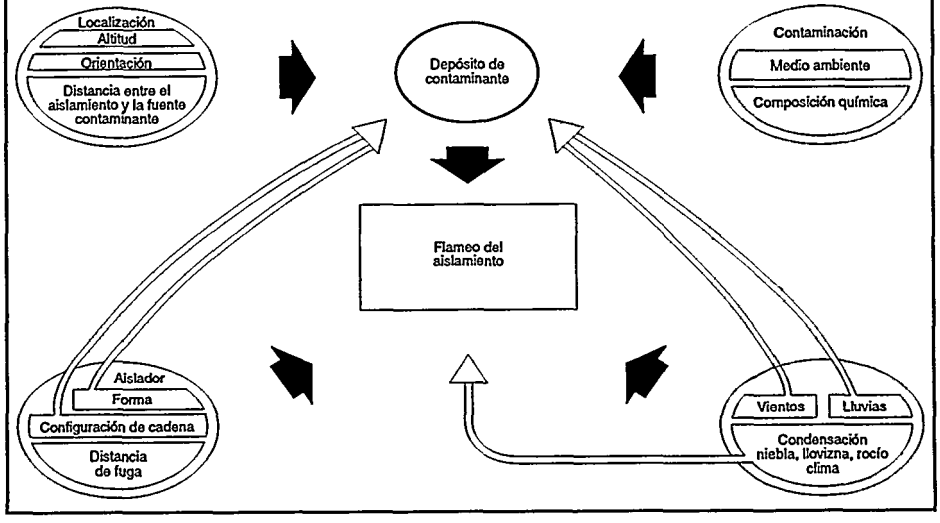
En los aislamientos se han identificado contaminantes provenientes de la brisa marina, suelo, petroquímicas, acereras, partículas de carbón, termoeléctricas, cementeras y heces de aves entre otros, por lo cual la contaminación en los aislamientos se clasifica como marina, industrial, rural o una combinación de las mismas. Estos tipos de contaminantes causan diversos problemas en los aislamientos, que implica que no haya una solución general al problema.

El efecto de la contaminación en los aislamientos externos en líneas y subestaciones depende de la interacción de diferentes variables. En la figura 1 se muestra un diagrama de tales variables. La formación de un depósito de contaminantes sobre la superficie de los aisladores está en función de lo siguiente: características del sitio donde se localiza la línea como la altitud, orientación y distancia entre la fuente contaminante y el aislamiento; las condiciones prevalecientes de contaminación, las cuales definen el tipo de contaminante; el tipo de aislamiento, su perfil, material, configuración y distancia de fuga, van a definir la distribución y cantidad de contaminante, y por último, las condiciones climatológicas; por un lado el viento y la lluvia transportan partículas al aislador pero también ejercen un efecto de limpieza y por el otro, las lloviznas, nieblas, rocío o condensación originan que el contaminante se humedezca y origine corrientes de fuga y flameo.

Índices de fallas en los sistemas de transmisión

Las fallas por contaminación de las líneas de transmisión son la segunda causa de interrupciones en el suministro de energía eléctrica. En 1994 se presentaron un total de 143 salidas por contaminación en los voltajes de 400-115 kV, lo cual implicó un 13% de las salidas totales; la causa principal se debe a descargas atmosféricas (57%). Se consideran como eventos separados las fallas provocadas por la quema de vegetación, quema de caña y aisladores, sin embargo, un porcentaje de tales fallas podría atribuirse a salidas por contaminación, ya que se han identificado partículas de carbón en la superficie de los aisladores. Las causas de fallas en el caso de aisladores pueden ser varias, entre ellas su reemplazo debido a perforación o mantenimiento preventi-

FIGURA 1
Interacción de los factores que causan el flameo del aislamiento por contaminación.



vo contra contaminación. En la figura 2 se presentan los porcentajes de salidas con sus respectivas causas. De estos diagramas es claro que las líneas que se ven afectadas en un mayor grado por la contaminación son las sujetas a un voltaje de 230 kV. Asimismo, en el caso de las líneas de 230 kV y 161-115 kV, la contaminación sigue siendo la segunda causa de salidas de las líneas, no así las sujetas a un voltaje de 400 kV, en donde las fallas por contaminación pasaron a un tercer término. En la figura 3 se presenta el tiempo de interrupción de las líneas de transmisión, de 400 a 115 kV [CFE, 1994].

En los aislamientos se han identificado contaminantes provenientes de la brisa marina, suelo, petroquímicas, acereras, partículas de carbón, termoeléctricas, cementeras y heces de aves entre otros, por lo cual la contaminación en los aislamientos se clasifica como marina, industrial, rural o una combinación de las mismas. Estos tipos de contaminación causan diversos problemas en los aislamientos, que implica que no haya una solución general al problema.

La contaminación y sus efectos en el voltaje de flameo (VF)

Evaluación de la contaminación. Método de la densidad equivalente de sal depositada (DESD)

Uno de los métodos más utilizados para evaluar la contaminación en aislamientos es la de exponer a los aisladores a los cambios naturales del medio ambiente y realizar mediciones periódicas para determinar los niveles de contaminación a través del método de la DESD, que es la canti-

FIGURA 2

Causa de salidas de líneas de transmisión 400-115 kV.

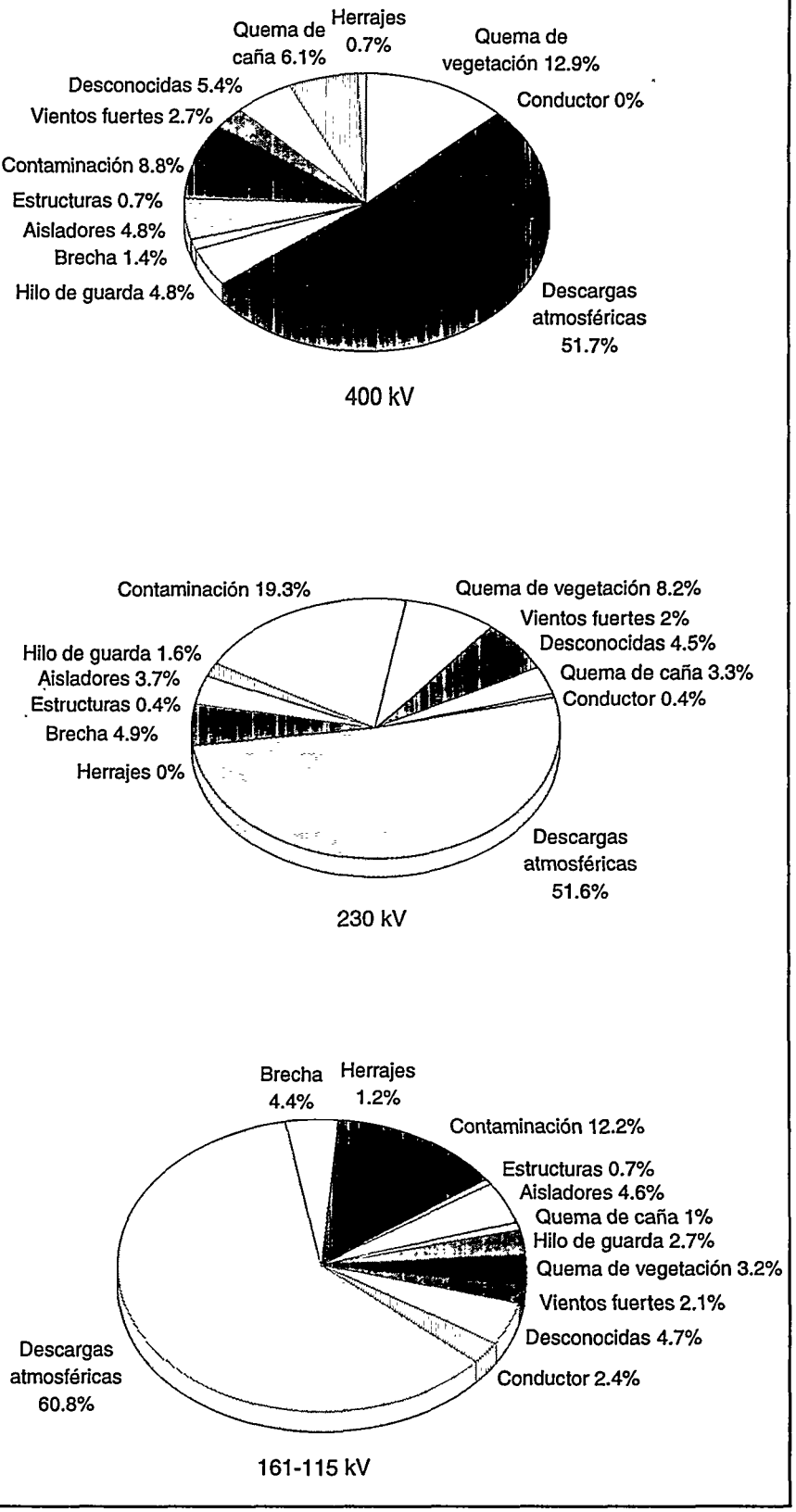
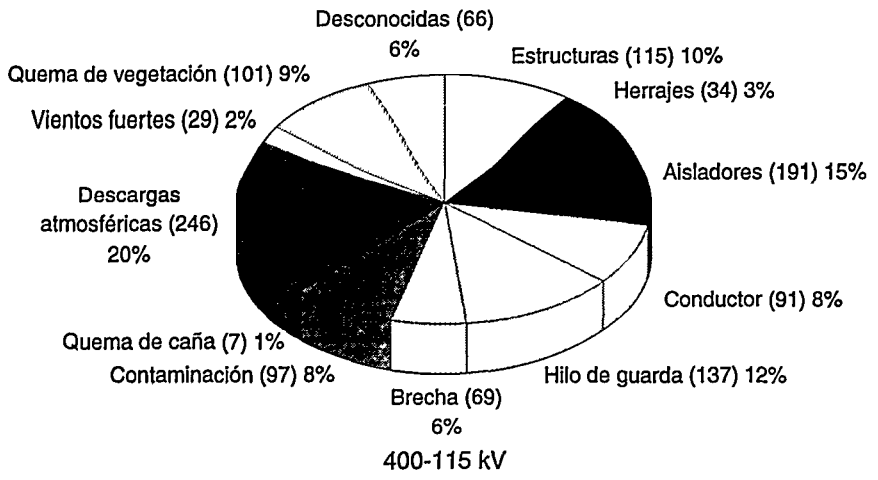


FIGURA 3
Distribución de salidas de servicio por fallas de líneas de transmisión en horas (1994).



La naturaleza química de los depósitos contaminantes en los aisladores depende de las fuentes emisoras y del ambiente natural que rodea las instalaciones. Así, se han identificado en un aislador hasta siete tipos de sales diferentes, sin embargo, las predominantes han sido el cloruro de sodio, el sulfato de calcio dihidratado o yeso y el carbonato de calcio o calcita.

dad de sal, referida a NaCl, sobre la superficie de un aislador en miligramos por centímetro cuadrado que se requiere para producir una conductividad similar a la contaminación realmente depositada y disuelta en la misma cantidad de agua. Este método está normalizado e incluido en la norma IEC 507.

El método de la DESD implica la remoción del contaminante del aislador con agua de baja conductividad, separando la superficie inferior de la superior en el caso de cadenas de transmisión y excluyendo las partes metálicas. Se determina la conductividad eléctrica de la solución contaminante resultante (por lo cual únicamente se toman en cuenta los contaminantes solubles), la cual se relaciona con una curva de calibración previamente obtenida y se calcula el contenido de sal correspondiente a la conductividad medida. La DESD se calcula a partir de la cantidad de sal equivalente a la conductividad medida, multiplicada por el volumen requerido para la remoción del contaminante y dividida entre el área superficial del aislador. La medición de conductividad eléctrica se realiza corrigiendo el valor obtenido a una temperatura de 18 o 20°C.

Dado que este método fue implementado por los japoneses, la sal de referencia es el cloruro de sodio. En México, aunque las zonas costeras son extensas, también existen grandes áreas donde los contaminantes depositados en los aisladores difieren de manera considerable en su estructura química de las salinas. Por esta razón, su comportamiento desde el punto de vista químico y eléctrico es muy diferente.

Con el fin de definir el comportamiento entre contaminantes salinos y aquellos identificados en zonas alejadas de la costa, se ha realizado experimentación, la cual se muestra en la figura 4, en donde se observa la concentración de varios constituyentes contra su conductividad eléctrica. Se identificó que el yeso, contaminante típico identificado en aisladores, a diferencia del cloruro de sodio muestra un comportamiento no lineal después de una conductividad eléctrica de 1.8 mS/cm. También por determinaciones de DESD, de acuerdo con la norma IEC 507, se observó que en contaminantes no salinos como el yeso, el volumen de agua utilizado para la remoción del contaminante no es representativo, debido a que los 576 ml, cantidad de agua recomendada para un aislador estándar, no logran disolver todo el material soluble, resultando que una parte se queda como material insoluble.

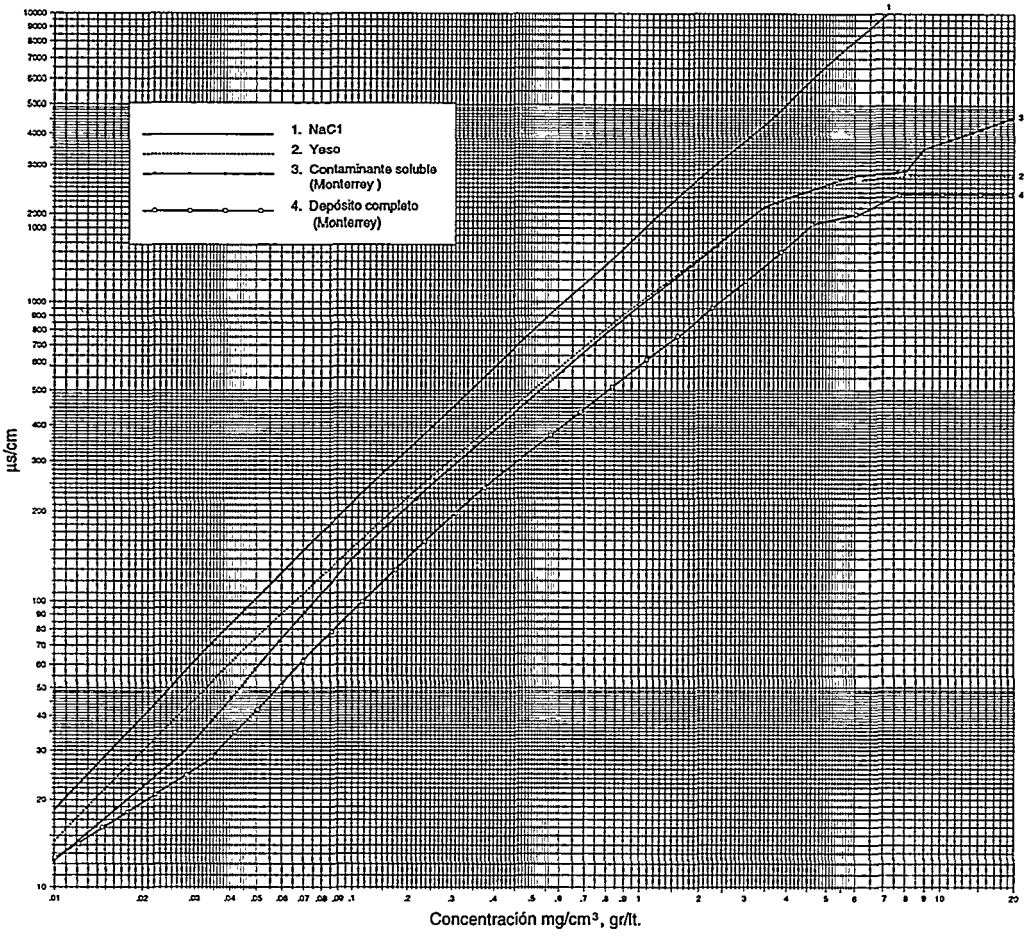
En campo, a medida que la capa se humecta, este material se irá disolviendo, con lo cual, la conductancia superficial se incrementa y así el voltaje de flameo disminuye. Por consiguiente, con base en esta experimentación se decidió que en todas las determinaciones posteriores, se utilizara un volumen de agua suficiente para que al menos la conductividad de la solución contaminante fuera de 1.8 mS/cm o menor, o sea que estuviera en la parte lineal de la curva y así la disolución del contaminante fuera similar.

Por lo tanto, para determinar el nivel de contaminación es importante considerar la solubilidad de la sal predominante en el depósito del aislador; además, la determinación de DESD se debe de complementar con el análisis químico del contaminante y comparar el comportamiento de este contaminante con el cloruro de sodio a través de mediciones similares a las de la figura 4 para decidir si el método del DESD se aplica tal como lo indica la norma IEC 507 o si es necesario alguna modificación.

Tipos de contaminante depositados en los aisladores

La naturaleza química de los depósitos contaminantes en los aisladores depende de las fuentes emisoras y del ambiente natural que rodea las instalaciones. Así, se han identificado en un aislador hasta siete tipos de sales

FIGURA 4
Curvas de concentración vs conductividad eléctrica a 18°C.



diferentes, sin embargo, las predominantes han sido el cloruro de sodio, el sulfato de calcio dihidratado o yeso y el carbonato de calcio o calcita. Con base en la proporción de estas sales y su fuente de emisión, se puede clasificar el tipo de contaminación de un sitio. La zona donde la proporción de cloruro de sodio es predominante y su fuente de emisión es la brisa, se clasifica como contaminación marina; las tipo industrial están caracterizadas por su localización (muy puntual) y con el sulfato de calcio dihidratado como contaminante predominante, y aquellas donde el principal contaminante es la calcita se clasifican como contaminación tipo rural.

Influencia de la distribución del contaminante entre superficies y en el VF

La capa contaminante sobre un aislador en general no es uniforme debido a la forma y disposición del aislador, campo eléctrico, dirección y velocidad de viento, intensidad de la contaminación y las condiciones meteorológicas locales. Por lo general la superficie inferior exhibe un mayor nivel de contaminación, ya que la superior está sujeta a la remoción del contaminante por efecto del viento o la lluvia, mientras que la inferior está protegida por los faldones.

De acuerdo con pruebas artificiales de laboratorio, se ha determinado que la condición crítica de flameo es cuando el aislamiento se encuentra contaminado con una proporción de contaminante similar entre la superficie superior e inferior y que el voltaje de flameo depende principalmente del nivel de contaminación de la superficie inferior. Para ilustrar lo anterior, en el cuadro 1 se presentan los resultados en dos perfiles de aislador contaminados en forma uniforme y no uniforme. El contaminante utilizado fue una mezcla de caolín, yeso y cloruro de sodio.

Asimismo, en la figura 5 se presenta el voltaje de flameo determinado con diferentes grados de uniformidad entre superficies. En la figura 6 se corrobora que el voltaje de flameo depende del nivel de contaminación de la superficie inferior, para lo cual

CUADRO 1

Voltaje de flameo en función de la distribución del contaminante en dos perfiles de aislador.

Perfil del aislador	*Voltaje de flameo (kV/aisl.)*	
	Cont. uniforme	*Cont. no uniforme*
Aerodinámico	8.5 ± 8.4 %	13.9 ± 9.4 %
Superniebla	12.2 ± 5.5 %	21.6 ± 2.8 %

FIGURA 5
Voltaje de flameo en función de la uniformidad de la capa contaminante.

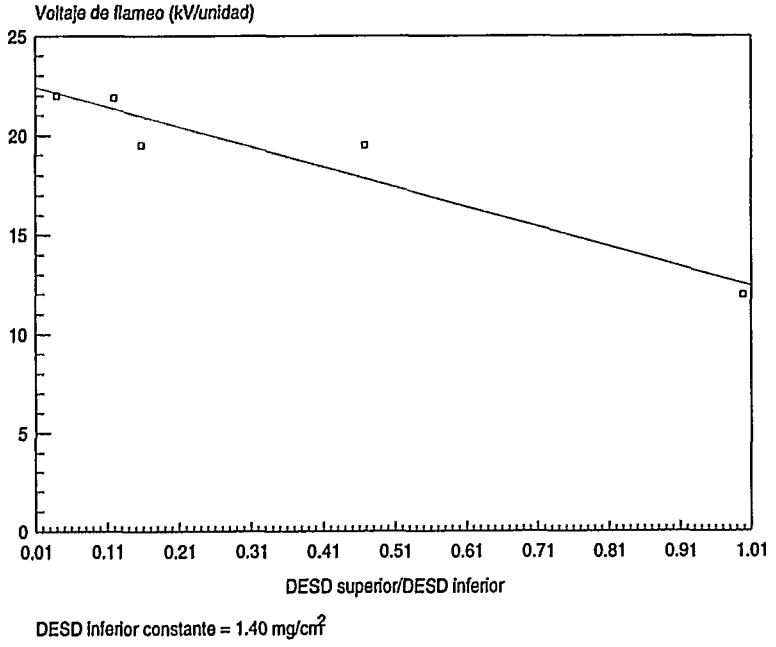
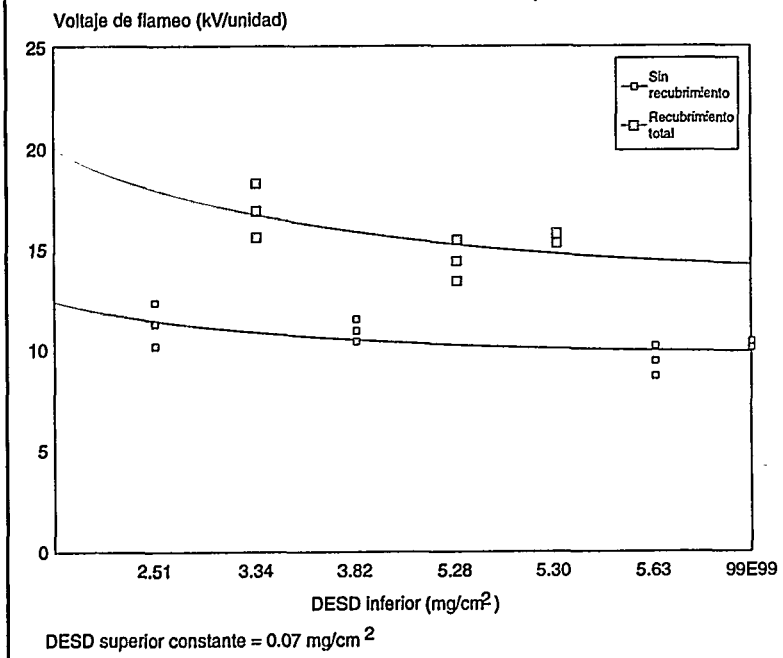


FIGURA 6
Voltaje de flameo variando el nivel de contaminación de la superficie inferior.



el nivel de contaminación se mantuvo constante en la superficie superior y la DESD de la superficie inferior se fue incrementando hasta obtener un grado infinito de contaminación, condición que se representó recubriendo la parte inferior del aislador con una pintura conductora.

Influencia del campo eléctrico en la depositación del contaminante

Con el fin de definir el efecto de la corriente alterna en el depósito del contaminante se realizaron pruebas en dos cadenas verticales de aisladores, una de ellas energizada a 69 kV. La cadena estaba formada por nueve aisladores y estuvieron sujetas a contaminación tipo salina durante tres años [Ramos G., *et al*, 1992]. Los resultados se muestran en el cuadro 2, donde se puede ver que el nivel de contaminación en los aisladores cercanos al conductor es muy diferente en ambas cadenas, siendo más notorio en la superficie inferior, mientras que los aisladores del lado de tierra muestran menor diferencia en los niveles de contaminación. Asimismo, la DESD en la superficie inferior del aislador energizado y cercano a lado de alta tensión fue 79% más alto con respecto a su correspondiente sin energizar. Los aisladores restantes de la cadena energizada recolectaron más contaminante con respecto a la cadena sin energizar. Los valores de DESD entre un aislador y otro son muy similares y son aproximadamente 61% más elevados en los aisladores energizados.

De los resultados anteriores se comprueba que el campo eléctrico atrae mayor cantidad de contaminantes y esto es más notorio en la superficie inferior dado que en esa área la concentración de campo es mayor, y es en el aislador del lado de alto voltaje donde los niveles de contaminación, DESD, son más elevados debido también a que en esa área la concentración de campo es mayor con respecto al resto de la cadena.

Influencia del material soluble e insoluble en el voltaje de flameo

La tendencia de un aislador al flameo

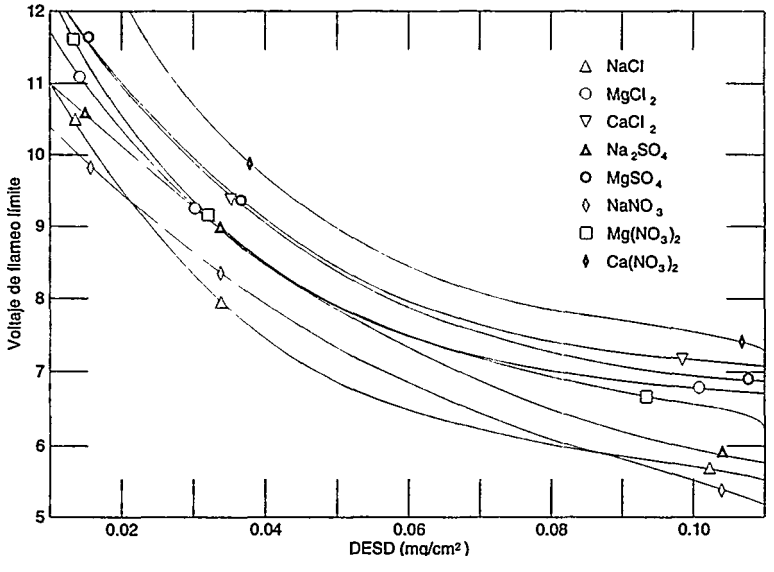
CUADRO 2

Efecto de la corriente alterna en el nivel de contaminación DESD en cadenas de aisladores.

Aislador	Energizado		No energizado	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
1	0.020	0.182	0.015	0.048
2	0.018	0.037	0.012	0.021
3	0.021	0.034	0.012	0.023
4	0.020	0.036	0.006	0.018
5	0.017	0.034	0.009	0.025
6	0.019	0.035	0.010	0.020
7	0.022	0.033	0.012	0.025
8	0.020	0.036	0.012	0.022
9	0.011	0.035	0.013	0.024

FIGURA 7

Efecto de diferentes tipos de sales en el voltaje de flameo.



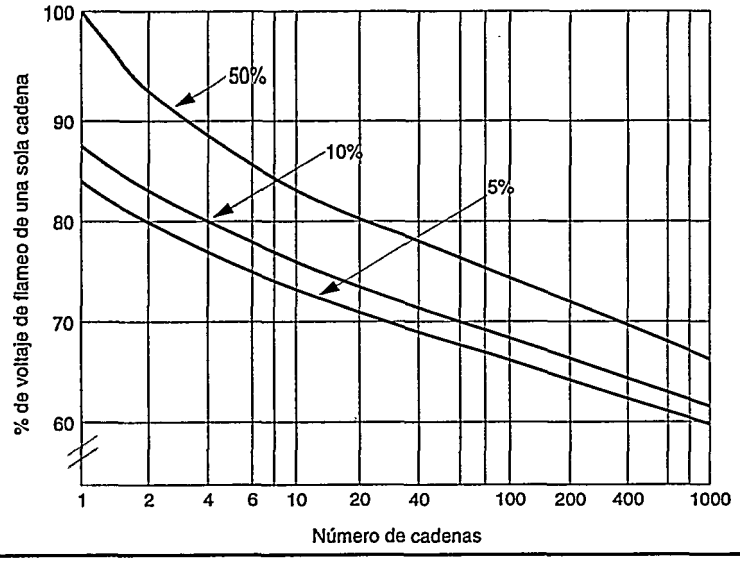
depende del tipo y cantidad de contaminante depositado sobre su superficie; utilizar sólo el DESD para evaluación de aislamientos en laboratorio llevaría a ciertas limitaciones y resultados erróneos. La solubilidad del contaminante es un factor importante en el flameo del aislamiento ya que la formación de electrolitos en sales con alta solubilidad será muy rápida, lo mismo que el flameo. Se ha encontrado que las sales muy solubles se lavan o remueven fácilmente del aislamiento, sin embargo en las sales de baja solubilidad como el yeso —las cuales forman grandes depósitos en los aislamientos— su disolución es más lenta, pero a la larga traen más problemas dado que una vez que el contaminante está completamente húmedo, la conductancia superficial puede ser similar a la generada por sales solubles dada la cantidad de contaminante, además de ser constante, ya que el contaminante difícilmente se remueve o lava. En la figura 7 se muestra la influencia del material o sales solubles en el voltaje de flameo. Se ha dicho que el material insoluble únicamente actúa como receptor de humedad, sin embargo y de acuerdo con pruebas de laboratorio, ciertos tipos de contaminantes insolubles pueden ser conductores [Campillo T., *et al*, 1994]. Esta aseveración se debe considerar principalmente en pruebas artificiales de contaminación, ya que el caolín que se utiliza convencionalmente como insoluble es un conductor muy pobre.

Las fallas por contaminación de las líneas de transmisión son la segunda causa de interrupciones en el suministro de energía eléctrica.

Influencia de la longitud de la línea en el voltaje de flameo

El voltaje de flameo obtenido en laboratorio en una cadena de aisladores se basa en datos probabilísticos bajo condiciones controladas de nivel de contaminación, un tipo de contaminante específico y condiciones ambientales definidas. De resultados experimentales se ha comprobado que en una línea a medida que se incrementa el número de torres (y por lo tanto de cadenas de aisladores), el voltaje de flameo se reduce, por lo que la probabilidad de falla se incrementa [EPRI, 1975]. Para ilustrar este efecto se presenta la gráfica de la figura 8. Para ejemplificar la influencia del número de cadenas en el voltaje de flameo, se tiene una sección de línea de un solo circuito de 16 km con un claro entre torres de 400 m, el cual contendrá 120 cadenas de aisladores. De la figura 8 se obtiene que el voltaje de flameo se reduce un 25% cuando se tienen 120 cadenas en comparación con una sola cadena. Asimismo, en esta gráfica se observa que el porcentaje en reducción del voltaje de flameo después de la torre 100 es más bajo con respecto a las cadenas que le antecedieron. Así, de la cadena 100 a 500 hay una reducción del 4% mientras que de la 1 a la 100 es del 22%. Esto se debe de considerar en las pruebas de laboratorio ya que únicamente se utiliza una cadena; en caso de diseño se debe de tomar en

FIGURA 8
Relación entre el VF de una cadena y varias cadenas para una desviación estándar del 10%.



cuenta un factor de corrección con base en la figura 8.

Efecto de la altitud en el voltaje de flameo

La rigidez dieléctrica del aire disminuye a medida que se incrementa la altitud, de hecho, es práctica común aplicar un factor de corrección en resultados de pruebas realizadas bajo condiciones atmosféricas diferentes a las normalizadas al nivel del mar. Dicho factor de corrección está en términos de la densidad relativa del aire, (DRA), siendo usado para corregir voltajes de flameo a una presión y temperatura de referencia de 760 mm de Hg y 20°C respectivamente, y se representa en la ecuación 1.

$$DRA = (p/p_0)\,(273 + t_0) / (273 + t) \qquad [1]$$

donde:
p = presión de prueba
p_0 = presión a nivel del mar, 760 mm de Hg
t_0 = 20°C
t = temperatura de prueba

En el caso de México, es importante conocer la dependencia entre el voltaje de flameo de aisladores contaminados y bajas presiones, puesto que varias líneas de transmisión y distribución operan a grandes altitudes.

Se realizó experimentación en el IIE para obtener el voltaje de flameo variando la presión, utilizando una cámara presurizada y dos tipos de aislador. Uno de ellos fue el IEEE estándar disk y un aislador para 25 kV tipo alfiler. Las pruebas se realizaron con tres niveles de contaminación. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 9. A través de análisis regresivo y considerando la ecuación 1, se obtuvo la siguiente relación:

$$V_p = V_{p0}\,(p/p_0)^n \qquad [2]$$

donde
V_{p0} = voltaje de flameo a nivel del mar
p = presión de prueba
p_0 = presión a nivel del mar

Se obtuvieron los valores del exponente n, resultando que para el IEEE estándar disk fue de aproximadamente 0.5 y para el aislador de 25 kV fue de 0.8. Lo anterior significa una reducción en el voltaje de flameo del orden del 20% al variar la altitud desde el nivel del mar hasta unos 3200 metros aproximadamente [De la O, A. *et al*, 1991]. Estos valores se deben utilizar para determinar el nivel de aislamiento trabajando en zonas de contaminación a grandes altitudes. Sin embargo para geometrías más complicadas es necesario continuar con las investigaciones para determinar el valor n correspondiente.

De acuerdo con estudios recientes del efecto de altitud en el voltaje de flameo, se ha encontrado que cuando el aislamiento está sujeto a bajas temperaturas, el efecto de la presión se neutraliza e inclusive el funcionamiento del aislamiento puede mejorar. Trabajo experimental realizado a 0° y 20°C muestra que se debe considerar de manera inicial un nuevo factor por altitud y temperatura conjuntas en la forma: $[(p/p_0)(t_c/t)]^m K_c$ donde K_c es la unidad a 20°C, pero es mayor de uno cuando t se aproxima a cero grados. Los resultados obtenidos en esta experimentación para el caso de aisladores estándar y niebla se muestran en los cuadros 4 y 5 respectivamente [Ocampo, J. D., 1994]. Para el caso de otras configuraciones se necesita realizar experimentación adicional.

Efecto de la configuración de la cadena en la depositación del contaminante y el voltaje de flameo

Las cadenas de aisladores en la red eléctrica pueden estar instaladas en tres diferentes configuraciones: vertical (suspensión), horizontal (tensión) y en V (inclinada). El ángulo en V es usualmente entre 90 y 120 grados. La cantidad de contaminante depende de la posición de la cadena. Con el fin de determinar la diferencia en la depositación en los tres tipos de configuración se expusieron cadenas de aisladores estándar en un ambiente rural con influencia industrial. Se obtuvo el nivel de contaminación DESD, tanto en la superficie inferior como en la superior. En el cuadro 3 se presentan los resultados.

De estas mediciones se observa que es la cadena vertical donde la depositación es mayor y la que menos se contamina es la cadena en posición horizontal; este efecto es más

CUADRO 3

Niveles de contaminación DESD mg/cm² en aislador tipo estándar con diferente configuración de cadena.

Superficie	*Vertical*	*Horizontal*	*En V*
Inferior	0.422	0.1855	0.210
Superior	0.048	0.051	0.045

CUADRO 4

Variación del voltaje de flameo a diferentes niveles de contaminación, temperatura y altitud en el aislador tipo estándar disk.

Nivel de contaminación (mg/cm²)	*Temperatura (°C)*	*Voltaje de flameo (kV/aisl.) Altitud (msnm) 0*	*1200*	*3050*
	0	15.9	14.8	13.6
0.07	5	14.6	13.6	12.5
	20	13.8	12.9	11.6
	0	13.1	12.4	11.1
0.50	5	11.7	10.9	10.0
	20	10.5	9.9	9.0

CUADRO 5

Variación del voltaje de flameo a diferentes niveles de contaminación, temperatura y altitud en el aislador tipo niebla.

Nivel de contaminación (mg/cm²)	*Temperatura (°C)*	*Voltaje de flameo (kV/aisl.) Altitud (msnm) 0*	*1200*	*3050*
	0	19.7	18.5	16.8
0.09	5	18.4	17.2	15.7
	20	17.5	16.5	14.8
	0	16.2	15.3	13.8
0.42	5	14.6	13.7	12.4
	20	13.5	12.7	11.7

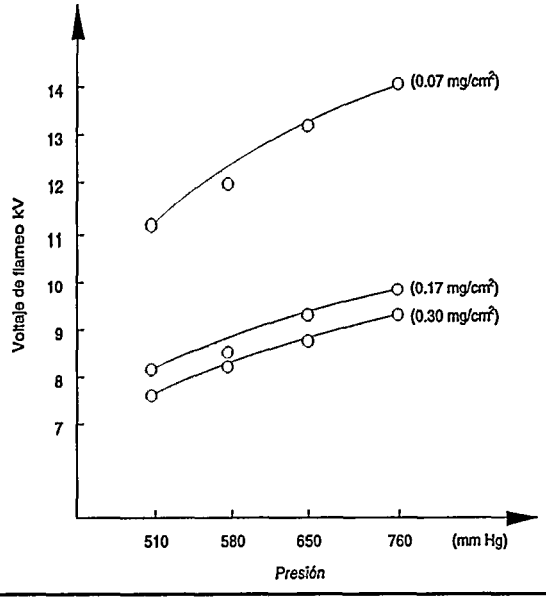
notorio en la superficie inferior. Dicho comportamiento se debe principalmente a la influencia del lavado natural que ejerce la lluvia sobre aisladores en la posición horizontal, ya que las partículas que se depositan en los aisladores por gravedad únicamente tienen los bordes del aislador para depositarse, lo cual no ocurre en el caso de las cadenas verticales y en V.

Con respecto al comportamiento eléctrico en laboratorio de cadenas de aisladores en las tres configuraciones, se ha obtenido poca consistencia en los resultados. Sin embargo, estos muestran que las cadenas en posición V son las que presentan el voltaje de flameo más alto de las tres configuraciones [Flugum, R. W., *et al*, 1971]. No obstante, el comportamiento en campo puede diferir de lo obtenido en laboratorio, debido a las características de autolavado de los aisladores, ya que en la posición horizontal el grado de acumulación de contaminantes es menor [CFE, 1990].

Efecto del perfil del aislador en la depositación del contaminante y en el voltaje de flameo

La distancia de fuga puede ser la solución a ciertos problemas de contaminación, sin embargo es necesario tomar en cuenta el perfil del aislador ya que la depositación y el voltaje de flameo están en función de la forma del aislador. En general, hay recomendaciones para utilizar un tipo de aislador específico con base en el tipo de contaminación. En ambientes marinos se recomienda instalar aisladores con una distancia de fuga protegida (tipo niebla), mientras que en el caso del polvo del suelo se recomiendan perfiles aerodinámicos (tipo disco). Con el fin de comprobar este comportamiento se presentan los resultados de pruebas en aisladores tipo niebla y aerodinámicos en ambiente salino y rural [Ramos, N. G., *et al*, 1995]. En efecto, los resultados muestran que en zonas costeras (Veracruz) el aislador tipo niebla colecta menos contaminación ya que en él se midió un DESD de 0.17 mg/cm², mientras que en el aerodinámico fue de 0.332 mg/cm². El aislador aerodinámico co-

FIGURA 9
Dependencia entre el VF y la presión en aisladores estándar IEEE disk.



lecta menos contaminante con respecto a uno de gran distancia de fuga en el caso de zonas alejadas de la costa donde la depositación además de contener polvo del suelo, sufre influencia industrial (Monterrey). El DESD en el aerodinámico expuesto durante un año fue de 0.38 mg/cm², mientras que en el tipo niebla fue de 0.47 mg/cm². Asimismo, el voltaje de flameo está en función del perfil del aislador, ya que perfiles con gran distancia de fuga dada por el número de faldones tendrán un voltaje de flameo más alto con respecto a un aislador con menor distancia de fuga.

Efecto de un ambiente ácido en el voltaje de flameo

La disolución del SO_2, óxidos de nitrógeno y CO_2 presentes en el medio ambiente tienden a bajar el pH de la lluvia. En algunos sitios del territorio nacional, donde la actividad industrial es muy intensa, se ha medido la acidez de la solución contaminante de los aisladores, encontrándose que el pH está en el rango ácido. De experimentación realizada en relación con el efecto de un ambiente ácido en el voltaje de flameo, se ha encontrado que éste se reduce y ello es más notorio en valores de pH menores a cuatro [Jianhui, Z., *et al*, 1993]. En un aislador estándar de 25 cm de diámetro el voltaje de flameo disminuye 1.5 kV cuando el pH cambia de siete a tres. En la figura 10 se muestra dicho efecto. Esto se debe a que a medida que el pH se incrementa, ocurre lo mismo en la conductividad y en la corriente de fuga, originando una reducción del voltaje de flameo.

Formación de yeso en los aisladores

Uno de los contaminantes que se han identificado con mucha frecuencia en aislamientos instalados en las líneas de transmisión y distribución es el yeso. Se ha detectado tanto en zonas costeras como en zonas tierra adentro cercanas a centros industriales. Ya que no se identificó su fuente de emisión, se supone que se forma en la superficie del aislador.

La formación de yeso en la superficie de los aisladores depende de varios factores. Entre los más importantes se pueden mencionar la concentración de contaminantes en el ambiente, la presencia de catalizadores, la temperatura y la humedad. Se consideran materiales catalizadores en el medio ambiente el NO_2, partículas de carbón y partículas de vanadio. Estos contaminantes ambientales aceleran la reacción entre el SO_2, el carbonato de calcio y dolomita, sales típicas identificadas en aisladores.

En la ciudad de Monterrey, por ejemplo, se ha monitoreado SO_2 en una concentración de 6.09 a 13.72 ppb. En el caso del NO_2 las concentraciones son de 19.54 a 42.36 ppb. También se identificaron en los aisladores partículas de carbón con un porcentaje de 4.5 a 12%. La formación del yeso puede ser por sulfatación a través de las siguientes reacciones:

A partir de la calcita presente en el aislador:

$$CaCO_3 + SO_2 + H_2O + O_2 \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + CO_2$$

Calcita = $CaCO_3$

En el caso de la dolomita, sal presente en el contaminante de Monterrey, se tiene la siguiente reacción:

$$CaMg(CO_3)_2 + 2SO_2 + H_2O + O_2 \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + MgSO_4.7H_2O + 2CO_2$$

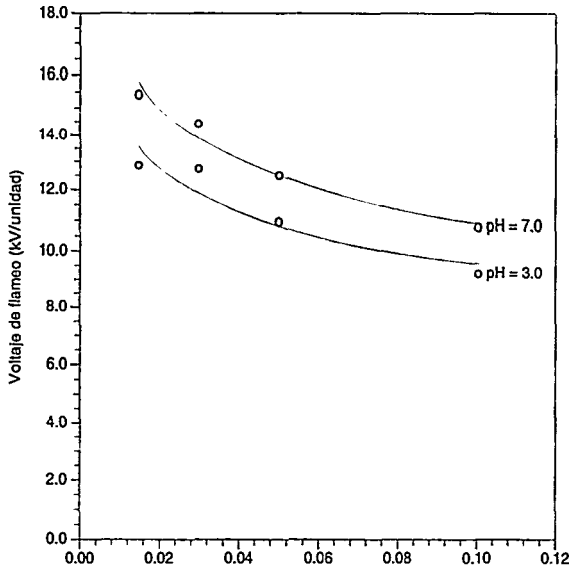
Dolomita = $CaMg(CO_3)_2$

Resumiendo, la formación del yeso en el aislador puede ser como sigue: inicialmente en el aislador se depositan partículas del suelo, entre ellos calcita y dolomita. El SO_2 ambiental reacciona con la calcita o dolomita y la humedad del medio ambiente y se forma el yeso.

En el caso de la dolomita además del yeso se obtiene también sulfato de magnesio y de los resultados de la caracterización el ión magnesio se identificó tanto en forma soluble como insoluble en el contaminante.

Asimismo, conforme el tiempo pasa, hay una mayor sulfatación, lo cual origina que la concentración de calcita disminuya en el aislador y la de yeso se incremente si se consideran las reacciones anteriores. Esta suposición se puede comprobar en los aisladores de la línea A3450, localizada en Monterrey, con 2.5 y 8 años de exposición. En el primer caso, la concentración de calcita en el aislador era de 40% y de yeso de 22% aproximadamente. En los aisladores con ocho

FIGURA 10
Relación entre el VF y nivel de contaminación DESD a un pH de 3 y 7.



años de exposición la concentración de calcita fue de 10.3% y de yeso fue de 55%.

Caracterización de la contaminación en zonas problemáticas

Se ha realizado la caracterización química del contaminante en varias líneas de la República Mexicana, tanto para definir la proporción y tipos contaminantes, como para reproducir esta contaminación en pruebas artificiales de laboratorio y proponer soluciones a las salidas de línea que se han presentado.

En la región noreste se determinó el contaminante característico en varias líneas. En esta zona la actividad industrial es intensa y está muy localizada. De las líneas analizadas se encontró que el contaminante está formado por un 79% de material insoluble constituido por cuarzo, calcita, yeso, dolomita y material orgánico. El material orgánico identificado estaba formado por compuestos aromáticos policíclicos de la familia del fenantreno. En aisladores de una línea dentro del corredor industrial de Hylsa se identificó 92% de óxidos de fierro. El contaminante soluble predominante en esta línea fue el sulfato de calcio dihidratado; su formación ya se comentó anteriormente. Los niveles de contaminación medidos se clasificaron como excepcionales (más de 0.48 mg/cm²). El tipo de contaminante en la zona estudiada se clasificó como rural con influencia industrial.

En Coatzacoalcos se estudiaron tres líneas, y se identificó que el 85% del contaminante es material insoluble, en su mayoría calcita y cuarzo; el contaminante soluble está formado principalmente por yeso, cloruro de sodio y sulfato de sodio. Los niveles de contaminación estuvieron en el rango de contaminación moderada (0.06-0.12 mg/cm²).

En el valle de México se caracterizó el contaminante de cuatro líneas de distribución. Una de ellas cercana a una zona cementera, el contaminante estaba formado por calcita, yeso y basanita. La cantidad de contaminante total en un aislador fue de 33 g, siendo el nivel de contaminación de 1.17 mg/cm² y de material insoluble de 15.85 mg/cm². El material soluble está formado principalmente por yeso. Las otras tres líneas estaban localizadas en las cercanías de una fábrica de productos químicos en el Gran Canal y en Indios Verdes. El contaminante predominante fue el insoluble con un 88%. Este contaminante era en su mayoría cuarzo y plagioclasas, que son compuestos del suelo; el contaminante soluble era yeso en las tres líneas, más cloruro de sodio en la fábrica de productos químicos y Gran Canal.

Mapa de contaminación de la República Mexicana

En general en México, dado la diversidad de climas y condiciones de contaminación, se ha logrado obtener gran cantidad de datos, y con su análisis se ha avanzado en el conocimiento y solución al problema y aunque el país es muy extenso y la contaminación es un fenómeno difícil de predecir, con base en la guía y procedimiento de diseño para aislamientos externos de líneas y subestaciones eléctricas expuestas en ambientes contaminados [CFE, 1990], en la estadística de fallas en el sistema eléctrico y en la experiencia del IIE, se presenta un mapa de niveles de contaminación de la República Mexicana.

Así, para el mapa de niveles de contaminación se hicieron las siguientes consideraciones.

(1) Dado las condiciones climatológicas y topográficas del país, la contaminación más severa se presenta en las zonas localizadas abajo del trópico de cáncer.

(2) En las zonas sobre el trópico de cáncer, la contaminación es más del tipo rural, polvo fino del suelo que se puede remover por las lluvias estacionales.

(3) En general, la contaminación en los aislamientos es marina o rural y hay zonas muy puntuales donde la contaminación es una combinación ya sea de marina o rural con industrial. En estas zonas, el contaminante predominante está formado por sales poco solubles mientras que en las zonas costeras, el material predominante es el cloruro de sodio.

(4) El viento es el factor más importante en la depositación de contaminantes sobre la superficie de los aisladores, por lo cual los sitios donde son fuertes y de varias direcciones, la contaminación es más severa.

Esto ocurre en zonas costeras y se encontró que en el Golfo de México, dada su forma cerrada, este fenómeno tiene más peso en comparación con el Océano Pacífico.

(5) La República Mexicana quedó dividida en cinco rangos de niveles de contaminación y un sexto donde no se realizaron mediciones (localizado en la parte desértica del estado de Sonora).

La zona 1 se caracteriza por un nivel de contaminación ligero; los vientos son moderados, usualmente hay lluvias estacionales; es montañosa, exceptuando las zonas industriales, y el contaminante en los aisladores proviene de las partículas del suelo.

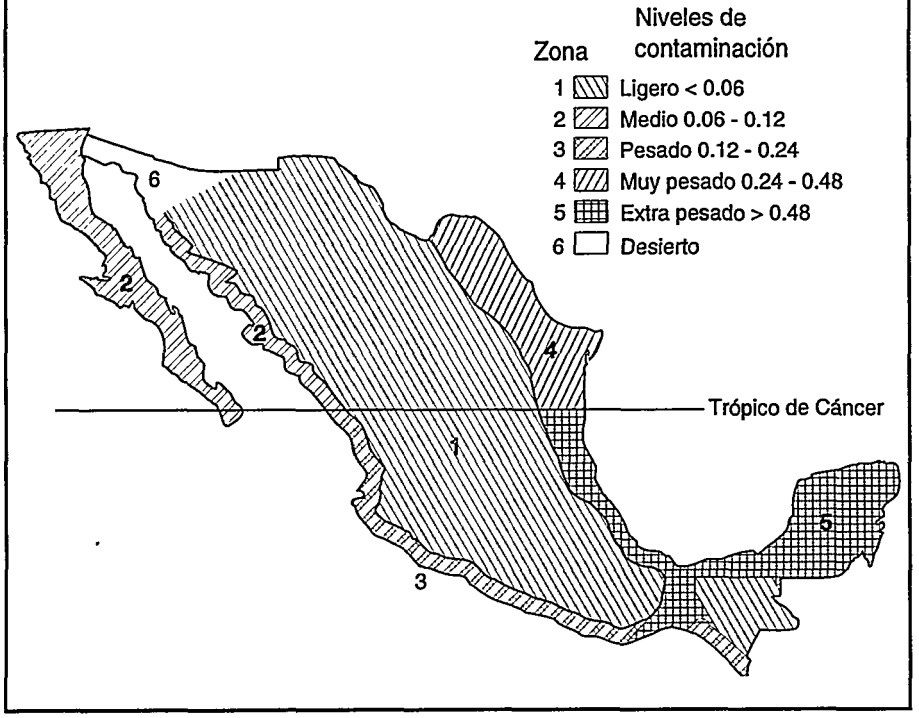
La zona 2 presenta un nivel de contaminación medio; los vientos son moderados tanto en las zonas costeras como tierra adentro; la contaminación en las zonas costeras es básicamente tipo marina; en las zonas tierra adentro es rural; hay poca lluvia; las industrias son poco contaminantes.

La zona 3 se caracteriza por un nivel de contaminación pesado; los vientos son fuertes y de una sola dirección; la contaminación es básicamente sal de mar; presenta lluvias estacionales; las industrias son grandes y muy puntuales; hay muchas regiones montañosas.

La zona 4, localizada en el Golfo de México arriba del Trópico de Cáncer, se caracteriza por tener un nivel de contaminación muy pesado, el cual se debe principalmente a los vientos fuertes del Golfo de México que en esa zona se presentan en una sola dirección; el periodo de lluvias es estacional; por lo regular la contaminación predominante es una combinación de marina e industrial o rural e industrial.

La zona clasificada como la más severa es la 5, la cual está sujeta a vientos muy fuertes provenientes del mar de varias direcciones y vientos del norte; se presentan lluvias estacionales; hay zonas sujetas a contaminación rápida, ``nortes´´; y con mucha industria; la contaminación es tipo marina y marina con influencia industrial; vientos fuertes; en las llanuras, la contaminación marina puede cubrir grandes extensiones.

FIGURA 11
Mapa de contaminación de la República Méxicana, DESD (mg/cm^2).



La sexta zona está localizada en el desierto de Sonora, es un territorio extremoso y debido a sus condiciones no se realizó una extrapolación de las demás regiones donde se realizaron mediciones.

En la figura 11 se presenta el mapa de niveles de contaminación de la República Mexicana.

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se presentó en forma resumida los factores predominantes que afectan el funcionamiento de las líneas en ambientes contaminados. El buen funcionamiento de una línea debe considerar la interacción de tales factores ya sea para solucionar un problema específico o para determinar el nivel de aislamiento. Así, se revisó el efecto tanto en la depositación como en el voltaje de flameo del tipo y nivel de contaminante, de su distribución entre superficies, longitud de la línea, altitud, lluvia ácida, campo eléctrico, configuración de cadena y el perfil del aislador. A partir de dichos parámetros se determinan factores de corrección que se deberán incluir en el diseño de una línea. En las pruebas de laboratorio algunos de estos factores son muy importantes para las pruebas y el análisis de resultados.

De los resultados presentados en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

Cuando el contaminante es muy diferente del identificado en una zona netamente marina, las mediciones del nivel de contaminación deben considerar la solubilidad de la sal predominante. Este factor también es importante en el fenómeno del flameo.

Se debe realizar el análisis químico del contaminante en el depósito del aislador, ya que considerar sólo el DESD puede dar resultados erróneos en el laboratorio. Esto es muy importante cuando se va a reproducir el contaminante para pruebas artificiales, ya que se ha encontrado que no todos los contaminantes identificados en México se pueden representar con caolín y cloruro de sodio como establece la norma IEC 507.

Después del cloruro de sodio, el contaminante que se ha identificado

con mayor frecuencia en las líneas de transmisión y distribución es el yeso. Dado que en la mayoría de los sitios no se identificó su fuente de emisión, se llegó a la conclusión de que este contaminante se forma en la superficie del aislador como resultado de la asociación entre el polvo del suelo, el SO_2 y el vapor de agua del medio ambiente.

Un cadena de aisladores sujeta al campo eléctrico acumulará más contaminante con respecto a una sin energizar. Aunque las pruebas que se han realizado en varios países al respecto no concuerdan entre sí, en México la proporción puede ser de hasta 60% más contaminante en el aislamiento energizado.

Las cadenas en configuración horizontal acumulan menos contaminante con respecto a las verticales o en V. Sin embargo, desde el punto de vista de flameo no se puede decir lo mismo, ya que las cadenas en V muestran el voltaje de flameo más elevado. Este comportamiento se debe principalmente al mecanismo de formación y extinción del arco eléctrico durante la etapa de preflameo.

Por último se presentó un mapa de niveles de contaminación. Cabe mencionar que este tipo de mapas se deben someter a revisión por lo menos cada cinco años, particularmente si hay cambios drásticos de las condiciones ambientales que rodean las instalaciones eléctricas sobre todo con un incremento de industrias.

Agradecimientos

Los autores agradecen los comentarios hechos sobre el presente trabajo al doctor Gaudencio Ramos, así como su colaboración en algunos de los tópicos que se presentan.

Referencias

Campillo, T., J. Montesinos y M. A. Ponce (1995), *Conductivity and flashover voltage of low-soluble materials deposited on high voltage insulators,* 9th ISH, del 28 de agosto al 1 de septiembre, Graz, Austria.

CFE (1994), ``Síntesis de fallas de líneas de transmisión 1994´´, Subdirección de Transmisión, Transformación y Control.

CFE (1990), ``Guía y procedimiento de diseño para aislamientos externos de líneas y subestaciones eléctricas expuestas en ambientes contaminados´´, Subdirección de Construcción, agosto.

De la O, A. y J. González (1991), *Performance of AC insulators under low pressure fog chamber tests,* 7th ISH, agosto 26-30, Dresden, Alemania.

EPRI (1975), *Transmission and distribution reference book,* Chapter 10.

Flugum, R. W. y J. A. Karcic (1971), *Effect of configuration on contaminated insulators string performance,* IEEE Winter Meeting, del 31 de enero al 5 de febrero, Nueva York, Estados Unidos.

IEC 507 (1991), *Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on a. c. systems,* second edition, Reference number CEI/IEC 507, 1991-04.

Jianhui Z., S. Caixin, S. Lichun y G. Leguan (1993), *Influence of acid fog on flashover performance of polluted insulators,* 8th International Symposium on High Voltage Engineering, agosto 23-27, Yokohama, Japón.

Ocampo, J. D. (1994), *Calculated prediction of flashover levels on polluted insulators at different altitudes,* MSc. Thesis, University of Salford, Reino Unido.

Ramos, G. (1992), ``Efecto del voltaje de corriente alterna en la depositación de contaminante´´, RVP-92, IEEE Sección México, julio.

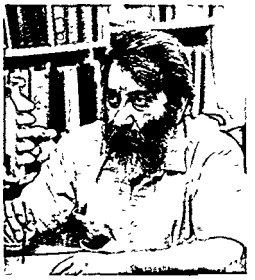
Ramos, G., T. Campillo, R. Díaz, P. Velázquez y V. Gerez (1995), *Results from field experiments on AC polluted insulators in México,* Stockolm Power Tech, junio 18-22.

MARÍA TERESA CAMPILLO RUIZ



Ingeniera química industrial del Instituto Politécnico Nacional (IPN) (1978), con maestría en ciencias de la Universidad de Salford, Gran Bretaña. Realizó una estancia técnica en EA Technology, Capenhurst, Inglaterra. Inició sus labores en el IIE en 1985 en el Departamento de Impacto Ambiental como responsable del Laboratorio de Análisis Químico donde estuvo involucrada con la caracterización de contaminantes de 23 estaciones de prueba en diferentes puntos de la República Mexicana. De 1991 a 1992 fue coordinadora del programa de cooperación técnica entre el IIE y la Universidad de Salford, durante el cual fungió como secretaria del Segundo Taller Eléctrico Internacional. *A partir de 1993 trabaja en el Departamento de Materiales, donde ha colaborado en proyectos para la CFE relacionados con la solución a problemas de contaminación en líneas aéreas. Ha impartido seminarios y cursos sobre contaminación en aislamientos externos y ha presentado varios artículos técnicos tanto nacionales como internacionales. Actualmente se desempeña como jefe de proyecto del área de aislamientos externos.*

MARCO ANTONIO PONCE VÉLEZ



Ingeniero y maestro en química por la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se incorporó al Instituto de Investigaciones Eléctricas como investigador en 1980. Actualmente es jefe del Departamento de Materiales de la División de Sistemas Eléctricos. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde 1987.

MX9800142

del pozo húmedo (PH). Entonces los no condensables, que se han movido considerablemente dentro del PH al principio del transitorio, pueden retornar al pozo seco y volver a entrar al sistema pasivo de enfriamiento.

Con respecto a los proyectos nucleares en el mundo, la situación se caracteriza por el estancamiento en Europa y los Estados Unidos y la actividad en la cuenca del Pacífico.

La economía es un gran obstáculo para el mayor desarrollo de esta fuente de energía, principalmente por la abundancia y el bajo costo del gas natural.

El fenómeno descrito se ha estudiado en pruebas de transitorias del sistema en el Paul Scherrer Institute de Suiza. Hasta ahora, el desempeño del sistema ha demostrado ser bastante "robusto". Las pruebas llevadas a cabo en el Paul Scherrer Institute son un esfuerzo de colaboración internacional muy amplio y es particularmente satisfactorio mencionar la participación del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en el proyecto.

El proyecto ALPHA

Este es otro proyecto que se lleva a cabo en el Paul Scherrer Institute. Actualmente, las actividades del proyecto ALPHA están centradas en investigación sobre el concepto de enfriamiento a largo plazo del contenedor del SBWR.

La principal instalación experimental del programa es PANDA, construida por este instituto suizo para simular la contención del reactor SBWR. Cuenta con las siguientes características generales de diseño: reducción de volúmenes a un grado compatible con la preservación de aspectos y fenómenos esenciales de escala; volúmenes anidados y complejos de compartimientos de la contención simulados mediante vasijas cilíndricas interconectadas, y multidimensionalidad representada por dos pozos secos y dos pozos húmedos, tres unidades de condensadores pasivos de la contención y un condensador de aislamiento.

Energía nuclear, situación presente

Con respecto a los proyectos nucleares en el mundo, la situación se caracteriza por el estancamiento en Europa y los Estados Unidos y la actividad en la cuenca del Pacífico.

La economía es un gran obstáculo para el mayor desarrollo de esta fuente de energía, principalmente por la abundancia y el bajo costo del gas natural.

La aceptación social y política es un prerrequisito para el desarrollo de la energía nuclear. Existen varios grados de aceptación alrededor del mundo, los cuales oscilan entre la alta aceptación y excelente soporte político en países como Francia hasta el rechazo prácticamente total de países como Italia.

El quemado de combustibles fósiles inevitablemente conduce al aumento del CO_2 en la atmósfera y a la preocupación por el calentamiento global del planeta. El interés público acerca del calentamiento global puede considerarse pobre, no obstante que ha aumentado el potencial de que ocurra una catástrofe mundial.

Los factores técnicos que podrían afectar el futuro de la energía nuclear están relacionados con la excesiva presencia de materiales fisionables (a partir del desmantelamiento de las armas nucleares) y la aspiración política de eliminar los inventarios de plutonio y uranio enriquecido, posiblemente mediante su quemado en reactores nucleares.

Desarrollos futuros-condiciones

El futuro del desarrollo nuclear claramente depende de la situación energética mundial (del crecimiento poblacional, consumo, industrialización, etcétera).

Los prerrequisitos para esto son:

1) Incremento en los precios del gas natural (posiblemente reflejando el precio actual del combustible más que el interés político y comercial de corto plazo) o una mayor preocupación acerca de las consecuencias potenciales de un calentamiento global de la tierra.

El futuro del desarrollo nuclear claramente depende de la situación energética mundial (del crecimiento poblacional, consumo, industrialización, etcétera).

El gas natural afecta menos a la atmósfera por unidad de energía producida. Para alcanzar una reducción anual de 1.5 por ciento de las emisiones de CO_2 (necesaria para estabilizar la situación climática) se necesitaría un desplazamiento masivo de carbón por gas natural. Esta sustitución requeriría un incremento anualizado del consumo de gas natural de 6.3 por ciento, es decir, triplicar el nivel del crecimiento en el consumo actual de gas (2.1 por ciento).

2) Una operación cada vez más económica y segura de las plantas nucleares de potencia.

3) Aceptación política.

4) Aceptación social, ahora obstaculizada por una obsesión relacionada con los desechos nucleares. La seguridad de los reactores que no se fundamente en la evacuación de la población incrementaría posiblemente la aceptación social de la energía nuclear. La aceptación podría lograrse mediante el aumento de la preocupación acerca del calentamiento global del planeta (probablemente precipitada por alguna señal, real o aleatoria, que indique un probable calentamiento local y sus potenciales efectos catastróficos) y también por el desencanto acerca de la promesa de que las energías alternas abarquen una parte considerable de la producción mundial de electricidad.

Traducción y redacción de Alan Sandoval A., del Departamento de Difusión Tecnológica.

Desarrollo e implantación de una metodología experimental para determinar simultáneamente las propiedades térmicas de las rocas

Enrique Contreras López y
Alfonso García Gutiérrez

Resumen

En el marco de las actividades de desarrollo de infraestructura experimental del Laboratorio de Yacimientos del Departamento de Geotermia del IIE, se implementó una metodología que permite determinar simultáneamente la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico en muestras de rocas y otros materiales sólidos de conductividad baja e intermedia. La metodología se basa en la solución teórica de la distribución de temperatura alrededor de una fuente lineal ideal de calor inmersa en un medio infinito. Las tres propiedades se derivan de un solo experimento relativamente simple, que consiste esencialmente en registrar la variación temporal de la temperatura en un punto dado del espécimen durante un corto periodo de calentamiento. Esta metodología tiene especial aplicación en el ámbito de la geotermia, así como en otras áreas relacionadas con el desarrollo y aprovechamiento de los recursos energéticos y minerales del subsuelo.

Introducción

La conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de las rocas constituyen un grupo de propiedades cuyo conocimiento es importante para muchas aplicaciones relacionadas con la localización, la evaluación y la explotación de los recursos energéticos del subsuelo, así como en otras áreas de interés científico y tecnológico que involucran la participación de formaciones geológicas. Por ejemplo, para determinar el flujo de calor terrestre se requiere conocer la conductividad térmica de las rocas intervinientes, además del gradiente geotérmico local. Puesto que la difusividad térmica es el parámetro controlador en la conducción de calor en régimen transitorio, el conocimiento de esta propiedad es fundamental para estudiar y modelar los efectos asociados con fenómenos tales como inyección de diques, intrusión de cuerpos magmáticos, extracción de energía de masas de roca seca caliente y depósito de desechos radiactivos de alto nivel en almacenes subterráneos.

Como se conoce, la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de un medio están relacionados mediante la expresión:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \qquad [1]$$

Suponiendo que se conoce la densidad total del medio, de la ecuación anterior se infiere que cualquiera de las tres propiedades térmicas involucradas puede determinarse si se conocen los valores de la otras dos. De esta manera, la medición experimental directa de cualquier pareja de estas propiedades conduce a la determinación indirecta de la tercera.

En el presente trabajo se describe un método experimental que se desarrolló en el Laboratorio de Yacimientos del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para determinar directamente la conductividad y la difusividad térmica en muestras de roca. La técnica se basa en la solución teórica para la distribución de temperaturas alrededor de una fuente lineal ideal de calor inmersa en un medio infinito. Ambas propiedades se obtienen a partir de un experimento relativamente simple, que consiste esencialmente en registrar la temperatura durante un corto periodo de calentamiento como función del tiempo en un punto

pase a la página 169

La conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de las rocas constituyen un grupo de propiedades cuyo conocimiento es importante para muchas aplicaciones relacionadas con la localización, la evaluación y la explotación de los recursos energéticos del subsuelo, así como en otras áreas de interés científico y tecnológico que involucran la participación de formaciones geológicas.

viene de la página 164

del espécimen. También se describe un sistema experimental que se implementó para aplicar esta metodología. Se detallan además los procedimientos para efectuar los ensayos y para reducir los datos primarios hasta obtener los valores de las propiedades térmicas de la roca. La exactitud y la reproducibilidad del método se evaluaron mediante mediciones en materiales estándar. Los resultados de las pruebas de validación demuestran que la conductividad y la difusividad pueden medirse con una reproducibilidad de ±2% y una exactitud de ±3%.

El modelo matemático del método

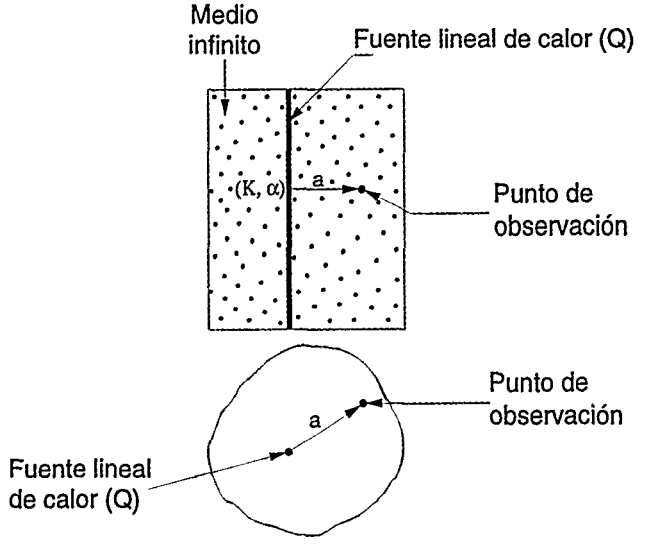
El modelo matemático en el que se fundamenta el método experimental fue desarrollado por Jaeger (1959) a partir de la solución analítica de la ecuación de conducción de calor para el caso de un medio infinito dentro del cual está inmersa una fuente lineal ideal, la cual emite calor uniformemente en toda su longitud con una rapidez de generación constante (figura 1). En este sistema, la elevación de temperatura $T(a,t)$ al tiempo t medido a partir del inicio del calentamiento en un punto situado a una distancia radial a de la fuente de calor está dado por [Carslaw, H. S. *et al*, 1959:

$$T(a,t)=\frac{Q}{(4\pi K)}\,E_1\left[\frac{a^2}{4\alpha t}\right] \qquad [2]$$

en donde:

FIGURA 1

Representación de las variables que intervienen en la distribución de temperatura alrededor de una fuente lineal ideal de calor.



$$E_1(x)=\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u}\,du = -\gamma - ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n x^n}{n\,n!} \qquad [3]$$

es la integral exponencial de primer orden, la cual se encuentra tabulada [Abramowitz y Stegun, 1964].

Siguiendo el desarrollo del modelo tal como lo presenta Jaeger (1959), de la ecuación 2 se obtiene la siguiente expresión para la relación del aumento de temperatura en un punto dado para dos diferentes tiempos t y $2t$:

$$\frac{T(a,2t)}{T(a,t)}=\frac{E_1\left(\frac{a^2}{8\alpha t}\right)}{E_1\left(\frac{a^2}{4\alpha t}\right)} \qquad [4]$$

El miembro derecho de la ecuación 4 es de la forma:

$$G(x)=\frac{E_1(x)}{E_1(2x)} \qquad [5]$$

en donde:

$$x=\frac{a^2}{8\alpha t} \qquad [6]$$

Las ecuaciones 2 y 4 constituyen el modelo matemático del método experimental para determinar simultáneamente la conductividad y la difusividad. Al menos desde el punto de vista conceptual, el empleo de este modelo es bastante sencillo, según se describe a continuación. A partir del registro experimental temperatura-tiempo se determinan los valores de la relación $T(2t)/T(t)$ para diferentes valores del tiempo t. Puesto que estos valores deben estar gobernados por la ecuación 4, mediante el empleo de la función teórica $G(x)=E_1(x)/E_1(2x)$ puede determinarse el valor del argumento $x=a^2/8\alpha t$ para cada uno de los valores de la relación $T(2t)/T(t)$. Ello es posible dado que la función $G(x)$ es univaluada, es decir, a cada valor del argumento x corresponde un valor único de la función $G(x)$ y viceversa. La función $G(x)$ puede obtenerse fácilmente ya sea a partir de valores tabulares o de expresiones polinomiales para la integral exponencial de primer orden.

Una vez que se ha determinado el argumento x de la manera indicada, la difusividad térmica se calcula mediante la expresión:

$$\alpha=\frac{a^2}{8xt} \qquad [7]$$

El conocimiento de la historia temperatura-tiempo en un punto dado también permite la determinación de la

conductividad térmica del material. En efecto, despejando de la ecuación 2 la conductividad térmica y teniendo en cuenta que $(a^2/4\alpha t)=2x$, de conformidad con la notación adoptada, se obtiene:

$$K = \frac{Q}{4\pi T(a,t)} E_1(2x) \qquad [8]$$

Debe notarse que desde el punto de vista conceptual del empleo del método, para determinar la difusividad y la conductividad del material se necesita efectuar el procedimiento descrito para solamente un valor cualquiera de la relación $T(2t)/T(t)$, y que los valores así obtenidos para estas propiedades deben ser independientes del tiempo t que se considere. Asimismo, cabe hacer notar que en la determinación de la difusividad no interviene la intensidad de la fuente lineal de calor, mientras que en la determinación de la conductividad no interviene la distancia entre el punto de medición de la temperatura y la fuente de calor.

El sistema experimental

El diseño y la integración del sistema experimental se conforman con una serie de lineamientos definidos por el modelo matemático del método de medición. La teoría del método indica que el sistema experimental debe ser tal que permita la realización de dos funciones básicas: (1) aplicar a la muestra de roca una perturbación térmica consistente en la generación de calor con intensidad constante a lo largo de una línea contenida en la muestra, con medición simultánea de la intensidad de generación de calor por unidad de longitud; (2) medir y registrar como función del tiempo el incremento de la temperatura producido por la perturbación térmica en un punto localizado a una distancia conocida de la fuente de calor. Para realizar la primera función se emplea lo que en adelante se denomina como el sistema de calentamiento, mientras que para efectuar la segunda función se necesita un sistema de medición y registro de temperatura. En la figura 2 se muestra el esquema de conjunto del sistema experimental resultante de la integración de los sistemas de calentamiento y de medición de temperatura.

FIGURA 2

Diagrama esquemático de bloques del sistema experimental.

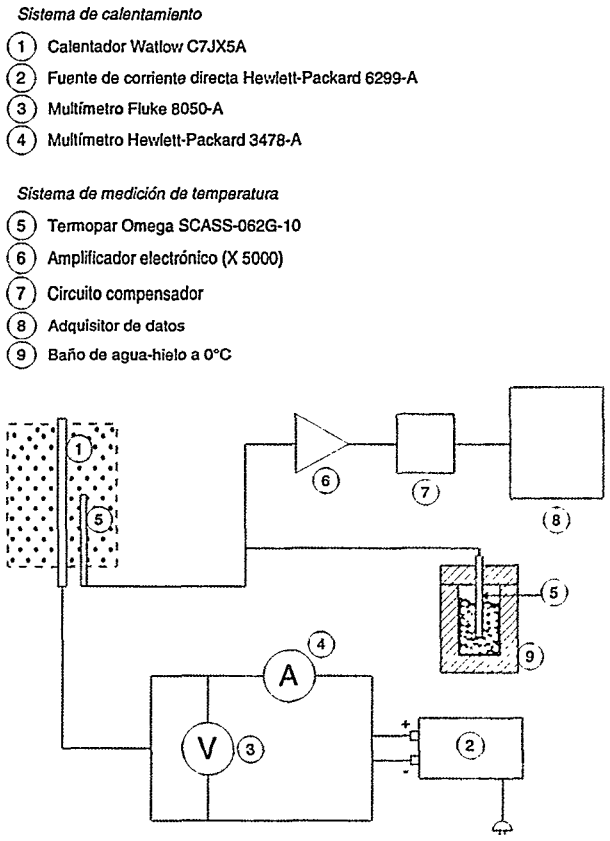
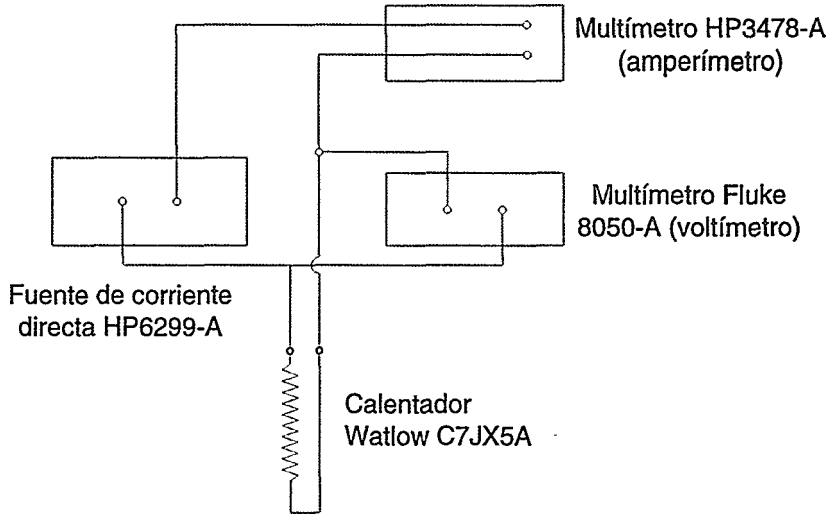


FIGURA 3

Diagrama de interconexión de los componentes del sistema de calentamiento.



Subsistema de calentamiento

Los componentes del sistema de calentamiento son un calentador de resistencia eléctrica, una fuente de corriente directa y dos multímetros digitales. El diagrama de la interconexión de estos componentes se muestra en la figura 3.

El calentador desempeña en el sistema experimental la función de la fuente lineal de calor del modelo

conceptual. La relación entre la longitud calentada y el diámetro del calentador es igual a 36. Blackwell (1954) ha demostrado que fuentes de calor reales con relación de longitud a diámetro mayor o igual que 30 se comportan para fines prácticos como una fuente de calor lineal ideal (relación longitud a diámetro infinita), tal como lo requieren las bases conceptuales del método de medición. La resistencia del calentador es típicamente del orden de 155 ohms; el voltaje máximo a que puede operarse es de 120 volts, lo que da una potencia total máxima de aproximadamente 90 watts. Una característica de este calentador que es de suma importancia para el método experimental consiste en que su resistencia eléctrica no varía con la temperatura; esto permite que al alimentar al calentador una corriente eléctrica de intensidad constante, se obtenga una fuente lineal de calor de intensidad constante, tal como lo requiere el modelo conceptual del método. La corriente eléctrica de intensidad constante se aplica al calentador mediante la fuente de corriente directa.

Para determinar la potencia disipada por unidad de longitud en el calentador (parámetro Q en el modelo conceptual del método), se necesita medir con muy buena exactitud la caída de voltaje a través del calentador o bien la intensidad de la corriente circulante. En el presente caso se implementó la capacidad de medir directamente tanto la caída de voltaje como la intensidad de la corriente circulante. La caída de voltaje se mide con una exactitud de 0.01 volts mediante el multímetro FLUKE, mientras que la intensidad de la corriente se mide con una exactitud de 0.001 amps mediante el multímetro que se conecta en serie con el calentador.

Subsistema de medición y registro de temperatura

En la figura 4 se muestra el diagrama de interconexión de los componentes del sistema de medición y registro de temperatura. Los principales componentes del sistema son dos termopares, un dispositivo para generar físicamente el punto de referencia térmico a 0°C, un banco de amplificadores electrónicos, un circuito compensador de voltaje y un sistema computarizado de adquisición de datos.

Los termopares son tipo K (cromel-alumel) de 10" de longitud y 1/16" de diámetro exterior, con la junta sensora soldada a la pared interna de la cubierta protectora con objeto de mejorar la respuesta del termopar (termopar tipo *grounded*). Uno de los termopares se emplea para sensar la temperatura en la muestra de material, mientras que el otro queda inmerso en el baño de hielo y agua destilada para constituir el punto de referencia térmico.

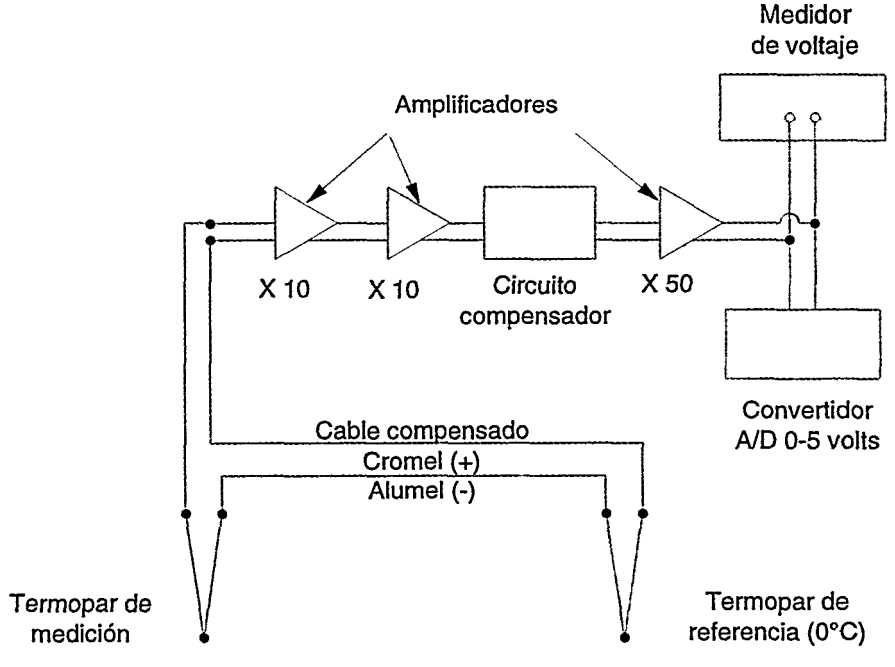
En el presente trabajo se describe un método experimental que se desarrolló en el Laboratorio de Yacimientos del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para determinar directamente la conductividad y la difusividad térmica en muestras de roca.

El sistema de adquisición de datos que se utiliza para registrar la temperatura como función del tiempo funciona con base en un convertidor analógico-digital que acepta voltajes en el rango de 0 a 5 volts, con una resolución de ±0.002 volts (2,000 μ-volts). La etapa de amplificación se constituyó conectando en serie tres amplificadores, los dos primeros con una ganancia nominal de 10 cada uno y el tercero con una ganancia nominal de 50, obteniéndose así una relación nominal de amplificación total igual a 5000. De esta manera, la banda de resolución de 0.002 volts del convertidor A/D permite el logro de una excelente resolución de 0.01°C para el sistema de medición de temperatura en conjunto.

Con la relación de amplificación total igual a 5000 y considerando una FEM del termopar de 40 μvolt por cada

FIGURA 4

Diagrama de interconexión de los componentes del sistema de medición de temperatura.



grado centígrado, un incremento de 0.2 volts en el voltaje de entrada al convertidor A/D representa un incremento de 1°C en la temperatura sensada por el termopar emplazado en la muestra; esto es, la relación de conversión que emplea el sistema de adquisición de datos para convertir el voltaje de entrada al convertidor en grados centígrados de incremento de temperatura es 5°C/volt.

Para la captura y el almacenamiento de los datos temperatura-tiempo se hace uso de un adquisitor computarizado que opera bajo el control de un programa de adquisición de datos. La frecuencia máxima de captura de datos que puede alcanzarse es de tres eventos por segundo, lo que cubre holgadamente los requerimientos al respecto para los fines de aplicación del método experimental. El programa genera un archivo de datos que consiste en dos columnas: en la primera figura el tiempo transcurrido a partir del inicio del calentamiento y en la segunda, el correspondiente incremento de temperatura sensado por el termopar emplazado en la muestra.

Procedimiento de aplicación del método

Obtención de los datos temperatura-tiempo

El procedimiento típico para generar los datos primarios temperatura-tiempo es como se describe a continuación. Haciendo las veces de medio infinito se emplea una muestra de aproximadamente 10 cm de diámetro por 12 cm de longitud. Un calentador de resistencia eléctrica de 0.32 cm (1/8") de diámetro por 11.5 cm de longitud se inserta ajustadamente dentro de un barreno de aproximadamente igual diámetro que se taladra paralelamente al eje axial de la muestra y al centro de su sección transversal. Este calentador desempeña satisfactoriamente en el sistema experimental la función de la fuente lineal ideal de calor que estipula el modelo conceptual del método. A una distancia radial de aproximadamente 1.3 cm del centro del barreno del calentador se inserta un termopar en un barreno de 0.16 cm (1/16") de diámetro por 5 cm de profundidad. El termopar se dispone de manera que la junta sensora del mismo quede en contacto directo con el material del fondo del barreno. Se le aplica energía eléctrica al calentador en la forma de corriente directa de intensidad constante, durante un lapso que normalmente es de tres a cinco minutos. Durante este tiempo se mide y registra continuamente el aumento de temperatura como función del tiempo en el punto de emplazamiento del termopar, obteniéndose de esta manera la historia temperatura-tiempo requerida para determinar las propiedades térmicas del material. Simultáneamente a lo anterior, se monitorea la caída de voltaje a través del calentador y de ser factible, también se monitorea y se mide la intensidad de la corriente eléctrica circulante. Conociendo cualquiera de estos parámetros eléctricos del experimento junto con la resistencia del calentador y su longitud calentada, se calcula la intensidad de la fuente (potencia disipada por unidad de longitud), con lo que se obtienen todos los datos experimentales requeridos para aplicar el método.

Reducción de los datos temperatura-tiempo

Aquí se describe con la ayuda de un ejemplo real el procedimiento de aplicación práctica del método para determinar las propiedades térmicas a partir de un registro temperatura-tiempo. El procedimiento práctico de reducción de los datos primarios temperatura-tiempo es una adaptación del procedimiento conceptual, el cual se ha ideado con la finalidad de suavizar y promediar los efectos perturbatorios de las desviaciones normalmente esperables del fenómeno experimental con respecto a su modelo teórico. Para ilustrar la descripción del procedimiento práctico de reducción de los datos experimentales se usan los datos temperatura-tiempo que se obtuvieron en un ensayo efectuado en una muestra de roca arenisca Berea:

1. A partir de los datos primarios temperatura-tiempo del experimento se genera una columna de valores $T(nt_o)$ para valores de n=1,2,3,4... hasta un valor $n_{máx}=t_T/t_o$, en donde t_T es el intervalo total de captura de los datos y t_o es un intervalo de tiempo de referencia, cuyo valor se selecciona dependiendo del tiempo total y de la frecuencia de captación de datos. Un valor de t_o entre dos y cuatro segundos es adecuado cuando la frecuencia es de 60 puntos-dato por minuto y el tiempo total es de tres a cinco minutos. La segunda columna del cuadro 1 muestra los valores $T(nt_o)$ generados a partir de la historia temperatura-tiempo del caso ejemplo. La duración del experimento fue de tres minutos, mientras que la frecuencia de captura de datos fue de aproximadamente 60 veces por minuto. El tiempo t_o involucrado en la generación del cuadro 1 es 4.064 segundos, que equivale al intervalo de tiempo entre cuatro puntos-dato.
2. Se forma la relación de temperaturas $T(2nt_o)/T(nt_o)$ desde n=1 hasta $n=n_{máx}/2$, con lo que se genera la columna número 3 del cuadro de reducción de datos.

El diseño y la integración del sistema experimental se conforman con una serie de lineamientos definidos por el modelo matemático del método de medición.

3. Se determina el argumento (x) correspondiente a cada uno de los valores $T(2nt_o)/T(nt_o)$ de la función $G(x)$ definida por la ecuación 5. Una forma de efectuar este paso es mediante el empleo de una gráfica de la función teórica $G(x)$. Con los valores del argumento x así obtenidos se genera una cuarta columna (ver cuadro 1), que representa conforme a la ecuación 6 los valores del grupo $(a^2/8\alpha nt_o)$.
4. Se multiplica cada valor de x de la cuarta columna por su correspondiente valor de n en la primera columna, obteniéndose como resultado una quinta columna de valores del grupo $(a^2/8\alpha t_o)$.
5. Se analiza la columna generada en el paso 4 para identificar el intervalo en el cual los valores del grupo $(a^2/8t_o)$ permanecen constantes dentro de las fluctuaciones aleatorias que normalmente cabe esperar debido a la na-

CUADRO 1

Caso ejemplo que ilustra el procedimiento de reducción de los datos experimentales temperatura-tiempo hasta obtener la conductividad y la difusividad térmica y el calor específico.

COL. 1	COL. 2	COL. 3	COL. 4	COL. 5	COL. 6	COL. 7	COL. 8
n	$T(nt_o)$	$\frac{T(2nt_o)}{T(nt_o)}$	$x=\frac{a^2}{8\alpha nt_o}$	$\frac{a^2}{8\alpha t_o}$	$z=\frac{a^2}{4\alpha nt_o}$	$E_1(Z)$	$\frac{Q}{4\pi K}=\frac{T(nt_o)}{E_1(Z)}$
1	0.0031	8.0000	1.5390	1.5390	3.0781	0.0118	0.2623
2	0.0248	7.9919	1.5381	3.0762	3.0762	0.0118	0.2623
3	0.0773	6.5149	1.3456	4.0367	2.6912	0.0194	3.9837
4	0.1982	4.1564	0.9318	3.7271	1.8636	0.0592	3.3504
5	0.3436	3.3417	0.7321	3.6607	1.4643	0.1055	3.2570
6	0.5036	2.8773	0.5994	3.5961	1.1987	0.1587	3.1728
7	0.6646	2.5960	0.5114	3.5797	1.0228	0.2112	3.1468
8	0.8238	2.4179	0.4526	3.6206	0.9052	0.2579	3.1946
9	0.9875	2.2612	0.3987	3.5887	0.7975	0.3120	3.1649
10	1.1482	2.1445	0.3574	3.5740	0.7148	0.3635	3.1591
11	1.2929	2.0714	0.3309	3.6403	0.6619	0.4021	3.2152
12	1.4490	1.9782	0.2966	3.5588	0.5931	0.4607	3.1451
13	1.5847	1.9240	0.2763	3.5915	0.5525	0.5007	3.1649
14	1.7253	1.8740	0.2573	3.6022	0.5146	0.5424	3.1806
15	1.8600	1.8332	0.2417	3.6251	0.4833	0.5805	3.2042
16	1.9919	1.7836	0.2225	3.5603	0.4450	0.6324	3.1496
17	2.1054	1.710	0.2176	3.6991	0.4352	0.6468	3.2549
18	2.2329	1.7302	0.2016	3.6292	0.4032	0.6970	3.2037
19	2.3493	1.7077	0.1928	3.6630	0.3856	0.7272	3.2307
20	2.4623	1.6858	0.1841	3.6822	0.3682	0.7588	3.2451
21	2.5689	1.6665	0.1764	3.7051	0.3529	0.7885	3.2581
22	2.6781	1.6420	0.1667	3.6664	0.3333	0.8289	3.2307
23	2.7730						
24	2.8664						
25	2.9635						
26	3.0490						
27	3.1500						
28	3.2332						
29	3.3319						
30	3.4097						
31	3.4885						
32	3.5528						
33	3.6498						
34	3.7286						
35	3.8049						
36	3.8633						
37	3.9406						
38	4.0120						
39	4.0824						
40	4.1510						
41	4.2061						
42	4.2811						
43	4.3391						
44	4.3975						

turaleza experimental del fenómeno. A continuación se calcula el promedio de los valores del grupo en este intervalo de relativa invariabilidad, se asigna este valor promedio al grupo ($a^2/8\alpha t_o$) y se despeja el valor de la difusividad térmica. Para el caso ejemplo se aprecia que el grupo ($a^2/8\alpha t_o$) adquiere valores esencialmente constantes en el intervalo desde n=5 hasta n=22, con un valor medio de 3.6246 y una desviación estándar de 0.0465. De este valor medio y teniendo en cuenta que a=12.7 mm y t_o=4.064 segundos se obtiene el valor de 1.37 mm²/seg para la difusividad térmica.

6. Los valores de la columna número 4 se multiplican por un factor de dos, con lo que se genera la columna número 6 de valores del grupo ($a^2/4\alpha t_o$).

7. Se determina el valor de la función E_1 tomando como argumento cada uno de los valores de la columna número 6. Se genera de esta manera la columna número 7 con valores de la función $E_1(a^2/4\alpha t_o)$. Para efectuar esto pueden utilizarse tablas o gráficas de la función integral exponencial de primer orden.

8. Se genera una columna número 8 dividiendo cada valor de la columna número 2, desde n=1 hasta $n=n_{máx}/2$, por el valor que le corresponde en la columna número 7 para la misma n. Se obtiene así una columna de valores del grupo $[T(nt_o)/E_1(a^2/4\alpha nt_o)]$. De conformidad con la ecuación 2, cada valor de este grupo es igual a $Q/(4\pi K)$, por lo que los valores del grupo deben coincidir entre sí dentro de un estrecho margen de fluctuación experimental.

9. Se analiza la columna número 8 para identificar el intervalo en el cual los valores del grupo $[T(nt_o)/E_1(a^2/4\alpha nt_o)]$ permanecen constantes dentro de las fluctuacio-

nes aleatorias que normalmente cabe esperar debido a la naturaleza experimental del fenómeno. A continuación se calcula el promedio de los valores del grupo $[T(nt_o)/E_1(a^2/4\alpha nt_o)]$ en este intervalo, se asigna al grupo $Q/(4\pi K)$ el valor promedio obtenido y finalmente se despeja el valor de la conductividad térmica. Para el caso ejemplo se observa que el valor del grupo $[T(nt_o)/E_1(a^2/4\alpha nt_o)]$ es esencialmente constante en el intervalo desde n=5 hasta n=22, con un valor medio de 3.1987 y una desviación estándar de 0.0402. De este valor, y teniendo en cuenta que para el experimento realizado L=0.1143 m (longitud del calentador), R=153.1 ohms y V=40.25 volts, se obtiene el valor de 2.30 watt/(m-°C) para la conductividad térmica.

10. Se determina el calor específico mediante la ecuación 1, para lo cual se debe conocer la densidad total de la roca. Para la roca del caso ejemplo se midió una densidad total de 2,300 kg/m³, resultando en consecuencia el valor de 0.731 KJ/(kg-°C) para el calor específico.

11. Como complemento de la reducción de los datos es recomendable comparar la historia temperatura-tiempo medida experimentalmente, con la historia temperatura-tiempo teórica que resulta de substituir en la ecuación 2 los valores de difusividad y conductividad obtenidos. De esta manera se puede hacer una valoración objetiva del grado en que el experimento se desarrolló conforme al modelo teórico en que se fundamenta el método de medición de las propiedades térmicas. La figura 5 muestra la comparación entre las historias temperatura-tiempo experimental y teórica para el caso ejemplo, en donde se aprecia la excelente concordancia entre ellas.

Validación del método

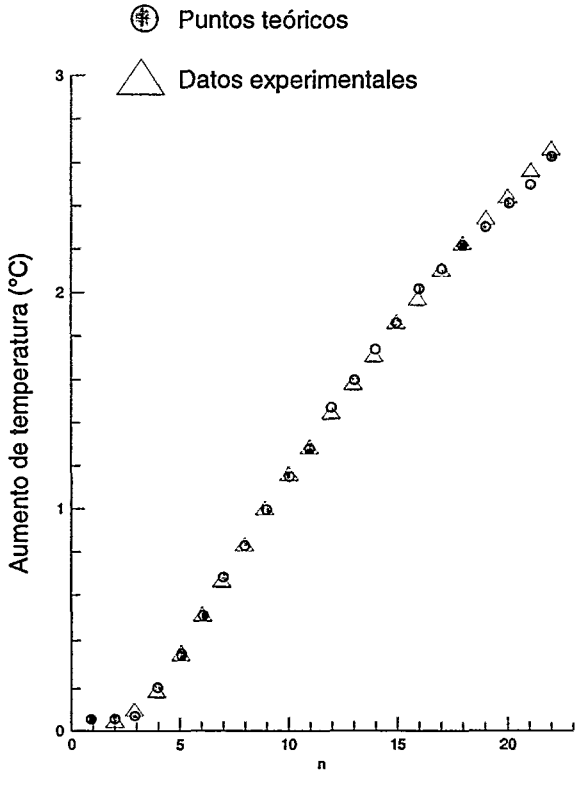
Los componentes del sistema de calentamiento son un calentador de resistencia eléctrica, una fuente de corriente directa y dos multímetros digitales.

La validación efectuada consistió en evaluar la exactitud y la reproductibilidad del método mediante la ejecución de una serie de mediciones en una muestra de cuarzo fundido. Debido a su pureza y homogeneidad, este material se usa ampliamente como estándar de referencia, ya que muchas de sus propiedades físicas, térmicas, mecánicas y ópticas están muy bien caracterizadas. Para la difusividad, la conductividad y la densidad total de dicho material existe un buen consenso acerca de sus valores a temperatura ambiente. Dentro de un rango razonable de discrepancia, los valores reportados en la literatura por diversos autores coinciden con los valores especificados por los principales fabricantes del material, como las compañías General Electric y United Fused Company. Los valores reportados por estos fabricantes son 1.38 watt/(m-°C) para la conductividad, 753 Joule/(kg-°C) para el calor específico, y 2,200 kg/m³ para la densidad total, de donde se obtiene un valor de 0.83 mm²/seg para la difusividad. Lindroth (1974) reporta como resultado de mediciones directas un valor de 0.85±0.06 mm²/seg para la difusividad del cuarzo fundido a la temperatura de 25°C, mientras que Touloukian *et al.* (1981) reportan un valor de 0.84 mm²/seg a 20°C para esta misma propiedad. Drury *et al* (1984) calcularon la difusividad del cuarzo fundido a partir de mediciones independientes de la conductividad, la difusividad y el calor específico, usando para esta última propiedad datos medidos calorimétricamente, así como datos proporcionados por el fabricante. Con uno y otro tipo de datos para el calor específico, los cálculos dieron para la difusividad los valores de 0.78 y 0.82 mm²/seg, respectivamente. Como parte de la validación de un método experimental para medir la difusividad térmica de rocas, Drury (1984) reporta haber efectuado 16 mediciones de la difusividad del cuarzo fundido, obteniendo de estas mediciones un valor medio de 0.82 mm²/seg con una desviación estándar de 0.03 mm²/seg.

Tomando como marco de referencia los datos descri-

FIGURA 5

Comparación entre las historias temperatura-tiempo teórica y experimental del caso ejemplo. Se aprecia una excelente concordancia entre los datos experimentales y los valores de temperatura predichos por la ecuación 2, calculados usando los valores de K y α determinados a partir del experimento.



CUADRO 2

Datos experimentales temperatura-tiempo correspondientes a seis eventos de medición realizados en una muestra de cuarzo fundido para evaluar la reproducibilidad y la exactitud del método ($t=nt_o$, en donde $t_o=4.132$ seg).

	Incremento de la temperatura °C					
n	*EVENTO 1*	*EVENTO 2*	*EVENTO 3*	*EVENTO 4*	*EVENTO 5*	*EVENTO 6*
1	0.0038	0.0017	0.0045	0.0100	0.0025	0.0033
2	0.0086	0.0059	0.0095	0.0130	0.0127	0.0078
3	0.0238	0.0318	0.0146	0.0238	0.0326	0.0245
4	0.0676	0.0854	0.0554	0.0669	0.0773	0.0815
5	0.1414	0.1623	0.1314	0.1408	0.1581	0.1392
6	0.2472	0.2717	0.2509	0.2596	0.2452	0.2610
7	0.3696	0.3823	0.3715	0.3961	0.3911	0.3856
8	0.5016	0.5340	0.5222	0.5211	0.5124	0.5350
9	0.6493	0.6693	0.6650	0.6778	0.6519	0.6438
10	0.8015	0.8190	0.7833	0.8226	0.7956	0.8173
11	0.9555	0.9675	0.9801	1.0067	0.9599	0.9780
12	1.1346	1.1307	1.1303	1.1468	1.1325	1.1468
13	1.2871	1.2836	1.2913	1.3145	1.2839	1.3009
14	1.4493	1.4458	1.4378	1.4553	1.4450	1.4662
15	1.5840	1.6030	1.5872	1.5703	1.6082	1.5936
16	1.7547	1.7517	1.7379	1.7420	1.7410	1.7522
17	1.8944	1.9045	1.9201	1.9201	1.9087	1.8030
18	2.0501	2.0494	2.0411	2.0300	2.0298	2.0367
19	2.2006	2.1927	2.1794	2.2095	2.2063	2.1836
20	2.3379	2.3384	2.3089	2.3224	2.3200	2.3122
21	2.4896	2.4732	2.5080	2.5122	2.4947	2.5180
22	2.6259	2.6227	2.6552	2.6236	2.6344	2.6389
23	2.7679	2.7649	2.7536	2.7676	2.7549	2.7681
24	2.9021	2.9044	2.8886	2.9066	2.8932	2.9105
25	3.0269	3.0360	3.0401	3.0235	3.0132	3.0379
26	3.1508	3.1750	3.1642	3.1699	3.1617	3.1741
27	3.2943	3.2921	3.3361	3.2845	3.3090	3.2976
28	3.3966	3.4246	3.4103	3.4338	3.4065	3.3910
29	3.5329	3.5462	3.5568	3.5481	3.5466	3.5346
30	3.6490	3.6695	3.6696	3.7095	3.7090	3.6735
31	3.7803	3.7973	3.8052	3.8236	3.8111	3.8214
32	3.9146	3.9106	3.9292	3.9547	3.9456	3.9139
33	4.0269	4.0384	4.0286	4.0468	4.0400	4.0213
34	4.1515	4.1540	4.1382	4.1436	4.1668	4.1325
35	4.2708	4.2719	4.3119	4.3122	4.2895	4.3242
36	4.3842	4.3842	4.3886	4.4023	4.3912	4.3778
37	4.5030	4.5016	4.5129	4.5315	4.5291	4.5080
38	4.6156	4.6114	4.6467	4.6283	4.6451	4.6224
39	4.7275	4.7392	4.7618	4.7650	4.7545	4.7300
40	4.8478	4.8503	4.8677	4.8827	4.8543	4.8326
41	4.9544	4.9572	4.9755	4.9867	4.9678	4.9889
42	5.0668	5.0740	5.0710	5.1208	5.0943	5.0685
43	5.1674	5.1715	5.1808	5.2262	5.1916	5.1864
44	5.2855	5.2883	5.3318	5.3454	5.2912	5.3040

tos en el párrafo precedente, se evaluó la exactitud y la reproductibilidad del método experimental. Con esta finalidad se efectuaron seis eventos independientes de determinación de la difusividad, la conductividad y el calor específico de una muestra de cuarzo fundido. Las mediciones se efectuaron en una muestra cilíndrica de 5 cm de diámetro por 10 cm de longitud. Para alojar el calentador lineal se taladró un barreno de 1/8" de diámetro a lo largo del eje axial de la muestra. Para emplazar el termopar se taladró otro barreno de 1/16" de diámetro y aproximadamente 5 cm de profundidad, también en dirección axial, con su centro a una distancia de 1.27 cm del centro del barreno para el calentador. Los parámetros experimentales fueron los mismos en todos los eventos: tiempo de calentamiento y registro de datos, tres minutos; frecuencia de captura de datos, aproximadamente 60 veces por minuto; intensidad de la corriente aplicada al calentador, 0.262 amps; resistencia del calentador, 153.90 ohms; longitud efectiva del calentador, 0.1143 m, e intensidad de la fuente lineal de calor, 92.43 watt/m.

En el cuadro 2 se muestran los datos experimentales primarios de los seis eventos en la forma de valores de incremento de temperatura contra el tiempo transcurrido a partir del inicio del calentamiento. Comparando los valores de temperatura correspondientes a iguales valores de tiempo para los seis eventos, se aprecia la excelente reproductibilidad del fenómeno físico, lo que permite fundamentar la expectativa de una buena reproductibilidad también en los valores de las propiedades térmicas a que conducen estos datos experimentales. La reducción de los datos experimentales de los seis eventos se efectuó utilizando un método computarizado que se desarrolló con base en el procedimiento antes descrito.

Los resultados que se determinaron para las propiedades térmicas del cuarzo en los seis eventos de medición se resumen en el cuadro 3. El valor medio y la desviación estándar de las determinaciones considerando los resultados de los seis eventos son respectivamente 0.81 y 0.01 mm²/seg para la difusividad, 1.39 y 0.02 watt/(m-°C) para la conductividad y 783 y 19.6 Joule/(kg°C) para el calor específico.

La excelente concordancia entre los valores de las propiedades térmicas obtenidas de los seis diferentes eventos de medición indican que con el método expuesto pueden efectuarse mediciones de la difusividad y de la conductividad con una reproductibilidad del orden de 2%. Por otra parte, si se toman como base de comparación los valores de conductividad y difusividad especificados por los fabricantes del cuarzo fundido 1.38 watt/(m°C) y 0.83 mm²/seg respectivamente, puede aseverarse que la exactitud del método está dentro de ±3% tanto en lo que respecta a la medición de la difusividad como a la medición de la conductividad.

Aquí se describe con la ayuda de un ejemplo real el procedimiento de aplicación práctica del método para determinar las propiedades térmicas a partir de un registro temperatura-tiempo.

CUADRO 3

Resumen de los valores determinados para las propiedades térmicas del cuarzo fundido a la temperatura de 25°C en los seis eventos de validación del método experimental.

Evento número	*Conductividad térmica watt/(m-°C)*	*Difusividad térmica mm²/seg*	*Calor específico Joule/(kg-°C)*
1	1.39	0.795	795
2	1.42	0.815	792
3	1.39	0.800	790
4	1.36	0.813	760
5	1.37	0.821	758
6	1.40	0.790	805
Promedio	1.388	0.806	783
Desviación estándar	0.021	0.012	19.6

Conclusiones

Se desarrolló, implementó y validó una novedosa técnica de medición que permite determinar simultáneamente, a partir de un experimento único y de rápida ejecución, la conductividad y la difusividad térmica y el calor específico de muestras de roca y otros materiales sólidos de conductividad baja e intermedia. Algunas de las principales ventajas de esta técnica son la factibilidad de determinar todas las propiedades térmicas del material empleando solamente una muestra y a partir de un experimento único, el reducido tiempo de ejecución del evento experimental y la relativa facilidad de su aplicación, la posibilidad de detectar anomalías en la aplicación del método, la excelente reproductibilidad y exactitud de las mediciones, así como la factibilidad de aplicar la técnica para medir las propiedades térmicas de muestras de roca sometidas a condiciones de alta presión y alta temperatura.

Nomenclatura

a distancia radial entre el punto de observación de la temperatura y la fuente lineal de calor.
C_p calor específico másico.
K conductividad térmica.
Q intensidad de la fuente lineal de calor (potencia disipada por unidad de longitud).
T aumento de temperatura al tiempo t en un punto situado a una distancia a de la fuente lineal de calor.
t tiempo transcurrido a partir del inicio del calentamiento.
α difusividad térmica.

Referencias

Abramowitz, M., e I. A. Stegun (1964) (editores), *Handbook of mathematical functions*, US Department of Commerce, Washington, D.C.

MX 9800143

Blackwell, J. H. (1954), "The axial flow error in the thermal conductivity probe", *Canadian Journal of Physics*, vol. 34, pp. 412-417.

Carslaw, H. S. y J. C. Jaeger (1959), *Conduction of heat in solids*, London, Oxford University Press, pp. 259-262.

Drury, M. J., V. S. Allen y A. M. Jessop (1984), "The measurement of thermal diffusivity of rock cores", *Tectonophysics*, 103, pp. 321-333.

Handbook of mathematical functions (1964), Abramowitz, M. e I. A. Stegun, (editores), US Department of Commerce, Washington, D. C.

Jaeger, J. C. (1959), "The use of complete temperature-time curves for determination of thermal conductivity with particular reference to rocks", *Australian Journal of Physics*, vol. 12, núm. 3, pp. 203-217.

Lindroth, D. P. (1974), *Thermal diffusivity of six igneous rocks at elevated temperatures and reduced pressures*, US Bur Mines, Rep. Invest. 7954, 33.

Physical properties of rocks and minerals (1981), Touloukian Y S. y C. Y. Ho (editores), McGraw-Hill/CINDAS Data Series on Material Properties, Nueva York.

ENRIQUE CONTRERAS LÓPEZ

Obtuvo la licenciatura en ingeniería mecánica en la Universidad de Guadalajara (1974). Realizó estudios de maestría en ingeniería mecánica con especialidad en termociencias en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Durante 1980 y 1981 realizó una estancia de entrenamiento y especialización en petrofísica en la Compañía Terratek, en Salt Lake City, Utah. Desde 1975 hasta 1980 fue profesor de tiempo completo y



coordinador de prácticas del Laboratorio de Máquinas Térmicas en la Sección de Termofluidos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En 1980 ingresó al Departamento de Geotermia del IIE, teniendo a su cargo el desarrollo de la disciplina de petrofísica dentro del área de ingeniería de yacimientos. Actualmente es el responsable técnico y administrativo del Laboratorio de Petrofísica y Mecánica de Rocas.

ALFONSO GARCÍA GUTIÉRREZ



Ingeniero químico de la Universidad Autónoma de Coahuila (1976) con maestría en ciencias, especialidad en termodinámica por la Universidad de Salford, Inglaterra (1978) y doctorado en ingeniería mecánica, especialidad en termociencias por la Universidad de Minnesota, Estados Unidos (1985). En 1979 ingresó al Departamento de Geotermia del IIE, en donde ha realizado para la CFE diversos proyectos de investigación y desarrollo. Es coautor de una novedosa técnica para estimar temperaturas imperturbadas de yacimiento. Cuenta con varias publicaciones y ha dictado conferencias y cursos de capacitación en el país y en el extranjero. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

SERIE ATLAS OCEANOGRÁFICO DEL GOLFO DE MÉXICO

Volúmenes I, II y III

La colección completa de la serie *Atlas Oceanográfico del Golfo de México* incluirá ocho volúmenes. Actualmente están a la venta los volúmenes I, II y III con un precio de $300.00 dólares c/u. El pago deberá acompañar todas las órdenes y deberá hacerse a nombre del Instituto de Investigaciones Eléctricas al tipo de cambio del dólar vigente a la fecha de compra.

Por favor complete lo siguiente:

Sr(a).:_____

Compañía:

_____

Dirección (calle y número, no apartado postal):

_____

_____

_____

CP, ciudad y estado:

_____

_____

_____

Teléfono/fax:

_____

Atención:

_____

_____

Número de volúmenes:

_____

Las órdenes deberán enviarse por escrito a:
Víctor M. V. Vidal L.
Grupo de Estudios Oceanográficos
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Apartado Postal 1-475
62001 Cuernavaca, Morelos, México.
Para comunicarse con el Dr. Vidal marque el teléfono (73) 18 38 11, extensiones 7541, 7542 o 7533; si prefiere, mande un fax al número (73) 18 98 54.



Sistema de análisis y monitoreo remoto de descargas atmosféricas

Eric Zabre Borgaro y Ma. Consuelo Rodríguez Padilla

Resumen

Se presenta el sistema de análisis y monitoreo de descargas atmosféricas (SAMDA) utilizado en la detección y registro de descargas atmosféricas (rayos) en un equipo electrónico que posteriormente transmite estos datos como procesamiento automático o por petición de un usuario desde una computadora, operando como estación remota. Asimismo, se describen las características del SAMDA, su evolución, los retos encontrados a lo largo del desarrollo de este proyecto y comentarios sobre posibles mejoras a equipos y registros de datos de esta naturaleza.

Antecedentes

A lo largo del tiempo, en las diferentes estaciones del año y en diversas latitudes de nuestro planeta, se ha observado e investigado el comportamiento de eventos eléctricos de la atmósfera, con especial interés en los fenómenos de descargas producidos por perturbaciones en el circuito tierra-ionósfera conocidos como rayos.

Muchos de estos disturbios incontrolables e inevitables ocasionan problemas y daños severos, y algunas veces irreversibles, a dispositivos de las redes eléctricas que prestan servicio de energía eléctrica, por lo que la preocupación por tales daños ha conducido a una serie de estudios y observaciones ambientales para recabar información que facilite la tarea de análisis estadísticos y determine las zonas de mayor afluencia de tormentas, con la finalidad de tomar acciones preventivas en equipos conectados a las redes eléctricas y minimizar pérdidas cuantiosas.

En 1983, el Departamento de Transmisión y Distribución del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), inició un proyecto que consistió en la operación de una red de 115 contadores de rayos distribuidos en todo el territorio nacional. Los contadores que se utilizaron en ese proyecto fueron los denominados contadores electromecánicos CIGRE-10 kHz, que recababan información únicamente sobre las descargas presentadas en una determinada fecha de lectura de la información dentro de un área delimitada por un círculo de 20 km de radio. A principios de 1992, el Departamento de Transmisión y Distribución contrató el desarrollo de un prototipo contador de descargas atmosféricas con un reloj integrado y memoria para registro de datos. Este prototipo, denominado contador de memoria, fue una modificación al contador electromecánico CIGRE. En marzo de 1995, se subcontrató al Departamento de Electrónica con el fin de llevar a cabo el rediseño de módulos electrónicos para el monitoreo de descargas atmosféricas. A mediados de 1995, el Departamento de Electrónica entregó al Departamento de Transmisión y Distribución un primer equipo con una serie de mejoras en sus características técnicas y funcionales iniciales. Asimismo, se desarrolló el *software* de una nueva estación de análisis y monitoreo remoto (EAMR) en computadora personal. Estos dos subsistemas principales integran el primer sistema de análisis y monitoreo de descargas atmosféricas (SAMDA) de su tipo. La figura 1 muestra la interconexión de los contadores en red.

En 1983, el Departamento de Transmisión y Distribución del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), inició un proyecto que consistió en la operación de una red de 115 contadores de rayos distribuidos en todo el territorio nacional.

Por otra parte, la arquitectura de los subsistemas se puede observar en la figura 2.

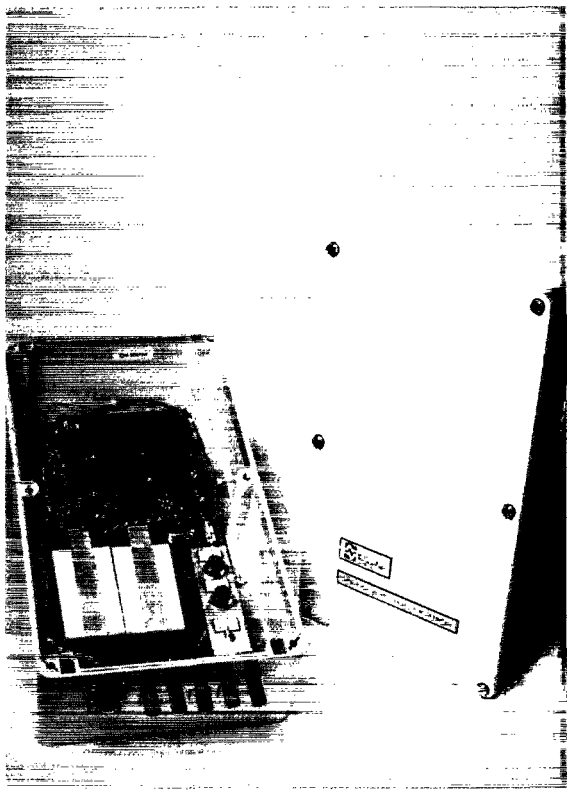


FIGURA 1
Interconexión de los contadores en red.

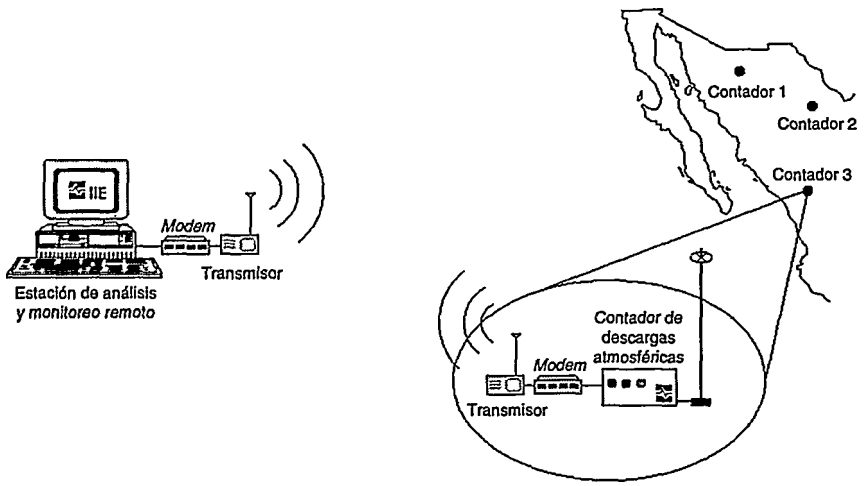
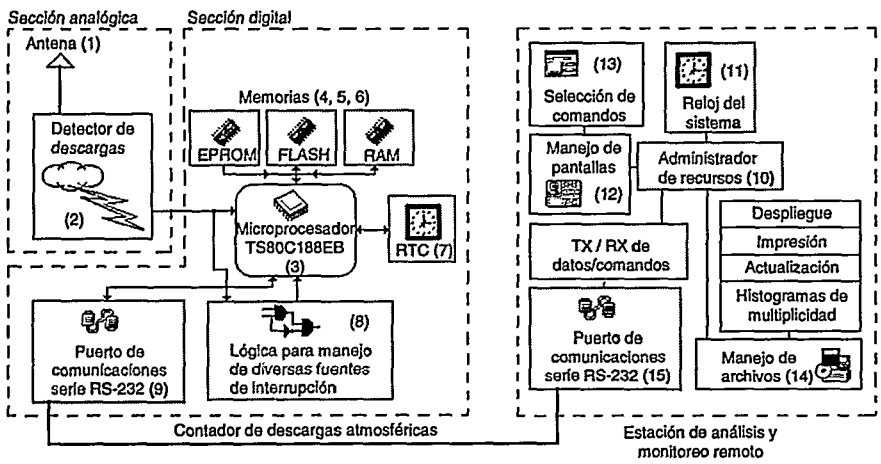


FIGURA 2
Arquitectura del SAMDA.



Descripción de los subsistemas y sus módulos

Contador de descargas atmosféricas

- Antena (1) para detección de rayos.
- Detector de descargas (2) cuya función es detectar rayos y generar un pulso de interrupción.
- Microprocesador (3) para la administración de recursos y ejecución del programa residente.
- Memoria *flash, eprom y ram* (4, 5, 6) para registro de eventos y datos.
- Reloj de tiempo real (7) y alarma de transmisión horas.
- Lógica para manejo de interrupciones (8).
- Puerto de comunicación serie (9).

Estación de análisis y monitoreo remoto

- Administrador de recursos (10) encargado de la ejecución de comandos por petición de usuario, manejo de archivos y atención al canal de comunicaciones.
- Reloj de sistema (11).
- Manejo de pantallas (12) para el despliegue y captura de parámetros de sistema.
- Validación de comandos (13).
- Manejo de archivos (14) interactivamente y actualización en disco de la computadora.
- Puerto de comunicación serie (15) para enlace con el contador.

A mediados de 1995, el Departamento de Electrónica entregó al Departamento de Transmisión y Distribución un primer equipo con una serie de mejoras en sus características técnicas y funcionales iniciales. Asimismo, se desarrolló el software *de una nueva estación de análisis y monitoreo remoto (EAMR) en computadora personal. Estos dos subsistemas principales integran el primer sistema de análisis y monitoreo de descargas atmosféricas (SAMDA) de su tipo.*

Estación de análisis y monitoreo remoto

La estación de análisis y monitoreo remoto (EAMR) se constituye físicamente por una computadora comercial y se considera como una herramienta desarrollada en PC para analizar datos recabados por un contador de descargas atmosféricas y monitorear su estado operativo. Se conecta a un contador por un canal de comunicaciones serie RS-232, con opción a transmisión por radio.

La función principal de la EAMR es comandar al contador de rayos y mostrarle al usuario en su pantalla los distintos comandos o funciones disponibles que puede enviar al contador.

La EAMR está diseñada en lengua-

je de programación *Turbo Pascal,* versión 7.0, apoyada en librerías de *Turbo Vision* de Borland bajo sistema operativo DOS. Su programación es orientada a objetos. La figura 3 muestra el desplegado típico de un submenú.

La función principal de la EAMR es comandar al contador de rayos y mostrarle al usuario en su pantalla los distintos comandos o funciones disponibles que puede enviar al contador.

Un ejemplo típico de datos recabados por un contador y almacenados en un archivo de la computadora es el siguiente:

Estación de monitoreo de descargas atmosféricas...
Contador núm. 15: Morelos
Lectura tomada el: 22/5/1995, 8:48:46

1	18/ 5/1995	10:12:07.40
2	18/ 5/1995	10:12:15.80
3	18/ 5/1995	10:15:25.42
4	18/ 5/1995	10:15:25.58
5	19/ 5/1995	14:07:25.24
6	19/ 5/1995	14:19:45.20
7	20/ 5/1995	19:11:07.25
8	20/ 5/1995	19:12:12.50

El desplegado de un histograma de multiplicidad (número de descargas que se presentan en un solo evento o rayo, separadas entre sí por un lapso definido, en este caso de un segundo), se muestra en la figura 4.

Finalmente, cabe mencionar que el prototipo desarrollado y colocado dentro de las instalaciones del IIE en agosto de 1995, con fines de evaluación durante la fase final de esa temporada de tormentas, recabó datos a satisfacción del cliente, a pesar del corto período de pruebas.

Módulo contador de descargas atmosféricas

El contador de descargas atmosféricas (CDA) es un equipo electrónico que forma parte del SAMDA y su principal objetivo es registrar la fecha y hora en que ocurren las descargas atmosféricas. Se instala en lugares de interés donde se observa la actividad eléctrica de la atmósfera. Los datos recabados por el contador proporcionan la frecuencia en la incidencia de los rayos a tierra por unidad de área, conocida como la densidad de rayos a tierra (DRT) en un lapso determinado. Los datos recabados se analizan para obtener los mapas promedio de la isodensidad de rayos a tierra más relevantes para las diferentes zonas donde se encuentren instalados los contadores. Posteriormente, se determina de manera estadística cuáles son las zonas de mayor afluencia de tormentas eléctricas para implementar en ellos, si se considera conveniente, equipo o sistemas de protección en los dispositivos de las redes eléctricas o en las instalaciones de distribución de energía eléctrica.

El CDA consta de dos partes principales: la etapa analógica que es un circuito configurado por un filtro pasabanda para detectar la presencia de una descarga eléctrica y la etapa digital a fin de registrar las descargas y manejar las interrupciones y las comunicaciones con la EAMR.

FIGURA 3
Desplegado típico de un submenu de la EAMR.

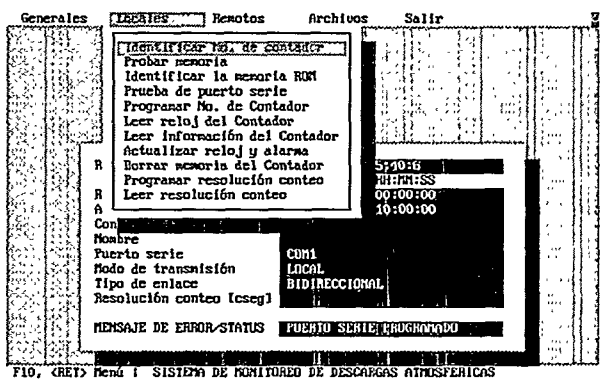
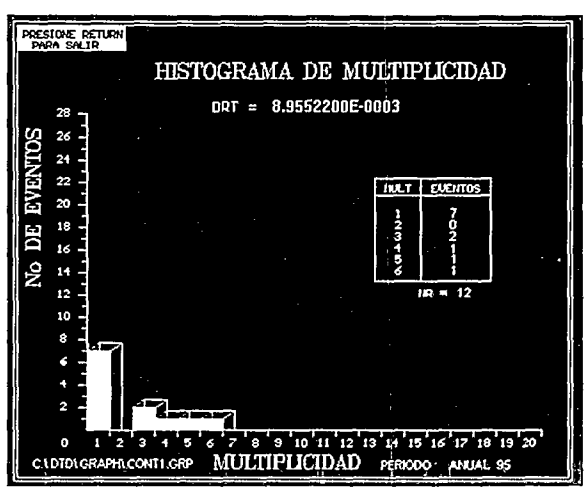


FIGURA 4
Ejemplo de datos recabados por un COA y un desplegado de multiplicidad en la EAMR.



Retos y aportaciones

Como premisas iniciales de este proyecto y parte de sus especificaciones, se plantearon una serie de mejoras que deberían cumplirse, constituyendo retos que se lograron en el rediseño y a lo largo del desarrollo de los subsistemas que conforman el SAMDA:

- Aumentar su capacidad de almacenaje de información en el CDA de 4 000 a 35 000 descargas.
- Conservar la información recabada antes de la pérdida de baterías.
- Operación con baterías comercia-

les y componentes de rango industrial y menor consumo de corriente.

• Reloj de tiempo real con resolución de hasta centésimas de segundo.

• Envolvente para los contadores, para ambiente adverso.

• Mejorar los desplegados de la interfaz hombre-máquina de la EAMR utilizando lenguaje de programación orientado a objetos, manejo de archivos en disco y desplegados de gráficas de histogramas de multiplicidad para manejo estadístico.

Otras aplicaciones

Si bien el desarrollo de la aplicación del SAMDA se realizó sobre una tarjeta electrónica y una PC con las características mencionadas, estos elementos pueden servir como plataforma para aplicaciones afines: registrador de eventos; sistema portátil alimentado por baterías para monitoreo, diagnóstico o programación de otra naturaleza de equipos; conteo de descargas parciales en transformadores para proveer información útil en su mantenimiento preventivo.

Posibles mejoras del SAMDA

Los estudios derivados y los resultados prácticos que el usuario obtenga del comportamiento de esta versión serán parámetros que deberán considerarse para futuras mejoras. De la operación de este modelo se puede concluir lo siguiente:

• Incluir en el esquema actual de alimentación del CDA un panel adecuado de energía solar y un cargador de baterías que minimice su cambio periódico y elimine la restricción de consumo de corriente.

• Añadir circuitería comercial al CDA que incluya un *modem* integrado y configurable para comunicaciones remotas. Esto elevaría un poco el costo del equipo; sin embargo, evitaría la dependencia y el costo de un *modem* adicional para transmisiones remotas.

• Incorporar en la EAMR mayor cantidad de despliegues de gráficas y análisis estadísticos del comportamiento atmosférico. Almacenar en disco duro la información compactada para ahorrar espacio, en caso de ser necesario.

Finalmente, cabe mencionar que el prototipo desarrollado y colocado dentro de las instalaciones del IIE en agosto de 1995, con fines de evaluación durante la fase final de esa temporada de tormentas, recabó datos a satisfacción del cliente, a pesar del corto período de pruebas. En el próximo periodo de tormentas, junto con otros trece equipos que se encuentran en preparación, concluirá esta primera etapa de evaluación y pruebas.

Reconocimientos

Este proyecto se llevó a cabo con la colaboración y aportaciones de Arturo Galván, quien contribuyó con datos para la mejor comprensión de esta aplicación, así como de César Ortega y David Abud, involucrados en el rediseño del *hardware* de la etapa digital y analógica del contador, respectivamente. Asimismo, se reconoce a Israel Hernández, becario de prácticas profesionales, por la incorporación de los histogramas de multiplicidad en la EAMR.

Referencias

Fritsche Ramírez, Edwald, Carlos Romualdo Torres (1992), "Desarrollo de un prototipo de un contador de descargas atmosféricas con reloj y fechador integrado", IIE, Informe final.

IIE, División de Sistemas Eléctricos, Departamento de Transmisión y Distribución (1994), "Estudio de líneas y subestaciones ante descargas atmosféricas y contaminación (contadores de rayos)", Informe final, septiembre.

Ortega Sánchez, César, Consuelo Rodríguez Padilla y David Abud Archila (1995), "Contador de descargas atmosféricas, manual de usuario", documento IIE/22/10203/04/P, 20 de julio.

Troncoso-Lozada, Óscar (1987), "Study of electric field changes accopanied by atmospheric radio noise at 10 kHz at México valley", *Revista Mexicana de Física*, núm. 33, pp. 247-263, 8 de abril.

Zabre Borgaro, Eric (1995), "Protocolo de comunicaciones MDA para el monitoreo de descargas atmosféricas", documento IIE/22/10203/02/P, 3 de mayo.

Zabre Borgaro, Eric (1995), "Estación de análisis y monitoreo remoto, manual de usuario", documento IIE/22/10203/03/P, 6 de junio.

ERIC ZABRE BORGARO



Licenciado en ingeniería electrónica, control y comunicaciones por la Universidad Iberoamericana (UI) con maestría en sistemas de información por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). Ingresó como investigador al IIE en 1983, incorporándose al Departamento de Electrónica, donde ha participado en diversos proyectos del área de control supervisorio, adquisición de datos y automatización. Es autor de varios reportes técnicos y artículos de difusión. Tiene diseños propios y diversas aplicaciones sobre equipos y sistemas de diagnóstico, automatización y procesamiento de datos que han contribuido de manera relevante con usuarios que diseñan e implementan sistemas de automatización industrial como la CFE y LyFC. Recientemente participó en el desarrollo de controladores programables para ambas compañías y actualmente se desempeña en proyectos relacionados con adquisición de datos y aplicaciones de automatización.

MARÍA CONSUELO RODRÍGUEZ PADILLA



En 1994 se graduó de la licenciatura en ingeniería electrónica y comunicaciones de la Universidad Iberoamericana (UI) Plantel León, recibiendo de la misma un reconocimiento académico por haber obtenido el promedio más alto de la generación. El mismo año, el Diario de México *le otorgó un reconocimiento como uno de los mejores estudiantes de México. Recibió mención honorífica al presentar su trabajo profesional con la tesis "Fibrinómetro sanguíneo, diseño y construcción". En 1994 ingresó al IIE como becaria del V grupo de Adiestramiento en Investigación Tecnológica (AIT), participando en el rediseño de tarjetas electrónicas para la central nucleoeléctrica Laguna Verde. En 1995 ingresó como investigadora en el Departamento de Electrónica. Actualmente participa en el diseño de módulos de adquisición basados en DSP.*

Tolerancia a faltas: conceptos y aplicaciones del Departamento de Instrumentación y Control

Carlos Enrique Ramírez Valenzuela

Resumen

En este artículo se presentan los conceptos básicos de la tolerancia a faltas (TF), conocida más comúnmente como tolerancia a fallas, el cual es un mecanismo para mejorar la fiabilidad de los sistemas. En particular se presenta una aplicación para control en tiempo real de turbinas para gas y de vapor como parte de un sistema de control distribuido, donde al considerar las características de la aplicación en el diseño del esquema de TF resultó una solución efectiva y costeable para incrementar la confiabilidad del control.

Introducción

La tolerancia a faltas es una técnica para mejorar la fiabilidad de los sistemas o equipos y se fundamenta en la redundancia de componentes. Otra alternativa para mejorar la fiabilidad es la construcción de sistemas o equipos más robustos; esto es, evitar las faltas, aunque esta técnica puede resultar más costosa cuando se requiere de diseños y/o procesos de fabricación muy especializados y con un mercado limitado. Sin embargo, la tendencia en la construcción de los equipos electrónicos es tener una integración cada vez mayor y un mejor control de los procesos de fabricación, lo cual redunda en una mayor robustez de los mismos.

La TF es un concepto con el que convivimos diariamente. En la naturaleza existen muchos ejemplos de la tolerancia a faltas; en el cuerpo humano tenemos dos pulmones, dos riñones, pero más aún, en las redes de neuronas del cerebro se tiene una redundancia mayor. Esto indica que dependiendo del tipo y la importancia de las funciones, el nivel y la forma de redundancia varían. Un ejemplo típico de tolerancia a faltas es la llanta de refacción del automóvil; en caso de una ponchadura es necesario parar a fin de sustituir la llanta ponchada, en otras palabras se suspende el servicio de transporte. Existen casos en los que no se permite la suspensión del servicio, como puede ser el control de una turbina de gas, donde si falla el controlador y no entra el de repuesto en un cierto tiempo, la turbina se dispara con las consecuente pérdida del servicio y costos asociados.

Conceptos de fiabilidad

Se considera que el sistema está operativo cuando entrega el servicio de acuerdo con lo especificado y que no está operativo en caso contrario. Una falta es una condición anormal dentro del sistema que puede generar un error en su estado, lo cual lleva a que el sistema falle, desviándose el servicio de lo especificado [Laprie, J. C., 1995]. Por ejemplo, si una celda (*bit*) dentro de la memoria se daña (se atora en 0 o en 1 lógico) se tiene la falta; el valor puede ser el correcto y por tanto, el estado es correcto (se tiene una falta latente). Cuando se intente cambiar su valor (escritura) se tendrá el error; posteriormente, cuando se use este dato (lectura de la celda) se llegará a la falla del sistema.

Debido a que la redundancia implica un incremento de costo del sistema o equipo, una primera pregunta es ¿se requiere o cuántos elementos redundantes son los adecuados? Por lo tanto, es necesario establecer una medida de la fiabilidad. Las medidas comunes son la confiabilidad y la disponibilidad; la primera es la probabilidad de que el sistema opere correctamente durante un periodo T, mientras que la segunda es la probabilidad de que el sistema esté operativo en un instante t [Frankel, E. G., 1988].

Otra cuestión que debe considerarse al diseñar sistemas TF es su objetivo, ya que dependiendo de su aplicación, el diseño puede variar y por tanto su costo, dependiendo de si requiere alta confiabilidad o disponibilidad y durante qué periodo. En el caso de los sistemas de control en tiempo real para turbinas de gas se requiere de una alta confiabilidad durante periodos de seis meses a un año, que son los tiempos típicos entre mantenimientos programados donde la turbina sale de servicio y su controlador, por la misma razón, también puede salir de operación y recibir mantenimiento preventivo.

Diseño de los sistemas TF

Para el diseño de los sistemas TF se consideran dos etapas fundamentales: el modelado y la definición de las fases de la TF. En la primera se especifican los requerimientos de fiabilidad, se definen los componentes del sistema y su interconexión (arquitectura) y se establece un mo-

La tolerancia a faltas es una técnica para mejorar la fiabilidad de los sistemas o equipos y se fundamenta en la redundancia de componentes.

MX9800201

Tratamiento anaerobio-aerobio de las aguas residuales de las instalaciones del IIE

José Luis Arvizu Fernández

En términos generales los sistemas de tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir en dos tipos: los sistemas que emplean procesos fisicoquímicos y los que se sustentan en procesos biológicos. Los procesos biológicos se distinguen a su vez en procesos aerobios y procesos anaerobios, dependiendo de si requieren para su operación del suministro de aire o no.

Tradicionalmente en nuestro país el tratamiento biológico de aguas residuales se ha efectuado empleando procesos y sistemas aerobios, tales como "lodos activados", lagunas aireadas y filtros percoladores. Sistemas que se caracterizan por la acción de bacterias y otros organismos que requieren de aire para su existencia, razón por la cual uno de los factores más importantes en estos sistemas es la energía requerida para suministrar las cantidades necesarias de aire.

De acuerdo con cifras oficiales, en nuestro país se generan alrededor de 160 m³/seg de aguas residuales municipales o domésticas y hasta 1994 existía una capacidad de tratamiento de 35 m³/seg, es decir un poco más del 20% de la capacidad requerida. Prácticamente la totalidad de esta infraestructura es de la tecnología del tipo de sistemas aerobios.

Bajo estas condiciones, la energía requerida para tratar los 35 m³/seg de aguas residuales, de acuerdo con la infraestructura actual existente, se estima en más de 825 millones de kWh anuales cuyo costo es de 290 millones de pesos al año, considerando un costo unitario de la energía de $0.35/kWh, requiriendo en cifras cerradas de una capacidad instalada de generación de 110 MW para suministrar energía a estas plantas de tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, la producción de lodos residuales de tales plantas en el país se estima en un millón de toneladas anuales, de las cuales muy bajo porcentaje se trata y maneja adecuadamente para su disposición final siendo en algunos casos exprimidos con filtros prensa y transportados hasta "rellenos sanitarios"; el costo de esta operación se estima en $715/ton de lodos residuales; si la totalidad de los lodos residuales producidos en nuestro país se dispusiera de esta manera, tendría un costo superior a los $750 millones de pesos anuales.

A raíz de la crisis energética en la década de los setenta, los sistemas anaerobios se han estudiado con mayor intensidad, lo que ha dado por resultado reactores de gran velocidad de reacción que contienen poblaciones densas de microorganismos de gran actividad. Estos desarrollos permiten tener capacidades de tratamiento similares a los sistemas aerobios a costos menores tanto de operación como de mantenimiento, ya que no requieren energía para aeración y generan de cinco a seis veces menos cantidad de lodos residuales.

En el cuadro 1 se presentan algunos parámetros que permiten comparar los sistemas anaerobios con los aerobios [Eckenfelder, W. W., *et al.*; Vieira, S.]. En este cuadro se puede observar que las diferencias entre unos y otros sistemas sugieren la conveniencia de aplicarlos en

CUADRO 1
Comparación entre los tratamientos anaerobio y aerobio.

Parámetro	*Anaerobio*	*Aerobio*
Requerimientos de energía	Bajos	Altos
Grado de tratamiento	Moderado (60 a 90%)	Alto (95%)
Producción de lodos	Baja	Alta
Estabilidad del proceso (a compuestos tóxicos y sobrecargas)	Baja a moderada	Moderada a alta
Tiempo para arranque	2 a 4 meses	2 a 4 semanas
Requerimientos de nutrientes	Bajos	Altos para ciertos desechos industriales
Olor	Problemas potenciales	Menores posibilidades
Requerimientos de alcalinidad	Alto para ciertos desechos industriales	Bajos
Producción de biogás	Sí	No
Costos de inversión	USD $ 30/cápita	USD $ 50/cápita
Costos de operación	USD $ 0.4/cápita	USD $0.8-1/cápita

forma conjunta, en lugar de antagonizarlos como se ha pretendido durante mucho tiempo.

La unión o combinación de estos sistemas en forma apropiada da por resultado la obtención de un tratamiento adecuado y más económico para un fin determinado, y, en especial, para el tratamiento de aguas residuales municipales o de albañales.

Planta de tratamiento de aguas residuales del IIE

Originalmente la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del IIE era una planta de lodos activados (desarrollo aerobio), proceso que consume mucha energía y genera lodos residuales de cinco a seis veces más que los procesos anaerobios.

En términos generales los sistemas de tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir en dos tipos: los sistemas que emplean procesos fisicoquímicos y los que se sustentan en procesos biológicos.

El soplador instalado en la planta para proporcionar el aire requerido por los lodos activados, está acoplado a un motor de 10 hp que operaba continuamente las 24 horas del día; actualmente opera en forma intermitente (sólo durante el día). Aun así se consume el 30% de la energía.

Incorporando un tratamiento anaerobio inicial a esta planta, dicho gasto se pudo reducir a un 30% o 40% del 30% citado. Para lograr lo anterior fue necesario efectuar ligeras modificaciones a la planta ya existente, sin alterarla significativamente ni poner en riesgo la calidad del agua tratada.

El objetivo de las modificaciones efectuadas a la planta fueron para tratar, inicialmente por medio de un proceso anaerobio, las aguas residuales del IIE y depurarlas con el proceso aerobio ya existente.

Los beneficios esperados de estas modificaciones fueron ahorrar energía y generar menor cantidad de lodos residuales, así como contar con una planta en el nivel demostrativo de tales características.

Metodología y técnicas utilizadas

La metodología y las técnicas utilizadas se basaron en el análisis de la planta de tratamiento existente en el IIE; en la caracterización del agua residual del IIE; en la modificación de la planta de tratamiento introduciendo un tratamiento anaerobio, y efectuando experimentación en laboratorio.

Análisis de la planta de tratamiento del IIE

Los parámetros de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales del IIE son:

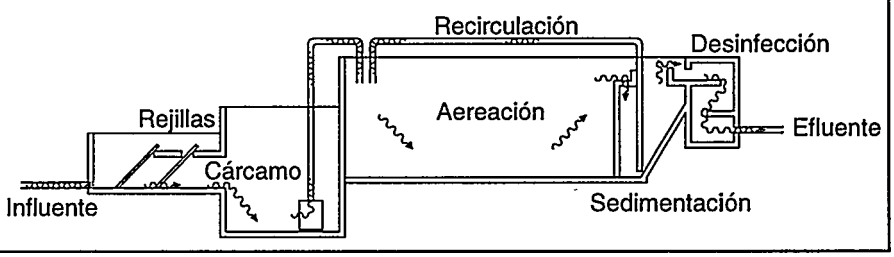
- Personas servidas: 1 200.
- Volumen a tratar: 180 m³/12 horas.
- Carga orgánica: 70 kg/d demanda bioquímica de oxígeno (DBO)-5.
- Eficiencia del tratamiento: 90% remoción DBO y sólidos suspendidos totales (SST).

El proceso de tratamiento para esta planta es el denominado ``lodos activados´´, empleando aireación difundida; en general el proceso ocurre de la siguiente manera (figura 1):

- El agua cruda llega por gravedad a un canal donde se han colocado dos rejillas metálicas; estas rejillas hacen la función de cribas donde se retienen los sólidos mayores de 25 y 13 mm, así como trapos, maderas y hules que podrían dañar los elementos de procesos subsecuentes.
- Una vez que el agua pasa por las cribas llega a un cárcamo donde son tomadas por un equipo dúplex de bombeo, el cual eleva el agua a la cota más adecuada para permitir que los demás pasos del proceso ocurran por gravedad.
- El sistema de bombeo del paso anterior pasa el agua al tanque de aireación en donde se inyecta aire que proporciona un soplador accionado por un motor de 10 hp. El aire es conducido hasta los difusores de aire. Al inyectarse a presión constante en el seno del líquido ocurre la transferencia del oxígeno al agua, permitiendo el desarrollo de bacterias aerobias, las cuales llevan a cabo la degradación de la materia orgánica.
- Una vez que el agua es aireada (24 horas), pasa por gravedad (diferencia de niveles) a la siguiente etapa del proceso, la cual consiste en la clarificación de esta agua aireada, para lo cual pasa a un tanque de forma atolvada, en donde los lodos formados se sedimentan, estos lodos sedimentados regresan mediante un

De acuerdo con cifras oficiales, en nuestro país se generan alrededor de 160 m³/seg de aguas residuales municipales o domésticas y hasta 1994 existía una capacidad de tratamiento de 35 m³/seg, es decir un poco más del 20% de la capacidad requerida. Prácticamente la totalidad de esta infraestructura es de la tecnología del tipo de sistemas aerobios.

FIGURA 1
Diagrama de flujo de la planta original tratadora de aguas residuales del IIE.



eyector neumático al tanque de aireación para acelerar el proceso de depuración de las aguas; el exceso de lodos se manda a un lecho de secado.

Tomando en consideración el volumen y la calidad del agua, así como la ingeniería básica para la construcción de un reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente (UASB) [Vieira, S.], se modificó la planta de tratamiento de aguas del IIE.

• El agua ya clarificada pasa a un tanque de contacto de cloro, en donde se agrega una solución de hipoclorito, permitiendo que el agua pueda vertirse en algún cuerpo receptor o bien utilizarse para riego de áreas verdes.

Caracterización del agua residual del IIE

Los parámetros medidos para determinar la calidad del agua residual se presentan en el cuadro 2.

En este cuadro se puede observar que la demanda química de oxígeno (DQO) y la DBO del agua antes de ser tratada es de 356 mg/l para el primer parámetro y de 105 mg/l para el segundo. Estos valores indican que la biodegradabilidad del agua es baja en términos generales; tomando en cuenta que estas aguas provienen del servicio de sanitarios y limpieza del IIE, la biodegradabilidad del agua es alterada por el contenido de productos de limpieza que se emplean en diferentes cantidades y frecuencia.

Tanto los ensayos de laboratorio como la operación de la planta, muestran claramente los beneficios de tratar por medios anaerobios estas aguas residuales, ya que alcanzan en el laboratorio depuraciones del orden del 75% en términos de DQO a tiempos de residencia de 3.2 a 5 horas y temperatura ambiente.

CUADRO 2
Eficiencia de tratamiento de la PTAR-IIE, julio 1993- julio 1994.

Parámetro mg/l	*Agua residual de entrada*	*Efluente reactor anaerobio*	*Eficiencia reactor anaerobio* %	*Efluente final*	*Eficiencia total* %
DQO	356	136	60	45	87
DBO	105	32	69	-	-
SST	462	-	-	12	97

DQO = demanda química de oxígeno.
DBO = demanda bioquímica de oxígeno.
SST = sólidos suspendidos totales.

Otro importante parámetro cuantificado fue el volumen de agua que se trata diariamente en la planta, este volumen tenía un valor promedio de 65 m^3/d cuando se efectuaron las modificaciones, oscilando entre 50 y 90 m^3/d. La producción típica de aguas residuales del IIE indica que existe un patrón de producción variable durante el día y la semana, existiendo un pico de producción entre las 16:00 y 17:00 horas del día.

Modificación de la planta

Tomando en consideración el volumen y la calidad del agua, así como la ingeniería básica para la construcción de un reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente (UASB) [Vieira, S.], se modificó la planta de tratamiento de aguas del IIE.

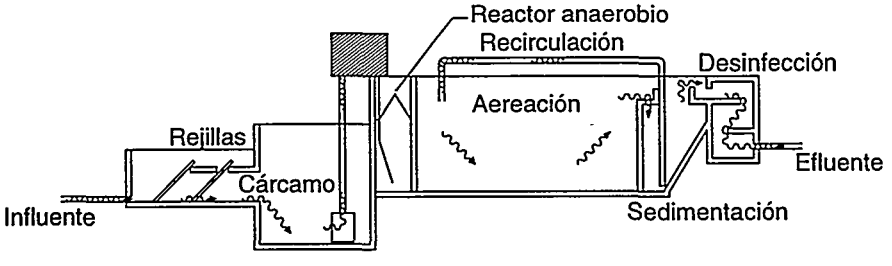
La modificación efectuada en la planta consistió en construir un tanque de 7 x 1 x 3.6 metros, dando un volumen aproximado de 25 m^3 para crear un compartimiento separado del proceso aerobio; en este tanque se instaló un captador de gas de fibra de vidrio, una caja reguladora de flujo y tubos de distribución de la alimentación del agua en el fondo del compartimiento. En la parte superior se instaló un colector de agua tratada, el cual desemboca en el tanque de aireación junto con los lodos de retorno del proceso aerobio (figura 2).

Experimentación en laboratorio

Con el propósito de anticipar el comportamiento del proceso, en el laboratorio se inició la experimentación del mismo en un reactor de vidrio de 1.35 litros de volumen total, operado a temperatura ambiente.

Los lodos empleados como inóculo fueron los propios lodos activados de

FIGURA 2
Diagrama de flujo de la planta modificada tratadora de aguas residuales del IIE.



CUADRO 3

Valores de la demanda química de oxígeno (DQO) en mg/l del agua residual tratada. La norma de la Comisión Nacional del Agua establece un valor de 300 mg/l para este parámetro.

Mes/año	1992	1993	1994	1995
Enero	-	207	36	132
Febrero	-	87	72	51
Marzo	-	73	69	32
Abril	26	40	27	40
Mayo	53	33	44	30
Junio	13	13	40	36
Julio	87	7	16	13
Agosto	120	6	56	27
Septiembre	87	36	22	40
Octubre	187	60	4	23
Noviembre	37	68	11	13
Diciembre	53	45	32	23
Promedio	73.7	53.7	35.7	38.3

CUADRO 4

Valores de sólidos suspendidos totales (SST) en mg/l del agua residual tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales del IIE. La norma de la Comisión Nacional del Agua para este parámetro es de 30 mg/l.

Mes/año	1992	1993	1994	1995
Enero	-	14	7	20
Febrero	-	11	13	13
Marzo	-	58	6	9
Abril	62	20	12	6
Mayo	30	16	4	9
Junio	43	14	4	16
Julio	32	3	21	12
Agosto	29	5	14	5
Septiembre	9	18	13	11
Octubre	10	5	22	6
Noviembre	34	11	6	6
Diciembre	13	12	12	6
Promedio	29.1	15.6	11.1	9.9

la planta después de haber sido caracterizados y adaptados a condiciones anaerobias.

La operación de este reactor se inició en marzo de 1993, la eficiencia en remoción de DQO después de seis meses de operación oscila entre el 65 y el 75%, a tiempos de residencia de 3.2 a 5 horas.

Resultados obtenidos

Una vez efectuadas las modificaciones, la planta anaerobia fue inoculada con dos metros cúbicos de lodos activados digeridos y se inició el llenado del reactor con agua residual, dejando reposar estos lodos durante dos semanas. A continuación se inició la alimentación en forma continua a razón de 10 m^3/d en promedio, dando por resultado un tiempo hidráulico de resistencia de 60 horas. Estas condiciones se mantuvieron por espacio de dos meses alcanzando en este tiempo, remociones de DQO del 60% congruentes con las reportadas en la literatura por otros investigadores [Vieira, S.; De Man, A., *et al.*]. La planta está recibiendo desde mediados de 1993, los 65 m^3/d promedio de aguas residuales, dando por resultado un tiempo de residencia de nueve horas en promedio (de seis a doce horas) con las eficiencias presentadas en el cuadro 2, tanto para el tratamiento anaerobio como para el tratamiento completo anaerobio-aerobio. En los cuadros 3 y 4 se resumen los valores de la demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales expresados en mg/l correspondientes al agua residual tratada; se puede observar que estos valores en general y promedio en particular obtenidos en 1992 y primer trimestre de 1993 son mayores a los valores correspondientes al resto de 1993 y los años 1994 y 1995, con lo cual se demuestra que la calidad del agua se incrementó después de la incorporación del tratamiento anaerobio.

Perspectivas de aplicación

Tanto los ensayos de laboratorio como la operación de la planta muestran claramente los beneficios de tratar por medios anaerobios estas aguas residuales, ya que alcanzan en el laboratorio depuraciones del orden del 75% en términos de DQO a tiempos de residencia de 3.2 a 5 horas y temperatura ambiente. La operación del reactor anaerobio instalado en la planta de tratamiento de aguas residuales del IIE ha permitido constatar los resultados de laboratorio y las dificultades de escala de estos sistemas, permitiendo corregir y optimar su funcionamiento.

La combinación de los procesos anaerobios y aerobios para el tratamiento de aguas residuales del tipo municipal tiene gran oportunidad de ser empleada a gran escala, ya que el gran consumo de energía y producción de lodos residuales resultantes de los procesos aerobios empleados tradicionalmente, pueden reducirse de un 60% a un 70%, teniendo gran impacto sobre todo en un marco de preservación ecológica y energética como los que deben imperar en este tiempo; con esta combinación de procesos anaerobio/aerobio se tiene gran

ventaja económica de su aplicación en el tratamiento de aguas residuales municipales, cuyo mercado potencial en nuestro país se estima en $ 5 000 millones de pesos, requeridos para instalar la capacidad restante en el país, con el fin de tratar los 125 m³/seg deficitarios en la actualidad, más un mercado que crece debido al aumento continuo de la población.

Referencias

De Man, A. W. A. *et. al.* (1988), *The use of EGSB and UASB anaerobic systems for low strength soluble and complex wastewaters at temperatures ranging from 8 to 30°C*, AWPRC, pp. 197-209.

Eckenfelder, W. W. *et al.* (1988), *Anaerobic versus aerobic treatment in the USA*, IAWPRC, pp. 105-114.

"Informe 1989-1994, Comisión Nacional del Agua", Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Comisión Nacional del Agua.

"Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1993-1994", Secretaría de Desarrollo Social-Instituto Nacional de Ecología, México.

Preliminary national inventory of greenhouse gas: Mexico (1995), UNEP Project GF/4102-92-01 (PP/3011), septiembre, pp. 108.

Souza, M. E. (1986), "Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors", *Wat. Sci. Tech.*, vol. 18, núm. 12, pp. 55-69.

Vieira, Sonia M. M. (1988), *Anaerobic treatment of domestic sewage in Brazil research results and full-scale experience*, IAWPRC, pp. 185-196.

Vochten, P. S. *et al.* (1988), *Aerobic versus anaerobic wastewater treatment*, Quinto simposium internacional "Anaerobic Digestion", IAWPRC, pp. 91-101.

JOSÉ LUIS ARVIZU FERNÁNDEZ

Ingeniero químico egresado de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1980; desde ese año participa como investigador y jefe de proyecto en diversos proyectos relacionados con la producción de



metano a través de procesos anaerobios en la hoy Unidad de Energías No Convencionales del IIE. Asesor de 15 tesis de licenciatura. Entre los proyectos en que ha participado recientemente están el Preliminary national inventory of greenhouse gas: Mexico *de la UNEP Project, en la parte de emisiones a partir de basura depositada en rellenos sanitarios y de aguas residuales municipales a petición del Instituto Nacional del Ecología y el PNUMA. Así como el estudio para la evaluación de las emisiones de biogás y caracterización de la potencia energética que se puede obtener del relleno Prados de la Montaña del Departamento del Distrito Federal solicitado por la Comisión Nacional pra el Ahorro de Energía (Conae).*

SERIE ATLAS OCEANOGRÁFICO DEL GOLFO DE MÉXICO

Volúmenes I, II y III

La colección completa de la serie *Atlas Oceanográfico del Golfo de México* incluirá ocho volúmenes. Actualmente están a la venta los volúmenes I, II y III con un precio de $300.00 dólares c/u. El pago deberá acompañar todas las órdenes y deberá hacerse a nombre del Instituto de Investigaciones Eléctricas al tipo de cambio del dólar vigente a la fecha de compra.

Por favor complete lo siguiente:

Sr(a).:_____

Compañía: _____

_____

Dirección (calle y número, no apartado postal):

_____

_____

CP, ciudad y estado:

_____

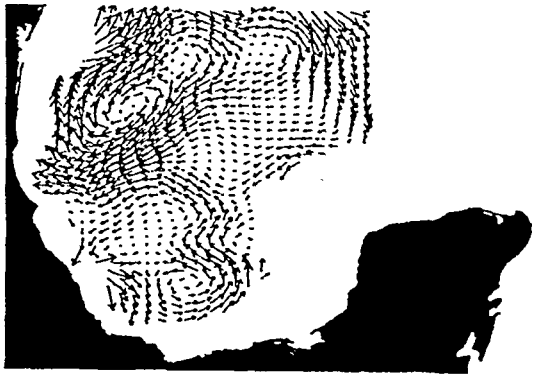
_____

Teléfono/fax:

_____

_____

_____



La superconductividad y sus aplicaciones en el sector eléctrico

Conferencia impartida por el doctor Julian Cave de VTPI Hidro-Québec, Canadá, durante el coloquio *Nuevas tecnologías para el sector eléctrico del siglo XXI*, celebrado con motivo de los 20 años del IIE.

Introducción

Hidro-Québec, que en 1995 celebró su 50 aniversario, es una empresa eléctrica canadiense en la que trabajan cerca de 25 000 personas. Hasta ahora, Hidro-Québec ha instalado 300 000 kilómetros de líneas de transmisión y 101 000 kilómetros de líneas de distribución en Canadá. En el área de la superconductividad, nos hemos preocupado por la producción de limitadores de corriente de falla, el almacenamiento de energía utilizando celdas de combustible y en el desarrollo de cable superconductor.

Historia resumida de la superconductividad

El fenómeno de la superconductividad, descubierto a principios de siglo, es atractivo por sus muchas aplicaciones. Su desarrollo ha valido para que cinco científicos obtengan el premio Nobel.

Entre 1908 y 1911, Kamerlingh Onnes experimentó por primera vez con el helio líquido y descubrió la superconductividad mientras estudiaba la resistividad de metales a bajas temperaturas. Ese fue el origen de un exitoso desarrollo que alcanzó enorme notoriedad hacia finales de la década pasada, cuando J. Georg Bednorz y Alexander Müller abrieron la puerta a la superconductividad a alta temperatura.

Aún se recuerda el llamado "Woodstock científico" en marzo de 1987, cuando cerca de dos mil especialistas de todo el mundo se reunieron durante varias horas para discutir el hallazgo y las implicaciones del descubrimiento. Este adelanto ha sido considerado por los especialistas tan importante como la invención del transistor.

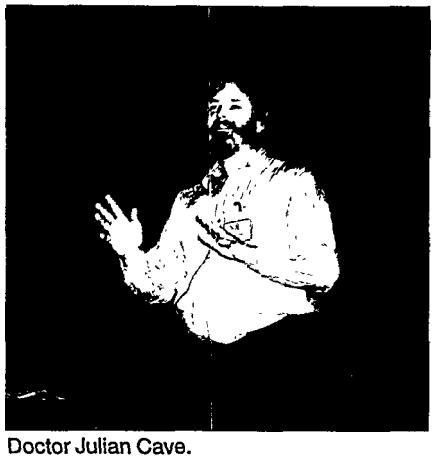
Los superconductores tienen muchas propiedades electromagnéticas inusuales. Por ejemplo, una vez que una corriente se produce en un anillo superconductor, manteniéndose a temperatura suficientemente baja, la corriente persistirá sin pérdidas cuantificables.

Como mencioné en un principio, para alcanzar la superconductividad los investigadores buscaron reducir la temperatura con helio líquido. En los sesenta se descubrieron las aleaciones con temperaturas críticas superiores, pero aún necesitaban de helio y nitrógeno líquidos. En 1986 se elevó aún más la temperatura y hoy en día se buscan nuevas aplicaciones para la superconductividad. Recientemente, un grupo de investigadores rusos afirmó haber descubierto la superconductividad a la temperatura de ebullición del agua, pero sus resultados no han sido confirmados.

Refrigeración

Actualmente, quienes investigan la refrigeración dudan entre la utilización de helio líquido y el nitrógeno líquido. El nitrógeno es bastante más atractivo que el helio, aun cuando el helio todavía es una opción para grandes aplicaciones. Una comparación entre el nitrógeno y el helio en cuanto a costo, calor latente, disponibilidad y eficiencia de refrigeración ha demostrado las bondades del nitrógeno.

La refrigeración es un área en la que hay mucho por investigar, pues-



Doctor Julian Cave.

to que es posible reducir costos y lograrse avances tecnológicos significativos.

Quienes investigan la refrigeración dudan entre la utilización de helio líquido y el nitrógeno líquido. El nitrógeno es bastante más atractivo que el helio, aun cuando el helio todavía es una opción para grandes aplicaciones.

Limitadores de corriente de falla

Los superconductores cuentan con varias ventajas de aplicación sobre otras tecnologías. Claro ejemplo son los limitadores de corriente y los transformadores. Encontramos que estos limitadores tienen menos pérdidas que los convencionales, además, reducen el costo de equipamiento de líneas nuevas, incrementan la capacidad de las existentes, reducen la necesidad de rehabilitación del sistema y en cuanto a la calidad de la energía, permiten aislar los circuitos que fallan.

Las bobinas superconductoras a altas temperaturas utilizadas en transformadores con capacidad de poten-

pase a la página 211

MX9800144

Normalización de eficiencia energética en bombas verticales

Rosa Aracely Acosta Torres y Eduardo H. Buendía Domínguez

Resumen

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) apoyando a la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) elaboró el anteproyecto de norma de eficiencia energética en bombas verticales tipo turbina con motor externo. Dicho documento ha cumplido con los trámites necesarios para la emisión de una norma, habiéndose publicado como norma oficial mexicana (NOM-001-ENER-1995) el 22 de diciembre de 1995. En el presente artículo se mencionan los resultados del estudio para la realización de esta norma, considerando los ahorros energéticos, así como la evaluación económica que sustenta el proyecto de norma, indicando también el impacto ambiental que tendrá su implantación.

Introducción

El Programa Nacional de Desarrollo indica que es indispensable para el país un uso racional de los recursos energéticos, razón por la cual se han promovido acciones tendientes a la normalización de equipos y sistemas mediante normas de eficiencia energética, las cuales son disposiciones obligatorias que contienen reglas sobre especificaciones que deben cumplir los productos que se fabriquen y comercialicen en México.

El empleo de bombas verticales tipo turbina con motor externo es importante para el sector agrícola, pues representa el 70% del total de los equipos instalados por la Comisión Nacional del Agua (CNA); utilizan bombas con potencias que van desde 7.5 hasta 350 hp o más. La eficiencia con la que operan alrededor del 50% de dichos equipos es inferior al 40%, por lo que se vislumbra un gran potencial de ahorro de energía en este sector.

Acorde con las cifras reportadas en 1994 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en cuanto a las ventas de energía para la tarifa nueve —bombeo de agua para riego agrícola—, que indican un incremento aproximado del 10% en comparación con el año anterior, así como un incremento del 2.5% en el número de usuarios registrados en esta tarifa, se infiere que la operación adecuada de las instalaciones electromecánicas y la instalación de equipo eficiente contribuirá a un mejor uso de los recursos energéticos del país.

Escenario actual

A continuación se presenta un panorama de los sistemas de bombeo en cuanto al tipo de equipo instalado (figuras 1, 2 y 3).

Como se puede observar en las

FIGURA 1
Equipos de bombeo utilizados por la CNA.

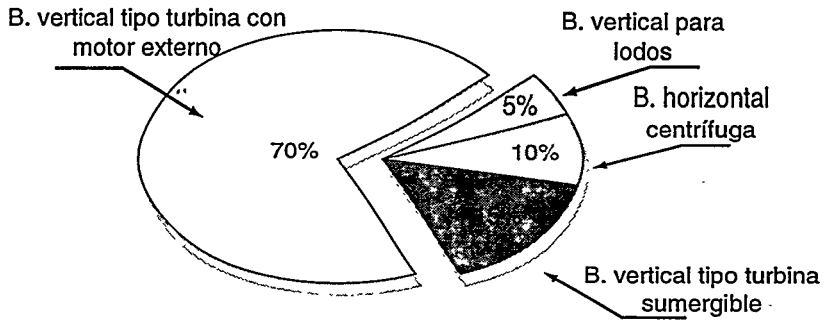


FIGURA 2
Equipos de bombeo más utilizados en agua potable.

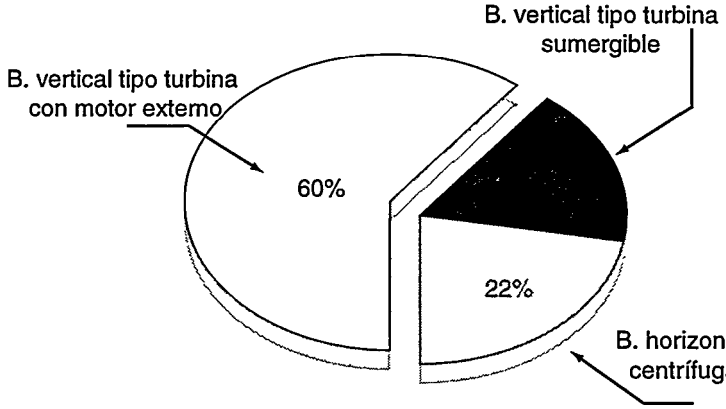
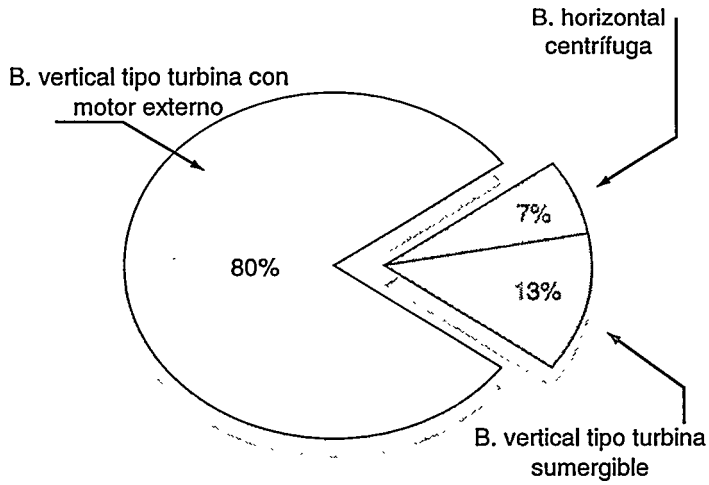


FIGURA 3
Equipos de bombeo más utilizados por unidades de riego.



figuras 1, 2 y 3, las bombas verticales tipo turbina con motor externo son los equipos más utilizados en la extracción de agua del subsuelo, de ahí la importancia de analizar sus eficiencias cuando salen de fábrica y posteriormente, cuando entran en operación.

Con base en lo anterior, se realizó un estudio con la finalidad de conocer los valores de eficiencia que tienen las bombas nuevas de fabricación nacional, para ello se elaboró un cuestionario mediante el cual se solicitó información técnica a los fabricantes, teniendo respuesta de nueve de las principales empresas que producen y comercializan en México este tipo de bombas.

Para un mejor manejo de la información se hizo una clasificación de los equipos en función de la potencia del motor eléctrico acoplado a la bomba. El intervalo de potencia de los motores eléctricos empleados para bombas verticales tipo turbina va desde cinco hasta mayores de 126 hp; las potencias comerciales para este rango se muestran en el cuadro 1.

Finalmente se definieron cuatro intervalos para la clasificación de los equipos, basándose en los siguientes aspectos: el potencial de conservación de energía y un número manejable de intervalos. Las estadísticas revelan que el mayor porcentaje de bombas utilizadas para riego agrícola están comprendidas entre 51 y 125 hp, como se muestra en la figura 4.

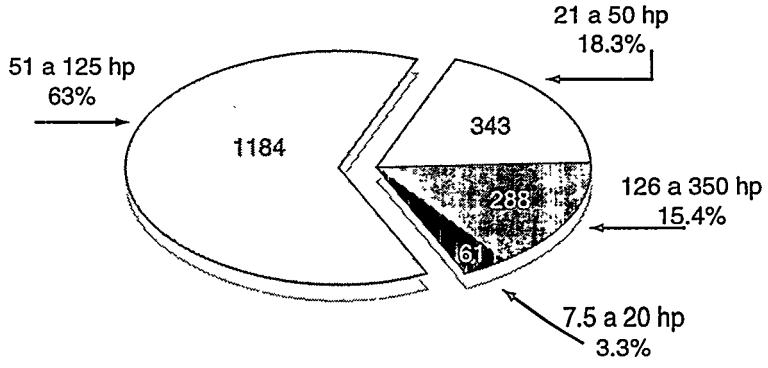
CUADRO 1
Potencias comerciales en motores eléctricos.

Potencia (hp)	*Intervalo (hp)*
5 7.5 10 15 20	5-20
25 30 40 50	21-50
60 75 100 125	51-125
150 200 250 300 350	>126

En el cuadro 2 se presenta el resultado del análisis de la información proporcionada por los principales fabricantes de bombas verticales tipo turbina con motor externo (nueve), indicándose los valores de eficiencia máximos y mínimos.

Es importante mencionar que no se

FIGURA 4
Cantidad de equipos por intervalo de potencia. Riego agrícola.



Nota: muestra de 1 876 pozos para riego agrícola localizados en doce estados de la república mexicana.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) apoyando a la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) elaboró el anteproyecto de norma de eficiencia energética en bombas verticales tipo turbina con motor externo.

CUADRO 2
Eficiencias de bombas verticales reportadas por fabricantes nacionales.

Intervalo (hp)	Fabricantes: Eficiencias (%) A	B	C	D	E	F	G	H	I
5-20	75.7	78	65	80.7	77	73.7	76.6	79	79.5
21-50	80	82	68.2	82.3	81	77.1	78.3	81	82.7
51-125	81.9	84	77.8	83.6	83.2	80.8	80	84.1	82.6
>126	84.1	83	81.2	84.2	84.2	83.4	82.1	86.5	85

□Valores mínimos
□Valores máximos

dan los nombres de las empresas fabricantes de bombas verticales tipo turbina con motor externo que proporcionaron la información necesaria para la realización del análisis de las eficiencias debido a un convenio de confidencialidad establecido con dichas compañías.

En el cuadro 2 se puede observar cómo para un mismo intervalo de potencia, existe una diferencia de hasta 15 puntos porcentuales entre la máxima y mínima eficiencia. Esto indica la diversidad de equipos existentes en el mercado, situación que sería deseable eliminar mediante un mejor control de calidad en los procesos de manufactura, además de regulaciones como las normas de eficiencia energética que buscan, entre otras cosas, regular el mercado nacional tanto en precios como en calidad y eficiencia de los productos.

El análisis de las eficiencias mostradas en el cuadro 2 permitió la elaboración del escenario de eficiencias nacionales para las bombas verticales tipo turbina con motor externo, mismo que se indica en la figura 5. El promedio ponderado de eficiencias fue: 77% para potencias de 5 a 20 hp; 80% para el intervalo de 21 a 50 hp; 82% para bombas comprendidas entre 51 y 125 hp, y para equipos mayores de 126 hp, 84%.

Se elaboró un escenario comparativo de las eficiencias de bombas verticales tipo turbina con los valores nacionales de eficiencias y los resultados obtenidos de la información de catálogos y curvas de operación de bombas fabricadas en el extranjero. En la figura 6 se observa que la diferencia promedio entre las eficiencias nacionales e internacionales es de aproximadamente 2.5 puntos porcentuales.

Como información adicional se consideró un estudio para motores y bombas realizado por el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos en 1980, en este estudio se mencionan los valores de eficiencia indicados en el cuadro 3.

Es indispensable para el país un uso racional de los recursos energéticos, razón por la cual se han promovido acciones tendientes a la normalización de equipos y sistemas mediante normas de eficiencia energética, las cuales son disposiciones obligatorias que contienen reglas sobre especificaciones que deben cumplir los productos que se fabriquen y comercialicen en México.

Es conveniente mencionar que los valores antes reportados corresponden a bombas centrífugas en general a diferencia del presente trabajo que se ocupa de bombas verticales tipo turbina específicamente, sin embargo, estos valores constituyen un elemento para establecer un marco de referencia.

De acuerdo con los valores graficados, la diferencia promedio entre los valores nacionales y los internacionales es de casi tres puntos porcentuales, diferencia que disminuiría al mejorar el proceso de fabricación tanto de moldes como del propio equipo. De igual manera, la aplicación de recubrimientos en tazones e impulsores con materiales resistentes a la abrasión contribuye a incrementar la eficiencia

FIGURA 5
Escenario de eficiencias nacionales. Promedio ponderado de eficiencias. Bombas verticales.

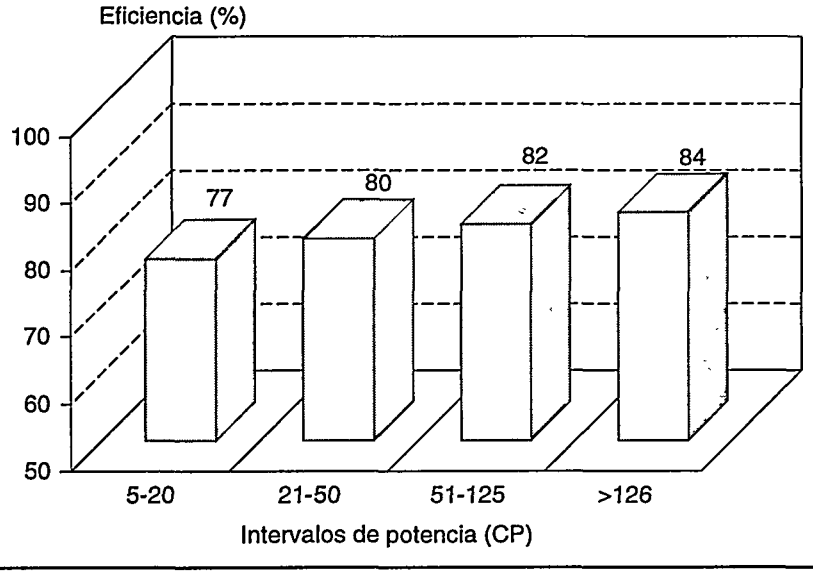
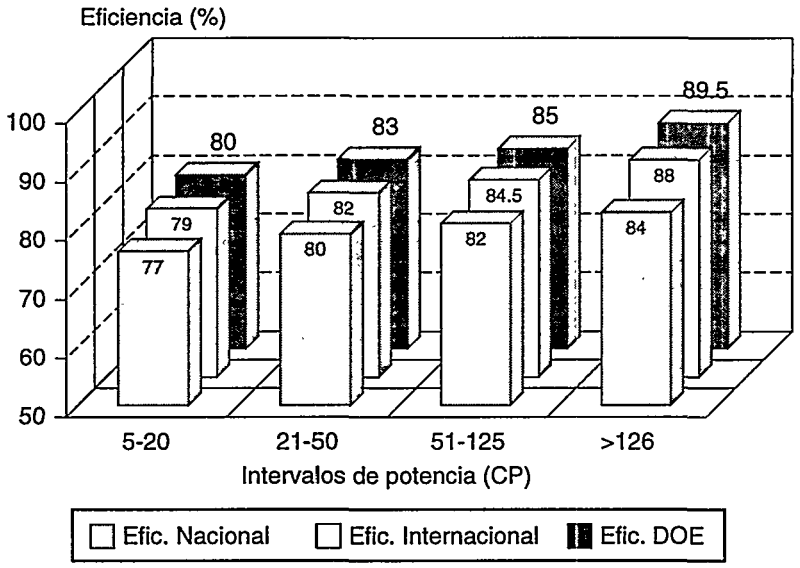


FIGURA 6
Escenario comparativo de eficiencias de bombas verticales tipo turbina con motor externo.



CUADRO 3
Eficiencias reportadas por el DOE.

Potencia (hp)	5-20	21-50	51-125	>126
Efic. bomba (%)	80	83	85	89.5

de las bombas. Resulta importante mencionar que algunas compañías del ramo ya han incorporado técnicas como las antes mencionadas a sus procesos de fabricación con la finalidad de mejorar la calidad de sus productos, siendo más competitivos en el mercado nacional e internacional.

Potencial de ahorro energético

Hoy en día el ahorro energético es una preocupación mundial, la cual requiere de acciones concretas, en donde el impacto ambiental sea un aspecto relevante. De acuerdo con información de la CFE, el consumo de energía en el sector agrícola para 1994 fue del 6% con respecto a las ventas totales; se considera que la tasa de crecimiento del sector eléctrico para un escenario alto es de 5.4%. Por otra parte, no se pueden perder de vista las regulaciones actuales en cuanto a emisiones contaminantes al ambiente; así cobra gran relevancia el empleo de equipos eficientes que contribuyan favorablemente a estos aspectos.

Como una forma de lograr los fines antes citados se han conjuntado esfuerzos en la elaboración de normas de eficiencia energética para las bombas verticales. Basados en la información proporcionada por los fabricantes, actualmente existen bombas nuevas en el mercado nacional que tienen eficiencias bajas, como se indica en el cuadro 4.

Por lo tanto, el 22 de diciembre de 1995 se publicó la norma oficial mexicana NOM001-ENER-1995, ``Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo-Límites y método de prueba´´, documento de carácter obligatorio que contiene los valores mínimos de eficiencia que deben cumplir las bombas de este tipo, fabricadas y comercializadas en México. Los valores de eficiencia que se incluyen en la norma corresponden al promedio ponderado nacional (cuadro 5).

Considerando información estadística del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), se obtuvo la tasa de crecimiento promedio ponderada para las bombas verticales en un periodo de cinco años, estimándose la producción nacional de dichos equipos en 2 418 unidades para 1994.

La aplicación de la norma oficial mexicana para bombas verticales tipo turbina con motor externo tendrá como consecuencia un ahorro de energía y potencia de 284 328 MWh y de 34 MW respectivamente. Asimismo, el disminuir la operación de la centrales generadoras por tener los ahorros antes citados, significará una reducción de emisiones de CO_2 de 199 029 toneladas, además de una disminución en el consumo de agua de 1 023 579 m^3, dichas cifras apoyan al programa nacional de desarrollo en cuanto al uso racional de los energéticos y, al mismo tiempo, contribuyen a las regulaciones ambientales emitidas recientemente.

Evaluación económica

El análisis beneficio-costo evalúa todos los impactos favorables y desfavorables generados al emitirse la norma para los fabricantes, los usuarios y la CFE. Para efecto de dicho análisis se toma como base un horizonte de cinco años, ya que es el tiempo máximo en que los fabricantes de bombas consideran que éstas deben recibir un mantenimiento mayor o rehabilitación. Es importante mencionar que para la presente evaluación se consideraron precios, costos e indicadores económicos vigentes en 1994, obteniendo el resultado que se

CUADRO 4
Eficiencias nacionales bajas de bombas verticales tipo turbina con motor externo.

Intervalos (hp)	*Eficiencia (%)*
5-20	65
21-50	68.2
51-125	77.9
>126	81.2

CUADRO 5
Eficiencias de bombas verticales tipo turbina con motor externo contenidos en la NOM-001-ENER-95.

Intervalos (hp)	*Eficiencia (%)*
5-20	77
21-50	80
51-125	82
>126	84

CUADRO 6
Resumen de la evaluación costo-beneficio.

Campo estudiado	*Beneficio neto (miles de pesos)*
Fabricante	2 338
CFE	28 989
Usuario	36 582
Beneficio neto total	62 906

muestra en el cuadro 6.

Asimismo, es relevante mencionar que el estudio costo-beneficio que sustenta la norma de eficiencia energética para bombas verticales tipo turbina con motor externo resultó rentable para los tres campos estudiados (fabricantes, CFE y usuarios), dando un beneficio neto total de 62 906 pesos.

Conclusiones

El estudio realizado indica que las bombas verticales tipo turbina con motor externo representan el 70% del total de los equipos instalados por la Comisión Nacional del Agua, abarcando un rango de potencias desde cinco hasta equipos mayores a 126 hp.

Con base en información proporcionada por el INEGI, se obtuvo la tasa de crecimiento promedio ponderada para las bombas verticales en un periodo de cinco años, de tal forma que la producción nacional se estimó en 2 418 unidades para 1994.

Por todo lo antes expuesto puede afirmarse que la emisión de la norma oficial mexicana representa una opción práctica y efectiva para conseguir un ahorro de energía considerable en la extracción de agua del subsuelo. De los resultados del análisis de factibilidad, se observa que si los equipos de bombeo se mantienen en los niveles de eficiencia que se incluyen en la norma (cuadro 5), se evitaría la instalación de alrededor de 34 MW en los próximos cinco años y una reducción en consumo de energía de 284 328 MWh.

Referencias

Acosta T., Aracely y E. Buendía (1994) "Estudio de la eficiencia en bombas agrícolas y servicios municipales", Proyecto 5395, Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Comisión Federal de Electricidad (1994), "Información básica del sector eléctrico nacional".

Comisión Nacional del Agua (1991), "Estadísticas de equipo de bombeo instalado".

Comisión Nacional del Agua (1993), "Unidades de riego para el desarrollo rural", reporte técnico, febrero.

XII Curso sobre Planificación Energética (1994), Quinto en Latinoamérica y el Caribe, México, D.F.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1987-1992), "Encuesta industrial mensual", clave 127845.

Reyes Filio, Miguel A. (1993), "Propuesta de laboratorio de pruebas de acuerdo con la demanda del equipo de bombeo del sector agua", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Certificación de Equipos y Materiales, marzo.

US Department of Energy (1980), *Clasification and evaluation of electric motors and pumps*, DOE/CS-0147, febrero.

ROSA ARACELY ACOSTA TORRES



Ingeniera química por la Universidad Veracruzana en 1988. De 1989 a 1992 trabajó en la Comisión Federal de Electricidad en la Subgerencia de Ingeniería en el Departamento Mecánico de la central nucleoeléctrica Laguna Verde, como especialista en el área de mecánica nuclear. En 1992 se incorpora al IIE en la hoy Unidad de Ingeniería Mecánica como jefe de proyecto en el área de ahorro de energía y cogeneración. Es autora de varios artículos técnicos y miembro de la Association of Energy Engineers.

EDUARDO H. BUENDÍA DOMÍNGUEZ



Ingeniero mecánico electricista por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en el año de 1981. En ese mismo año se incorporó al IIE en la hoy Unidad de Ingeniería Mecánica. Actualmente es coordinador de especialidad del área Métodos de ingeniería mecánica para el uso eficiente de la energía, dedicándose principalmente a la realización, supervisión y evaluación de proyectos relacionados con el ahorro de energía y sistemas de cogeneración para los sectores energéticos, industriales y de servicios. Autor de varios artículos técnicos, es profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y de la Escuela de Ingeniería de La Salle.

mx9800145

Bomba de calor por absorción integrada a un sistema de purificación de efluentes

Sócrates Santoyo, Javier Siqueiros, Christopher Heard y Edgar Santoyo

Resumen

Se presentan los resultados derivados de la integración de una bomba de calor por absorción a un sistema de purificación de efluentes industriales. Se mencionan las ventajas de este tipo de bombas de calor con respecto a las de calor por compresión mecánica de vapor, así como las ventajas de usar bombas de calor en sistemas de destilación simple. Finalmente, se describe el equipo diseñado y construido, así como los resultados obtenidos de una prueba preliminar.

Introducción

La destilación es una operación unitaria de uso intensivo de energía que requiere desechar grandes cantidades de la misma al medio ambiente. La integración de bombas de calor a sistemas de destilación ha sido propuesta por varios autores con objeto de reducir los consumos de energía [Best, R., *et al.,* 1988; Eisa, M. A. R. *et al.,* 1987; Hodgett, D. L., 1990]. Sin embargo, pocos estudios se han realizado sobre equipos experimentales. Este trabajo presenta la integración de una bomba de calor por absorción a un sistema de purificación de efluentes por destilación simple. El equipo se diseñó y construyó en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) [Santoyo, S., 1995]. Este equipo experimental se evaluará bajo diferentes condiciones de operación en la purificación de efluentes.

Por otra parte, las reglamentaciones para controlar los contaminantes en las descargas industriales serán cada vez más rigurosas. En algunos casos, se puede utilizar la destilación para la recuperación de productos de efluentes, lo cual, además de cumplir con los requerimientos ambientales, permitirá recuperar parte del producto que pueda reciclarse. Un ejemplo de ello son los desechos líquidos de productos de fotografía donde se ha propuesto la utilización de bombas de calor para recuperar parte de productos de los efluentes [Kuroda, S., 1993; Mohanty, B. y Thavalingham, G., 1993]. Otra aplicación puede ser en la obtención de agua destilada a partir de salmuera geotérmica [Frías, J. L., 1991; Siqueiros, J. *et al.,* 1992] y simultáneamente obtener salmuera concentrada, la cual puede utilizarse para recuperar sales [Maloney, N., 1992; Mercado, S., *et al.,* 1979].

El equipo propuesto de integración de una bomba de calor por absorción a un sistema de purificación de efluentes tiene dos propósitos fundamentales: primero, evaluar la bomba de calor a diferentes condiciones de operación con varios pares de fluido de trabajo/absorbente; y segundo, mostrar la factibilidad de utilización en la purificación de efluentes y en la posible recuperación de productos. En el equipo se podrán probar algunos efluentes industriales que requieran recuperar parte de producto del efluente. Con objeto de valuar el equipo en las condiciones mencionadas, su diseño considera mucha flexibilidad para cambio de pares de trabajo, así como de efluentes a tratar.

Bomba de calor

La bomba de calor es un dispositivo que eleva la temperatura de una fuente de energía a un nivel más alto, la cual tiene mayor utilidad. El coeficiente de operación (COP, por sus siglas en inglés coefficient of performance) es un parámetro importante para la evaluación de las bombas de calor; este coeficiente indica cuántas veces la energía de alta calidad suministrada a la bomba de calor se multiplica; por ejemplo, un COP de cuatro indica que por cada 1 kW suministrado se obtienen 4 kW de la bomba de calor. Existen diferentes formas de clasificar las bombas de calor como por el tipo de energía que consuma o por la fuente y el receptor de calor, entre otras. En este trabajo se presenta la descripción de las bombas de calor por compresión que son las más comunes y las bombas de calor por absorción que son de interés en este trabajo.

Las bombas de calor han sido utilizadas para muchos fines [Reay, D. A. y Macmichael, D.B.A., 1988; Hodgett, D. L., 1990], entre ellos, el acondicionamiento de espacios (calefacción en lugares que lo requieren), secado de madera o ladrillos refractarios, calentamiento de albercas, para calefacción y enfriamiento de agua simultáneamente, así como en la destilación de whisky.

Bomba de calor por compresión

Las bombas de calor por compresión mecánica de vapor son el tipo más común. Sus principales componentes son un evaporador, un condensador, un compresor, una válvula de expansión y un fluido de trabajo (figura 1). El funcionamiento de la bomba es el siguiente: el fluido de trabajo se evapora en el evaporador a una temperatura T_{EV} mientras extrae una cantidad de calor Q_{EV} de la fuente de calor; subsecuentemente, el fluido de trabajo es comprimido por el compresor; enseguida, se condensa en el condensador a una temperatura T_{CO} donde cede una cantidad de ca-

La destilación es una operación unitaria de uso intensivo de energía que requiere desechar grandes cantidades de la misma al medio ambiente. La integración de bombas de calor a sistemas de destilación ha sido propuesta por varios autores con objeto de reducir los consumos de energía.

lor Q_{CO}, y, finalmente, se expande en la válvula de expansión para reiniciar nuevamente el ciclo.

Ventajas de las bombas de calor por compresión en sistemas de destilación simple

Existen dos ventajas en el uso de una bomba de calor por compresión en sistemas de destilación simple. Una ventaja está asociada con los niveles de temperatura que se utilizan, por lo cual se presenta brevemente la definición del COP Carnot. La otra ventaja se asocia con los intercambiadores de calor utilizados, los cuales presentan altos coeficientes de transferencia de calor.

El coeficiente de operación Carnot para este tipo de bomba de calor es:

$$COP = \frac{(T_{EV})}{(T_{CO} - T_{EV})} + 1 \qquad [1]$$

en donde:

T_{CO} temperatura absoluta de condensación del fluido de trabajo.

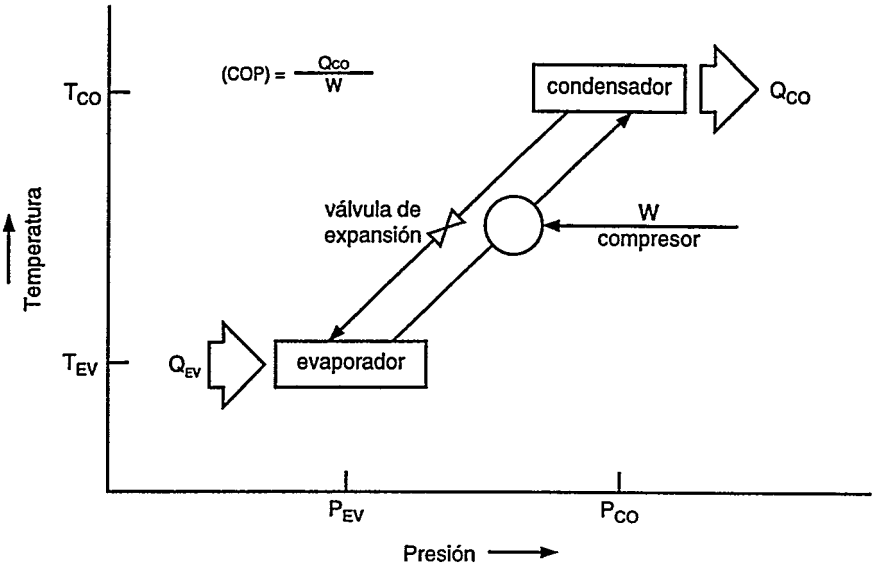
T_{EV} temperatura absoluta de evaporación del fluido de trabajo.

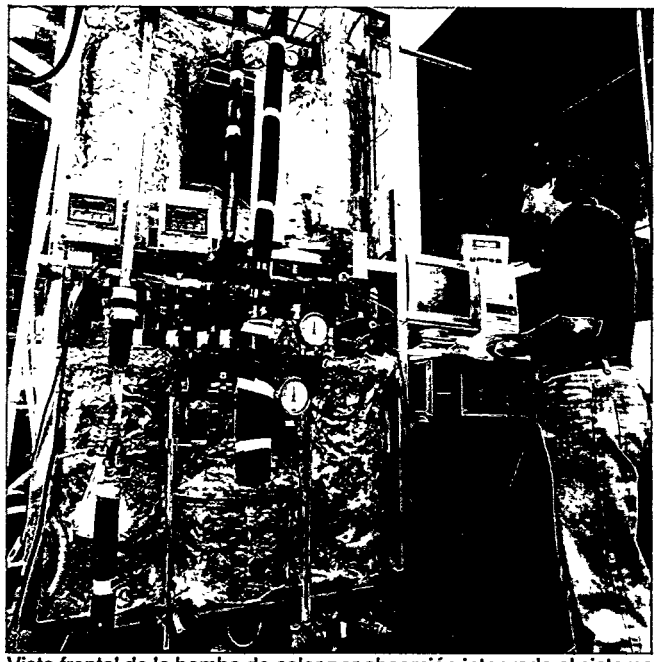
Puede observarse en la ecuación 1 que entre más pequeña sea la diferencia global de temperaturas (T_{CO} - T_{EV}) más altos serán los valores del COP. En un proceso de destilación simple la temperatura de evaporación del efluente y la temperatura de condensación del destilado pueden ser muy parecidas; esto ocasiona que la diferencia global de temperaturas sea pequeña, obteniéndose así altos valores de COP Carnot. Aunque en la práctica no se obtienen valores tan altos del COP como los previstos por el ciclo Carnot, los valores del COP Carnot están relacionados con los COP reales; es decir, entre más altos valores de COP Carnot se tengan, éstos producirán valores más altos de COP reales. En trabajos previos sobre sistemas de purificación de efluentes asistido por bombas de calor por compresión se obtuvieron valores altos de COP Carnot asociados con valores altos de COP reales [Frías, J. L., 1991; Frías, J. L., *et al.*, 1991; Siqueiros, J., *et al.*, 1993; Siqueiros, J., *et al.*, 1995].

Otra ventaja de esta bomba de calor por compresión integrada a siste-

Las reglamentaciones para controlar los contaminantes en las descargas industriales serán cada vez más rigurosas.

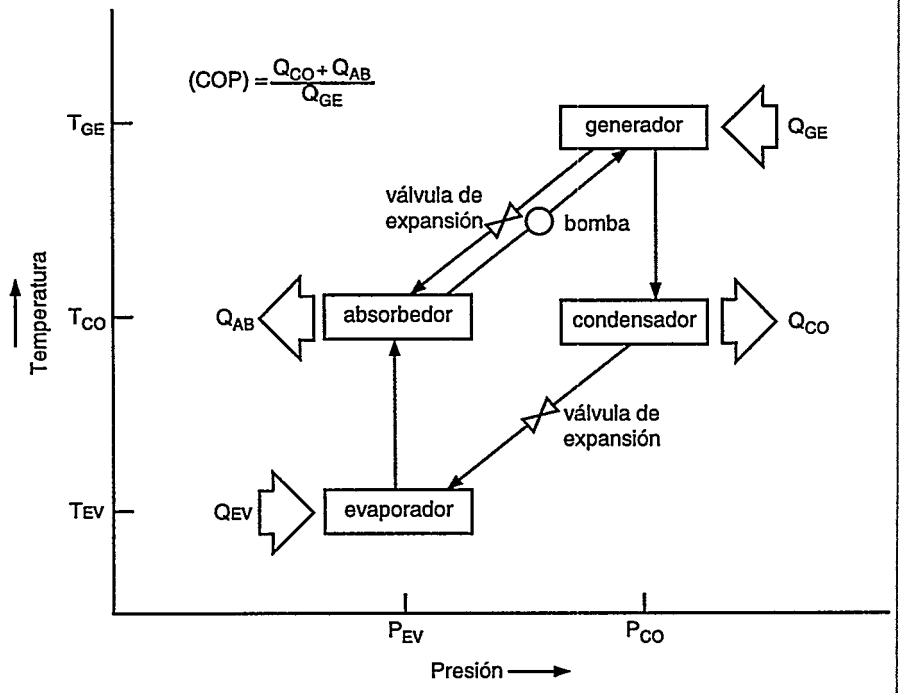
FIGURA 1
Bomba de calor por compresión mecánica de calor.





Vista frontal de la bomba de calor por absorción integrada al sistema de purificación de efluentes industriales.

FIGURA 2
Niveles de presión y temperatura para una bomba de calor por absorción.



mas de purificación es que se tienen altos coeficientes de transferencia de calor en el evaporador y condensador de la bomba de calor. El evaporador del fluido de trabajo de la bomba de calor es, simultáneamente, el condensador del destilado obtenido del efluente; el condensador del fluido de trabajo de la bomba de calor es, al mismo tiempo, el evaporador del efluente. En cada uno de estos dos intercambiadores de calor se presenta un cambio de fase en ambas corrientes (fría y caliente), lo cual provoca altos coeficientes de transferencia de calor, por lo que se tienen intercambiadores de calor compactos. Así, los costos iniciales de capital para estos intercambiadores de calor no serán elevados.

Bomba de calor por absorción

Esta bomba de calor tiene los mismos elementos que la bomba de calor por compresión, excepto que el compresor se sustituye por un circuito de generador/absorbedor. La figura 2 muestra un esquema de una bomba de calor por absorción. Las bombas de calor por absorción utilizan un par de trabajo (fluido de trabajo y absorbente). En el generador se recibe calor de alta calidad; la mezcla de fluido de trabajo y absorbente se calienta y se desprende parte de dicho fluido a una temperatura T_{GE} mientras recibe una cantidad de calor Q_{GE}. La solución con concentración débil en fluido de trabajo se regresa al absorbedor pasando antes por un economizador. El fluido de trabajo desprendido del generador pasa al condensador donde se condensa a una temperatura T_{CO} mientras proporciona una cantidad de calor Q_{CO} al receptor de calor. Posteriormente, pasa por la válvula de expansión antes de llegar al evaporador en donde se evapora a una temperatura T_{EV} mientras recibe una cantidad de calor Q_{EV}. Subsecuentemente, pasa al absorbedor donde se absorbe con la solución débil que proviene del generador a una temperatura T_{AB} y proporciona una cantidad de calor Q_{AB} al receptor de calor. Después, la solución rica en fluido de trabajo se bombea al economizador donde cede parte de calor a la solución débil en fluido de trabajo que proviene del generador. Finalmente, la solución concentrada en fluido de trabajo llega al generador para reiniciar el ciclo.

El equipo propuesto de integración de una bomba de calor por absorción a un sistema de purificación de efluentes tiene dos propósitos fundamentales: primero, evaluar la bomba de calor a diferentes condiciones de operación con varios pares de fluido de trabajo/absorbente; y segundo, mostrar la factibilidad de utilización en la purificación de efluentes y en la posible recuperación de productos.

Las principales ventajas de las bombas de calor por absorción sobre las bombas de calor por compresión son [Holland, F. A., 1990]:

a) Emplean poca energía mecánica (en contraste con la cantidad de energía eléctrica al motor del compresor en la mayoría de los casos).

b) Los fluidos de trabajo no tienen efectos adversos sobre el medio ambiente (como los fluorocarbones).

c) No cuentan con compresores que son componentes de alta tecnología, además de que los compresores no están disponibles en el mercado para cualquier fluido, capacidad y condiciones de operación requeridos.

d) Pueden diseñarse con facilidad a partir de datos termofísicos y termodinámicos apropiados.

Las ventajas de las bombas de calor por absorción en sistemas de destilación simple son análogas a las bombas de calor por compresión. La definición del coeficiente de operación Carnot cambia; para una bomba de calor por absorción se tiene:

$$COP = \frac{T_{EV}(T_{GE} - T_{AB})}{T_{GE}(T_{CO} - T_{EV})} + 1$$

En este caso, se presentan valores altos de COP cuando la diferencia de temperaturas (Tco-Tev) es pequeña como en los sistemas por compresión.

En este proceso de destilación propuesto se tendrán diferencias de temperatura pequeñas debido a que la presión de vapor del efluente a tratar, agua cruda en este caso es ligeramente más baja que el agua destilada que se obtiene, por lo cual las temperaturas de evaporación del agua cruda y la de condensación del agua destilada serán muy parecidas, lo que dará un coeficiente de operación teórico alto. Aunque en la práctica no se obtienen estos coeficientes teóricos de operación sí están relacionados con los coeficientes reales de operación; es decir, cuando se cuenta con altos COP Carnot se obtienen altos COP reales, como en el caso de las bombas de calor por compresión.

Descripción del equipo

El equipo consta de una bomba de calor por absorción integrada a un sistema de purificación de efluentes. El par de trabajo utilizado es agua/bromuro de litio, donde el agua es el fluido de trabajo y el bromuro de litio es el absorbente. El equipo se diseñó y construyó en las instalaciones del IIE [Santoyo, S., 1995]. La figura 3 muestra un esquema del equipo. En el generador se suministra vapor como medio de calentamiento, la solución rica en refrigerante se calienta y se desprende parte del fluido de trabajo. Después, este fluido de trabajo pasa al condensador donde al condensarse cede calor al efluente. Posteriormente, pasa por una válvula de expansión antes de llegar al evaporador donde al recibir calor del destilado del efluente se evapora; enseguida pasa al absorbedor donde se absorbe con la solución pobre en fluido de trabajo, la cual proviene del generador pasando previamente por el economizador antes de llegar al absorbedor; al absorberse cede calor al efluente. Finalmente, la solución rica en fluido de trabajo se bombea hacia el economizador antes de llegar al generador. Con objeto de balancear las cargas térmicas se incorporó un intercambiador de calor auxiliar, el cual condensa el exceso de destilado que se obtiene y que no condensa el evaporador de la bomba de calor.

Las pruebas preliminares con el sistema de purificación de efluentes integrado a la bomba de calor por absorción experimental resultaron satisfactorias, obteniéndose agua destilada a partir del efluente, el cual fue agua cruda en estas pruebas.

El trayecto del efluente es el siguiente (figura 3): la alimentación se divide en dos corrientes, una de ellas va hacia el condensador donde recibe una cantidad de calor Q_{CO} mientras se condensa el fluido de trabajo. La otra corriente va hacia el absorbedor donde recibe una cantidad de calor Q_{AB} al absorberse el fluido de trabajo con la solución pobre en fluido de trabajo. Luego se juntan las dos corrientes para pasar por un separador donde se separa el vapor y el líquido. El vapor se envía hacia el evaporador donde se condensa mientras el fluido de trabajo se evapora al recibir una cantidad de calor Q_{EV} y se obtiene agua destilada. Parte del vapor del efluente pasa al intercambiador de calor auxiliar donde se condensa mientras cede una cantidad de calor Q_{AUX} para balancear térmicamente al equipo. El líquido caliente separado reinicia el trayecto del efluente. En el circuito del efluente se va añadiendo la cantidad de destilado obtenida para contar con una operación continua.

Actualmente, se utiliza vapor proveniente de una caldera eléctrica como fuente de calor. Con este vapor

FIGURA 3
Niveles de presión y temperatura para una bomba de calor por absorción integrada a un sistema de purificación de efluentes.

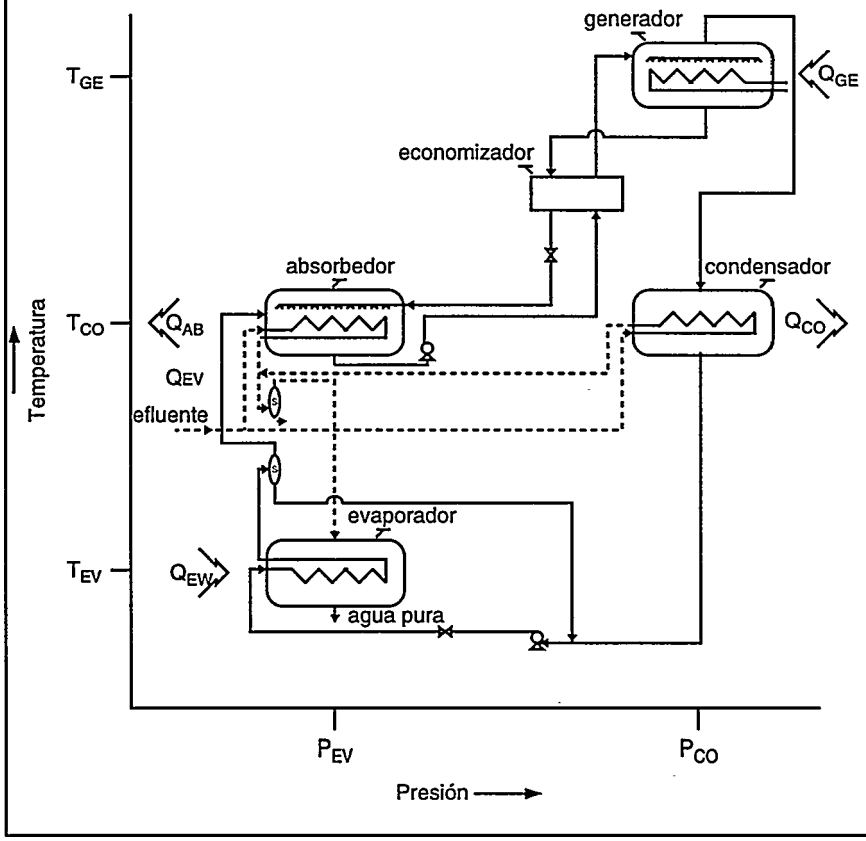
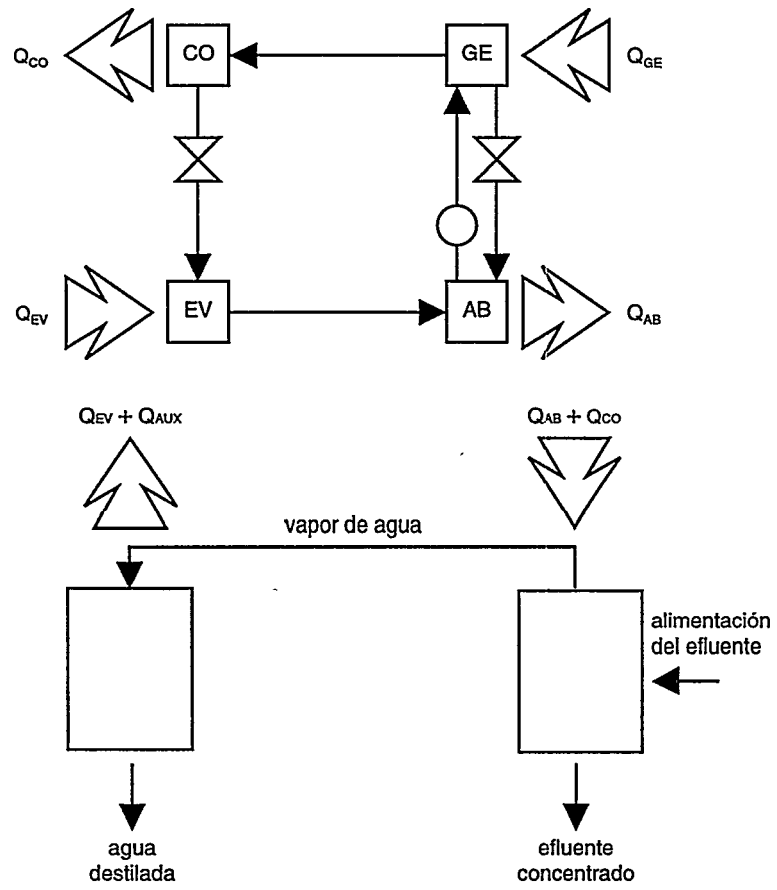


FIGURA 4
Diagrama simplificado de la bomba de calor por absorción integrada al sistema de purificación de efluentes industriales.



se tiene un buen control de la temperatura y de la carga térmica hacia el equipo. Se cuenta también con un circuito de agua de enfriamiento para el intercambiador de calor auxiliar que sirve para balancear térmicamente todo el equipo, debido a que la cantidad de calor que recibe el efluente es mayor que la cantidad de calor que puede ser rechazada en el evaporador.

El balance de calor para una bomba de calor por absorción está dado por [Smith, I. E., 1990]:

$$Q_{GE} + Q_{EV} = Q_{CO} + Q_{AB}$$

En este caso, se utilizará el calor del condensador y del absorbedor para calentar y evaporar parte el efluente. El vapor producido del efluente suministra calor al evaporador. Sin embargo, se tiene un exceso de calor proporcionado por el vapor, por lo cual se requiere de un intercambiador auxiliar para balancear térmicamente el equipo (figura 4).

$Q_{CO} + Q_{AB}$ = calor recibido por el efluente (evaporación)

$Q_{EV} + Q_{AUX}$ = calor rechazado por el efluente (condensación)

$$Q_{CO} + Q_{AB} = Q_{EV} + Q_{AUX} \qquad [3]$$

De la ecuación 3 se requiere que la capacidad del intercambiador de calor auxiliar sea:

$$Q_{AUX} = Q_{GE}$$

En este caso, el intercambiador de calor auxiliar permite balancear las cargas térmicas, además de facilitar la operación y evaluación del equipo. Sin embargo, en un equipo industrial de tratamiento de efluentes, el calor rechazado en el intercambiador de calor auxiliar podría utilizarse para precalentar al efluente.

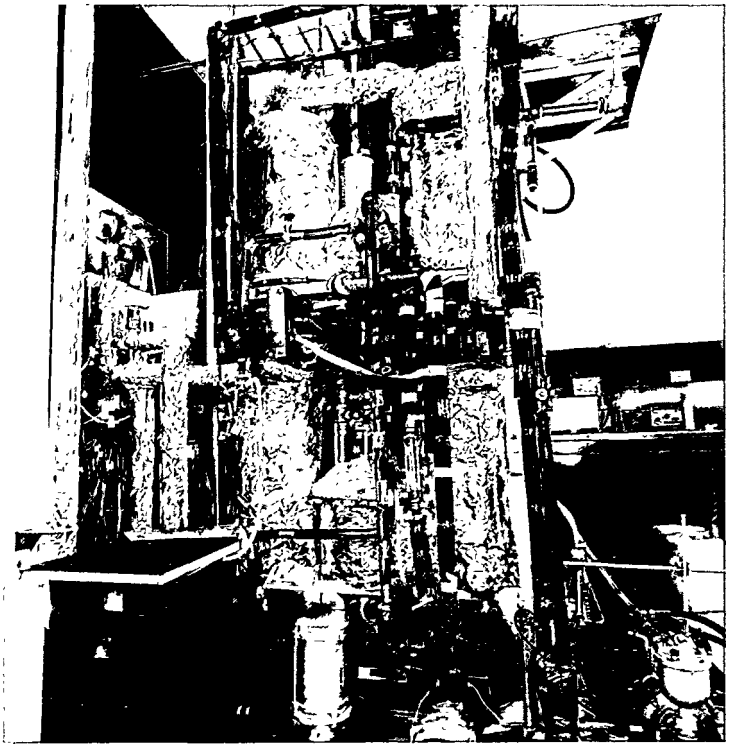
En cuanto a la operación del equipo y su posterior evaluación se cuenta con instrumentación para monitorear y registrar los parámetros necesarios. Se tienen termopares, transductores de presión, flujómetros, refractómetro, controladores de frecuencia, además, de un adquisitor de datos que permite el registro de las variables con objeto de efectuar la evaluación del equipo.

La fotografía 1 muestra una vista frontal del equipo donde se aprecian los componentes del mismo. La fotografía 2 muestra una vista posterior del equipo. En estas fotografías se aprecia que casi la totalidad del equipo está montado sobre una base, lo que facilitaría su traslado a alguna empresa cuando se requiriera demostrar dicha tecnología.

Resultados

Las pruebas preliminares con el sistema de purificación de efluentes integrado a la bomba de calor por absorción experimental resultaron satisfactorias, obteniéndose agua destilada a partir del efluente, el cual fue agua cruda en estas pruebas. Las condiciones de estado cuasi estable se alcanzaron luego de 35 a 40 minutos, considerados desde el inicio de la prueba. Además, con objeto de asegurar por completo la obtención de agua destilada se colocó una trampa de líquido a la entrada del evaporador de la bomba de calor.

La figura 5 muestra las variaciones de las temperaturas en el generador, condensador, evaporador y absorbedor, en función del tiempo bajo condiciones cuasi estables. En dicha figura se nota que la variación de la temperatura es pequeña en cada uno de los cuatro componentes de la bomba de calor. También es notorio que las temperaturas de condensación y absorción son muy parecidas. Para incrementar la temperatura de absorción debe mejorarse el proceso de ab-



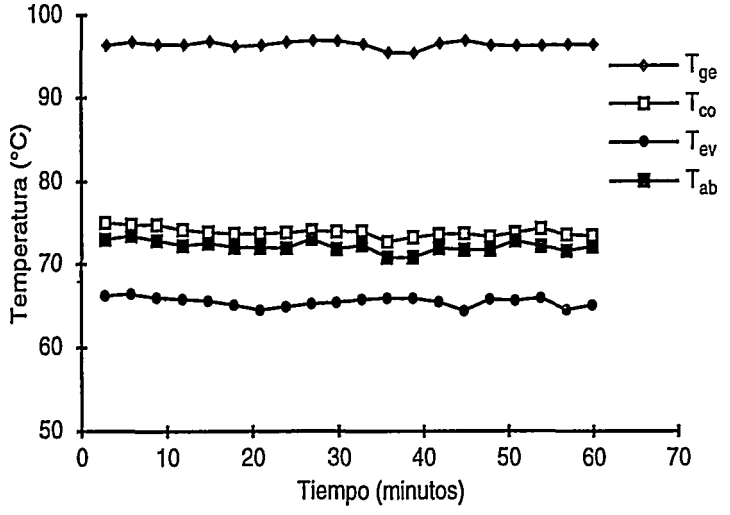
Vista posterior de la bomba de calor por absorción.

sorción, lo cual incrementará el coeficiente de operación de la bomba de calor.

Por otro lado, la temperatura del evaporador es la que presenta una mayor variación en esta prueba, ya que se tuvieron fluctuaciones en el flujo del efluente dentro del sistema. Esta fluctuación fue ocasionada por el flujo en dos fases a la salida del absorbedor y a la entrada del agua fría del circuito del efluente como reposición del destilado obtenido, así como por el control de la presión absoluta en el circuito del efluente, la cual presentó ligeras variaciones también. El flujo de agua destilada obtenida fue de 2.1 kg h^{-1}. Los análisis del agua destilada obtenida no se realizaron en estas pruebas, sin embargo en pruebas subsecuentes se llevarán a cabo para comprobar la pureza del destilado obtenido y de este modo completar la evaluación final del sistema. Las demás pruebas preliminares fueron similares a la presentada en la figura 5, se variaron flujos de la solución y del efluente, y de las presiones absolutas.

FIGURA 5

Evolución de las temperaturas en función del tiempo durante una prueba preliminar del equipo experimental.



Conclusiones

Se cuenta con un equipo totalmente diseñado y construido en el IIE que se evaluará con el par de trabajo agua/bromuro de litio y después con otros pares de trabajo. En pruebas preliminares, el equipo operó satisfactoriamente. Se obtuvo agua destilada hasta 2.1 kg/h. Estas pruebas permitieron verificar el buen funcionamiento de todo el equipo, al igual que la adquisición y registro de datos. Se obtuvieron también algunas condiciones límite de operación como presiones absolutas y flujos. Asimismo, se detectaron algunas pequeñas mejoras que serán efectuadas con objeto de incrementar el control de la operación de todo el equipo. Se cuenta con un programa de pruebas para la evaluación del equipo y con un análisis de posibles pares de trabajo a utilizar. En este equipo se podrán utilizar algunos efluentes industriales con objeto de obtener datos experimentales que permitan una evaluación completa del comportamiento del equipo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al M. en I. Víctor M. Arellano G. su decidido apoyo para la construcción del equipo. Se agradece también a Jorge Avilés F. por su colaboración técnica.

Referencias

Best, R., C.L. Heard y F.A. Holland (1988), *Developments of geothermal energy in Mexico-part sixteen: the potential for heat pump technology,* J. Heat Recovery Systems & CHP, 8 (3), 185-202.

Eisa, M.A.R., R. Best y F.A. Holland (1987), *Heat pump assisted water purification systems,* 3d. International Symposium on the Large Scale Applications of Heat Pumps, pp. 35-43, Oxford, Inglaterra.

Frías, J. L. (1991), *An experimental study of a heat pump assisted purification system for geothermal brine,* M. Sc Thesis, University of Salford, Inglaterra.

Frías, J. L., J. Siqueiros, H. Fernández, A. García y F.A. Holland (1991), *Developments of geothermal energy in Mexico-part thirty six: the co-*

missioning of a heat pump assisted effluent purification system, J. Heat Recovery Systems & CHP, 11(4), 297310.

Hodgett, D. L. (1990), ``Aplicaciones industriales de las bombas de calor por compresión mecánica de vapor en el Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor´´, Programa de Cooperación e Investigación entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, y la Universidad de Salford, Reino Unido, ISBN 9686314-03-2.

Holland, F. A. (1990), ``Fundamentos y aspectos económicos de las bombas de calor en el Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor´´, Programa de Cooperación e Investigación entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, y la Universidad de Salford, Reino Unido, ISBN 968-6314-03-2.

Kuroda, S. (1993), *Photo/effluent treatment technology: compact heat pump unit reduces energy consumption by two thirds,* IEA Heat Pump Centre Newsletter, 11 (1).

Maloney, N. (1992), *Prefeasibility study assessing the application of mechanical vapour recompression evaporation in the process of recovery of lithium from mexican geothermal brines,* contrato núm. 4.1014/91-018G, EA Technology, Capenhurst, Chester CH1 6ES, Inglaterra.

Mercado, S., J. A. López, R. Angulo, G. H. Barroso y M. Castañeda (1979), ``Extracción de KCl de las salmueras de desecho de la planta geotérmica de Cerro Prieto´´, Reporte interno IIE/FE/G5-10, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México.

Mohanty, B. y G. Thavalingham (1993), *Techno-economic viability of upgrading thermal effluents in industries: application in developing countries,* J. Heat Recovery Systems & CHP, 13(3), 189-200.

Reay, D. A. y D.B.A. Macmichael (1988), *Heat pump design and applications,* Pergamon Press, Oxford, Inglaterra.

Santoyo, S. (1995), *An experimental study of a heat pump assisted effluent purification system,* M. Sc Thesis, University of Salford, Inglaterra.

Siqueiros, J., H. Fernández, C. Heard y D. Barragán (1992), ``Desarrollo e implantación de tecnología de bombas de calor. Fase II´´, Reporte Interno IIE/FE/11/2963/F , Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México.

Siqueiros, J., L. Cuevas, Z.K. López y R. Siller (1993), ``Diseño, construcción y pruebas preliminares de un equipo portátil integrado por una bomba de calor y un sistema de tratamiento de efluentes´´, II Memorias, Conferencia Latinoamericana de Turbomáquinas, Cuernavaca, Morelos, del 15 al 18 de febrero.

Siqueiros, J., C. Heard y F.A. Holland (1995), *An integrated heat pump assisted geothermal brine purification system,* J. Heat Recovery Systems & CHP. pp. 655-664.

Smith, I. E. (1990), ``Bombas de calor por absorción en el Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor´´, Programa de Cooperación e Investigación entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, y la Universidad de Salford, Reino Unido, ISBN 968-6314-03-2.

SÓCRATES SANTOYO GUTIÉRREZ



Ingeniero químico egresado de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Maestro en ingeniería química por la University of Salford, Inglaterra. Desde 1979 es investigador de la hoy Unidad de Geotermia del IIE. Efectuó estudios de especialización sobre fluidos de perforación y cementos para pozos de alta temperatura en el Chemical, Electrical and Mechanical Research Center de Halliburton, en Oklahoma, y en Maurer Engineering, en Texas, Estados Unidos. Ha participado y dirigido proyectos de su especialidad para los principales campos geotérmicos de México. Durante 1984-1986 participó en un proyecto con el ENEL de Italia y la CFE. Ha impartido cursos y participado en foros referentes a su especialidad tanto en el país como en el extranjero. Tiene publicados más de 70 artículos de investigación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

JAVIER SIQUEIROS ALATORRE



Ingeniero químico, egresado de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Realizó estudios en la Universidad Tecnológica de Compiegne, Francia, donde obtuvo el diploma de estudios avanzados y el grado de doctor ingeniero en ingeniería química en la especialidad de análisis de procesos industriales. En 1983 ingresó al IIE, a la hoy Unidad de Geotermia, como investigador en el área de aprovechamiento integral de energía; desde 1992 es responsable del Laboratorio Termodinámico de Baja Entalpía de la Unidad de Energías No Convencionales. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde 1984.

CHRISTOPHER LIONEL HEARD



Licenciado en estudios de la energía por la Universidad de Sheffield en donde obtuvo también su doctorado en ingeniería del medio ambiente en edificios. Ha publicado diversos artículos en revistas internacionales con arbitraje y presentado trabajos en conferencias nacionales e internacionales. Ha sido asesor de tesis de licenciatura, maestría y doctorado. En 1983 se incorpora al IIE como investigador de la hoy Unidad de Geotermia. Entre sus actividades actuales destaca el desarrollo y diseño para uso industrial de un refrigerador por absorción/compresión de amoníaco/nitrato de litio, piloto. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde 1987.

EDGAR SANTOYO GUTIÉRREZ



Ingeniero químico y maestro en ingeniería química, especialidad en fenómenos de transporte, por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Desde 1983 es investigador de la hoy Unidad de Geotermia del IIE. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con la simulación de procesos fisicoquímicos en sistemas geotérmicos y en la caracterización química e isotópica de fluidos. Ha publicado más de 50 artículos técnicos y dictado cursos y conferencias de especialización relacionados con la geoquímica tanto en el país como en el extranjero. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

mx9800209

leccionamos al IIE sabiendo que tenía experiencia en el desarrollo de simuladores en tiempo real más complejos como el simulador para la central nucleoeléctrica Laguna Verde y el del Centro de Adiestramiento de Operadores de Ixtapantongo (CAOI).

El proyecto se realizó conjuntamente con el IIE. Actualmente nos encontramos en la etapa de validación de resultados ajustando los reguladores automáticos de tensión con el Sitirams; los datos obtenidos hasta la fecha han sido muy cercanos a los reales; consideramos que en breve se realizarán las pruebas con el Sitirams, logrando disminuir los tiempos de prueba con las máquinas síncronas en vacío y con carga.

Con este equipo se puede simular el generador y las condiciones del sistema y del transformador, con lo que se ajusta el regulador de tensión estando fuera de línea —este era uno de los principales problemas que se tenían—. Se pueden simular condiciones de falla y pruebas con el regulador sin someter a esfuerzos o poner en riesgo el equipo. Se pueden simplificar las pruebas en campo.

Retomando parte de su comentario anterior, ¿qué sugerencias nos brindaría para optimar este equipo?

Vale la pena mencionar que los fabricantes tienen simuladores para probar su equipo; venden sus reguladores de velocidad y de tensión suministrando alguna unidad simuladora para preajustar; sin embargo, estos equipos tienen ciertas limitaciones, como el que sólo sirvan para su marca; nosotros queríamos algo más completo en donde pudiéramos probar todas las condiciones del generador. El Sitirams es único, dada la universalidad de su aplicación; aun así, todavía existe cierto tipo de reguladores que no se adecuan con facilidad a este simulador.

Toda herramienta es susceptible de mejora, sobre todo si es un prototipo. El Sitirams presentó problemas que se fueron resolviendo. Podría mejorarse, por ejemplo, la simulación que existe de la interacción entre la máquina síncrona —el generador como tal— y el sistema interconectado para que los resultados que se obtengan con el Sitirams sean más idénticos a las reales; otra de las ideas es que el *software* del sistema no sea muy rígido y permita hacer correcciones fáciles de los reportes de discrepancias, asimismo, se podría modificar la utilería para la presentación de resultados en una versión más amigable.

El reto siguiente es que los Sitirams que está adquiriendo la Subdirección de Generación se aprovechen cabalmente y explotar el nuestro comercialmente, pero creo que vamos por buen camino y que es un desarrollo útil para la empresa.

¿Cuentan con desarrollos de este tipo de otras empresas o países?

Específicamente en el Lapem no, sin embargo, en algunas instalaciones de la CFE el proveedor del sistema de regulación de velocidad ha entregado este sistema con su simulador, el cual permite probar el regulador en sus funciones básicas. Sabemos que dichos simuladores son específicos para un solo equipo, por lo que no se pueden aplicar a otros.

Puedo apuntar también, que hemos desarrollado en conjunto con el IIE diferentes equipos de prueba en otras áreas; para esto consideramos lo siguiente: si ya existe en el mercado y cuánto nos cuesta. En realidad, el equipo comercial es muy caro. También es importante considerar el tiempo en que lo tenemos. Una de las opciones fue el IIE, consideramos su capacidad y el tiempo que requeriría para desarrollar el proyecto.

¿Hacia dónde se dirigen, cuáles son sus metas futuras?

Me gustaría mencionar que existen unos cuantos laboratorios de este tipo en el mundo. Nuestros laboratorios se hicieron la visión de desarrollar la industria eléctrica del país y garantizar los suministros que recibe la CFE, así como para apoyar a los centros de investigación.

Una de nuestras metas es adecuarnos a los cambios del país y del mundo, al igual que apoyar a la CFE en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. La competencia misma nos empuja a redo blar esfuerzos; por ello, uno de los retos principales es adaptarnos al cambio; creo que en el Lapem se ha procurado hacerlo, los días y los resultados van diciendo si vamos por el camino adecuado. Otra meta es ser rentables, queremos hacer más con lo que tenemos y lo hemos logrado. Y, claro está, cumplir con nuestra misión: asegurar a la CFE y a otros clientes el suministro de servicios técnicos y tecnológicos aplicados a materiales, equipos y sistemas para contribuir al cumplimien to de sus respectivos objetivos con nuestro compromiso de rentabilidad, productividad, eficiencia y calidad.

Todo el que conoce un simulador se da cuenta de las ventajas de contar con uno: disminuye el tiempo de capacitación; el personal se mantiene al día en lo que puede estar sucediendo en su proceso y tener el control de acciones que normalmente no enfrenta; se reproducen las diferentes condiciones operativas; no se pone en riesgo el equipo, pues es un ambiente simulado; aumenta la disponibilidad del equipo que se opera, y ayuda al análisis de fallas.

Entrevista realizada por Helena Rivas López del Departamento de Difusión.

Herramientas de inteligencia artificial de apoyo al análisis de flameos en aisladores de alta tensión

Guillermo Rodríguez Ortiz, Manuel Mejía Lavalle y Gerardo Montoya Tena

La minería de datos se ha venido empleando con éxito en muy diversos campos y problemas del mundo real como en redes de telecomunicación de gran escala [Sasisekharan R., Sedri *et al.*, 1996], en el proceso de producción de una planta de combustible nuclear [Leech, W., 1986] o en la producción de energía eléctrica [Hernández, V., 1995], por citar tan sólo tres ejemplos. La minería de datos se aplica principalmente cuando se han almacenado grandes cantidades de datos históricos con la expectativa de explotarlos buscando el conocimiento implícito en esta información o, dicho en otras palabras, se busca determinar tendencias o patrones de comportamiento que permitan mejorar los procedimientos actuales, ya sean éstos de mercadotecnia, producción, operación o mantenimiento, entre otros. En resumen, minería de datos o descubrimiento de conocimiento es la extracción no trivial de información importante que está implícita en los datos [Piatetsky-Shapiro, G. *et al.*, 1991].

Algunas de las técnicas computacionales tradicionalmente usadas para realizar la minería de datos son redes neuronales artificiales, inducción de árboles de decisión, reglas de decisión y métodos ``basados en casos similares´´ [Kolodner, J., 1993].

En particular, las ventajas de la técnica de inducción de árboles de decisión basados en el algoritmo ID3 [Quinlan, J., 1979 y 1989] son:

- El conocimiento se extrae directamente, sin supervisión, de la información histórica registrada.
- Cuando el conocimiento inducido se incorpora a un sistema experto en forma de reglas se obvia la etapa de adquisición del conocimiento, la cual se considera un cuello de botella en la construcción de dichos sistemas [Mejía, M. *et al.*, 1991].
- La actualización del conocimiento es un proceso sencillo, lo cual es apropiado para entornos donde el conocimiento es dinámico con el tiempo.
- A diferencia de las redes neuronales clásicas, los árboles de decisión describen el conocimiento aprendido en forma explícita (son árboles que fácilmente se pueden transformar en reglas de producción).
- El ID3 es un algoritmo que no consume mucho tiempo computacional en la etapa de aprendizaje, lo cual es importante para aplicaciones en tiempo real.

En este artículo se proponen y describen cuatro herramientas de inteligencia artificial desarrolladas en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y que están basadas en una combinación del algoritmo ID3 y del método ``basado en casos similares´´. La primer herramienta construye el árbol de decisión a partir de datos históricos (etapa de aprendizaje); las otras tres herramientas operan a partir del árbol de decisión previamente creado (etapa de explotación) para:

a) Generar reglas de producción con la intención de que el usuario fácilmente pueda interpretar el conocimiento extraído.

b) Funcionar a la manera de un sistema experto, en donde el usuario puede presentar casos hipotéticos y el sistema va haciendo preguntas hasta llegar a una conclusión.

c) Hacer pruebas con muchos casos conocidos (casos que no forman parte del conjunto de ejemplos de aprendizaje) obteniendo así la eficiencia del sistema para clasificar correctamente este tipo de casos y estimar la confiabilidad del conocimiento extraído.

Aunque el presente artículo se enfoca al problema del flameo en aisladores, este trabajo también puede aplicarse en otros problemas similares.

El problema del flameo en aisladores de alta tensión

Las líneas de alta tensión que transmiten la electricidad normalmente están soportadas por postes o torres. Entre la línea y el poste se colocan piezas de material no conductor o aisladores externos, que impiden se establezca conducción entre la línea energizada y el poste. Debido a que los aisladores externos están sujetos a la acción del medio ambiente, con el tiempo, la superficie del aislador se cubre de partículas contaminantes conductoras, a tal grado, que se establece un arco de corriente o flameo entre la línea y el poste, que daña a todo el conjunto y ocasiona la interrupción de transmisión de energía.

La minería de datos se ha venido empleando con éxito en muy diversos campos y problemas del mundo real como en redes de telecomunicación de gran escala, en el proceso de producción de una planta de combustible nuclear o en la producción de energía eléctrica

La forma tradicional de evitar el problema es limpiando periódicamente los aisladores con chorros de agua. Sin embargo, muchas veces este recurso no es adecuado, debido a que el número de aisladores es muy grande y la cantidad de cuadrillas de limpieza es limitada; además, como la acción del medio ambiente no es constante, a veces ocurre que se limpian aisladores que no lo necesitan o viceversa.

Una manera alterna de manejar el problema es contar con un sistema que prediga la ocurrencia inminente del flameo con tiempo suficiente para que los aisladores se limpien. Para captar datos se ha instalado en una subestación eléctrica el equipo necesario para tomar un registro cada hora de las condiciones ambientales.

Este equipo es capaz de registrar la velocidad del viento (desde cero a 162 kilómetros por hora); la dirección del viento (de cero a 360 grados); la presión barométrica (de 650 a 1 050 milibars); la precipitación pluvial (de cero a 250 milímetros de lluvia); la temperatura ambiente y de punto de rocío (de -50 a 50 °C); la fecha (día y mes), y la hora (en horas, minutos y segundos). A partir de estos datos se calcula la humedad relativa y la absoluta.

La medición del grado de contaminación en el aislador se hace en forma indirecta mediante el registro de la resistencia superficial (de cero a 3 675 kilohms) en el aislador, de tal manera que mientras más baja sea la resistencia, se deduce que el aislador está más contaminado y por tanto, mayor es el riesgo de la ocurrencia del flameo. Una discusión mucho más técnica del problema la han llevado a cabo González, J., (1993), Hampton, B., (1964) y Fierro, J. *et al.* (1995). La información así colectada en archivos con columnas para cada variable y ordenados en forma cronológica sirve de base para realizar la minería de datos o extracción del conocimiento implícito.

La predicción de la resistencia superficial actualmente es motivo de investigación futura. En este artículo se presenta un análisis para resolver tres cuestiones fundamentales relacionadas con la caracterización del flameo:

a) ¿Las variables ambientales que se están registrando son las adecuadas para poder establecer positivamente una relación entre ellas y la resistencia superficial?

b) ¿Cuál o cuáles variables son las que más influyen en el comportamiento de la resistencia superficial?

c) ¿Qué patrón de comportamiento de las variables ambientales provoca que la resistencia superficial sea relativamente baja?

Dadas las características del problema de flameo, las tres preguntas anteriores pueden resolverse usando técnicas de minería de datos, específicamente, árboles de decisión.

Las herramientas de minería de datos son valiosos algoritmos para extraer el conocimiento disperso en grandes volúmenes de información, ayudando a detectar patrones y tendencias de comportamiento.

Descripción de las herramientas propuestas

En esta sección se describen las cuatro herramientas de inteligencia artificial desarrolladas en el Departamento de Sistemas de Información del IIE, cuyo mecanismo de extracción de conocimiento está basado en una combinación del algoritmo ID3 y del método ``basado en casos similares''.

Herramienta para generar el árbol de decisión (HGAD)

Esta herramienta construye el árbol de decisión a partir de información histórica (etapa de aprendizaje). Los datos están organizados en una tabla donde existen ejemplos (renglones), y cada ejemplo está formado por diversos atributos y una clase (columnas). La herramienta se basa en el algoritmo ID3, según se describe en Winstan P. (1994) o consistente en:

a) Determinar el atributo que mejor divide los datos en subconjuntos homogéneos, para lo cual se calcula respecto a cada atributo (columna) el desorden o entropía de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$E = \sum_{r} [Nr/Nt] \left[\sum_{c} \{-(Nrc/Nr) \log_2 (Nrc/Nr)\}\right]$$

donde

Nr = número de ejemplos en la rama r.

Nt = número total de ejemplos en todas las ramas.

Nrc = total de ejemplos en la rama r de la clase c.

b) El atributo para el cual se obtenga la menor E será tomado como nodo del árbol (atributo-nodo) y sus ramas serán todos[1] los valores que puede tomar tal atributo [Guzmán, A. 1995].

c) Para el atributo-nodo, se seleccionan todos los ejemplos (renglones) cuyo valor de atributo sea igual. Para este subconjunto de ejemplos se debe verificar:

C1. Si todos pertenecen a una misma clase, se etiqueta la rama con esa clase.

C2. Si el subconjunto es nulo, se etiqueta la rama como ``clase desconocida''.

C3. Si pertenecen a diferentes clases, ir al paso a, con el subconjunto de ejemplos.

d) Si faltan ramas por etiquetar, ir al paso a, de otra manera, terminar.

A este algoritmo, que denominaremos ``ID3 completo con clases desconocidas'' o simplemente ID3-DES, le hemos modificado el paso C2 de la siguiente manera:

C2. Si el subconjunto es nulo, buscar el ejemplo más parecido (el de menor distancia) a la rama actual; si la distancia es aceptable (de acuerdo con una tolerancia de error previamente fijada), etiquetar la rama con la clase del ejemplo más parecido; de otra forma, etiquetar la rama como ``clase desconocida''.

A esta variación, que es una combinación del algoritmo ID3 y del método ``basado en casos similares'', le llamaremos ``ID3 completo al más cercano'' o simplemente ID3-CER.

Estos algoritmos fueron codificados en lenguaje C. La herramienta resultante toma como datos de entrada un archivo de texto que contiene un diccionario con las clases, atribu-

tos y los valores de los atributos y una tabla de atributos y clases (columnas), y ejemplos (renglones).

La herramienta genera un archivo de salida tipo texto con un árbol de clasificación siguiendo un formato especial de ligas que tiene sentido para las tres herramientas que se describen en las siguientes secciones.

Herramienta para visualización del conocimiento descubierto (HVCD)

La herramienta HVCD sirve para visualizar las reglas de producción (o conocimiento descubierto) encontradas a partir de los ejemplos; toma como datos de entrada el archivo con el árbol de decisión y genera uno en donde se pueden leer las reglas de producción que representa el conocimiento descubierto.

Herramienta para consultas tipo sistema experto (HCSE)

Esta herramienta toma como datos de entrada el archivo con el árbol generado por HGAD e inicia una sesión interactuando con el usuario a manera de un sistema experto, hasta llegar a una conclusión.

Herramienta para estimar la confiabilidad del conocimiento descubierto (HECCD)

Esta herramienta sirve para manejar casos de prueba en forma de lotes (*batch*) sin intervención del usuario; toma como datos de entrada el árbol generado por HGAD y un archivo con casos de prueba. Los resultados aparecen en pantalla.

El archivo de casos no lleva sección de diccionario, sólo la tabla con casos de prueba; esta tabla puede o no llevar la columna de clase; si lleva la columna de clase la herramienta calculará la eficiencia de clasificación, indicando qué casos fueron correctamente clasificados y cuáles no; si la tabla no lleva columna de clase entonces la herramienta se limitará a clasificar (asignar una clase) a cada uno de los casos de prueba.

Resultados experimentales y comparaciones

Resultados usando las herramientas propuestas

Para realizar los experimentos se utilizó información meteorológica y de resistencia superficial correspondiente a 21 días (504 ejemplos) que se registraron para un aislador del tipo N-120P. Los atributos considerados fueron hora del día, dirección del viento, velocidad del viento, temperatura, precipitación pluvial, temperatura de punto de rocío, presión barométrica, humedad relativa y humedad absoluta. Como clase se tomó la columna de resistencia superficial.

Los datos de cada atributo se dividieron en grupos o intervalos, por ejemplo, la columna de resistencia superficial se dividió en tres grupos: ``baja'', ``media'' y ``alta''.

Determinando si existe relación entre las variables ambientales y la resistencia superficial

La herramienta HGAD (usando el algoritmo ID3-CER) se alimentó con esta información, obteniéndose el árbol de decisión en 3.68 segundos usando una PC con procesador 80486 a 33 MHz. A continuación, la herramienta HECCD se alimentó con el árbol de decisión y con nueve días (216 casos de prueba) seleccionados aleatoriamente, no adyacentes, obteniéndose una eficiencia de clasificación de 82.87% (179 casos correctamente clasificados y 37 mal clasificados).

Con este resultado se puede establecer que las variables ambientales registradas sí determinan el comportamiento de la resistencia superficial en más de 80% de las veces.

CUADRO 1

Variable	*Frecuencia*	*Porcentaje*
Humedad relativa	495	99.79
Hora del día	391	78.83
Dirección de viento	282	56.85
Temperatura de rocío	174	35.08
Presión barométrica	160	32.25
Velocidad de viento	88	17.74
Humedad absoluta	63	12.70
Temperatura	25	5.04
Precipitación	10	2.01

A futuro se debe trabajar en la adaptación de estos algoritmos para la predicción del flameo. Esto incluye la selección de intervalos para las variables meteorológicas basada en clasificaciones existentes del clima y el análisis de otros bloques de datos y ver si las reglas generadas son iguales o diferentes para distintas épocas del año.

Determinando las variables que más influyen

Para determinar cuál es la variable meteorológica que más influye en el comportamiento de la resistencia superficial se utilizó la herramienta HVCD para generar las reglas de producción del conocimiento extraído.

Analizando estas reglas se puede construir un cuadro del número de veces que una variable aparece en todo el conjunto de reglas (cuadro 1).

Observando el cuadro 1 se detecta que la variable humedad relativa aparece en casi todas las reglas generadas, por lo que es claro que esta variable es fundamental en el comportamiento de la resistencia superficial. Por otro lado, las variables de precipitación pluvial y temperatura apenas aparecen en las reglas menos de 6%, es decir, parece que no afectan en gran medida a la resistencia superficial, sin embargo, nótese que la temperatura ya está incluida en el cálculo de la humedad relativa y durante el periodo analizado no hubo mucha precipitación pluvial.

CUADRO 2

Herramienta	*ID3-CER*	*ID3-DES*	*C4.5*	*CN2*
Casos-Efi	82.9 %	72.2 %	82.9 %	82.4 %
Ejem-Efi	99.6 %	99.6 %	85.3 %	92.0 %
# reglas	496	253	9	52
Tiempo (seg.)	3.68	3.13	143	74

donde:
Casos-Efi = eficiencia para clasificar casos conocidos.
Ejem-Efi = eficiencia para clasificar los mismos ejemplos usados en el entrenamiento.
reglas = número de reglas generadas.
Tiempo(seg.) = segundos requeridos para generar el árbol de decisión.

Determinando las circunstancias que provocan que la resistencia superficial sea baja

Seleccionando las reglas que concluyen con una resistencia superficial "baja", se pueden examinar las circunstancias que inducen hacia el flameo. Por ejemplo, la siguiente regla, extraída por las herramientas propuestas es:

Si humedad relativa = 60.5/65.9
y temperatura de rocío = -6.0/-3.9
y hora del día = 0:00/2:20
entonces,
resistencia superficial = 1013/3489

indica que la resistencia superficial es "baja" cuando la humedad relativa es alta, la temperatura de rocío es baja y la hora del día es entre las 0:00 y 2:20 horas.

La definición de "alta", "baja" y "media" sólo es válida en relación con el grupo de datos analizados y no debe considerarse como una definición absoluta.

Finalmente, usando la herramienta HCSE el experto humano puede plantear casos hipotéticos y observar cómo se comporta la resistencia superficial.

Comparación contra C4.5 y CN2

Con la misma información descrita en los resultados usando las herramientas propuestas se alimentaron las herramientas C4.5 [Quinlan, J., 1989] y CN2 [Clark, P. *et al.*, 1988]; los resultados obtenidos se integraron en el cuadro 2.

Analizando el cuadro 2 se puede observar que:

- La eficiencia para clasificar los mismos ejemplos usados en el entrenamiento es mejor para ID3-DES e ID3-CER, ya que estos algoritmos generan el árbol de decisión completo.
- La eficiencia para clasificar casos conocidos es similar para ID3-CER, C4.5 y CN2 (82%), aunque ID3-CER requiere menos tiempo para generar el árbol de decisión, por lo que puede ser una mejor opción para ambientes en tiempo real.
- Aunque el número de reglas obtenidas por ID3-CER es grande (496), gracias a este nivel de detalle de las reglas es posible realizar un análisis de frecuencia de aparición de cada variable, como el realizado en la determinación de variables que más influyen. Además, el número de reglas producidas por ID3-CER se podría reducir hasta quedar en 88 reglas si se considera como valor por omisión la clase resistencia superficial "alta", sin embargo esta reducción se ha evitado para no perder el detalle del conocimiento obtenido.

Conclusiones

Las herramientas de minería de datos son valiosos algoritmos para extraer el conocimiento disperso en grandes volúmenes de información, ayudando a detectar patrones y tendencias de comportamiento.

Para el caso particular del problema de flameo en aisladores se pudo caracterizar exitosamente:

- La relación entre las variables ambientales y la resistencia superficial.
- Las variables que más impactan al fenómeno y las variables que casi no afectan el comportamiento de la resistencia superficial.
- Las circunstancias que provocan que la resistencia superficial sea baja.

A futuro se debe trabajar en la adaptación de estos algoritmos para la predicción del flameo. Esto incluye la selección de intervalos para las variables meteorológicas basada en clasificaciones existentes del clima y el análisis de otros bloques de datos y ver si las reglas generadas son iguales o diferentes para distintas épocas del año.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Marco A. Ponce y José L. Fierro por apoyar el desarrollo del proyecto y por sus útiles comentarios.

Referencias

Clark, P., T. Niblett (1988), *Manual for CN2 release 1,* The Turing Institute, .

Fierro, J., I. Ramírez, G. Montoya (1995), "Monitoreo en línea de la corriente de fuga de cadenas de aisladores para 400 kV en zonas de contaminación", Memorias de la Reunión de Verano del Capítulo de Potencia (IEEE Sección México), Acapulco, México, julio, pp 82-88.

González, J. (1993), "La resistencia superficial como criterio de diagnóstico del aislamiento externo expuesto a contaminación", Memorias de la Reunión de Verano del Capítulo de Potencia (IEEE Sección México), Acapulco, México, julio, pp 9-13.

Guzmán, A. (1995), "Sustitución de sistemas *expertos por árboles k-d*", Congreso de Reconocimiento de Patrones, CIMAF-95, La Habana, Cuba, enero.

Hampton, B. (1964), *Flashover mechanism of polluted insulation,* Proc. IEE, vol. 111, núm. 5, mayo, pp. 986-992.

Hernández, V. (1995), "Sistema de descubrimiento de conocimiento en bases de datos", Tesis de maestría, ITESM-Morelos.

Kolodner, J. (1993), *Case-based reasoning,* Morgan Kaufmann Publishers.

Leech, W. (1986), *A rule based process control method with feedback,* Proceedings of the International Conference and Exhibit, Instrument Society of America.

Mejía, M. y G. Rodríguez (1991), *EXEB: A varnishes expert system,* Operational Expert Systems Applications in Mexico, Cantú, F. editorial Pergamon Press, pp. 40-47.

Piatetsky-Shapiro, G. *et al.* (1991), *Knowledge discovery in databases: an overview,* Knowledge Discovery in Databases, Piatetsky-Shapiro, G. editores, Cambridge, MA, AAAI/MIT, pp. 1-27.

Quinlan, J. (1989), *C4.5 release 1, User's Manual.*

Quinlan, J. (1979), *Discovering rules by induction from large collections of examples, expert systems in the micro-electronic age,* Michie, D., (editor), Edinburgo, Escocia, Edinburgh University Press.

Quinlan, J. (1986), *Induction of decision trees, machine learning,* vol. 1, núm. 1, pp. 81-106.

Sasisekharan R. y V. Seshadri (1996), *Data mining and forecasting in large-scale telecommunications networks,* IEEE Expert, vol. 11, núm. 1, febrero, pp. 37-43.

Winston, P. (1994), "Inteligencia artificial", Addison-Wesley Iberoamericana, pp. 455-475.

GUILLERMO RODRÍGUEZ ORTIZ



Gerente de la hoy Unidad de Sistemas Informáticos del IIE. Egresó como ingeniero mecánico electricista del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) campus Monterrey. Obtuvo el grado de maestro en ciencias en el Instituto Tecnológico de Massachussetts y el doctorado en ciencias de la computación en la Universidad de California, Los Ángeles, Estados Unidos. Es investigador nacional y miembro fundador de la ANIAC; pertenece a la ACM y al IEEE. Es autor de un libro y diversos artículos sobre desarrollo de programas, bases de datos y sistemas expertos.

MANUEL MEJÍA LAVALLE



Es investigador y jefe de proyecto en el área de inteligencia artificial de la hoy Unidad de Sistemas Informáticos del IIE desde el año de 1988. Actualmente es responsable de un proyecto en el campo de descubrimiento de información en grandes bases de datos. En 1980 se graduó como ingeniero industrial en electrónica y en 1987 obtuvo el grado de maestro en ciencias computacionales en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Monterrey. Ha participado como catedrático de la maestría en sistemas de información en el ITESM y de la maestría en sistemas basados en conocimiento en el Cenidet. Antes desarrolló actividades profesionales en el campo de la computación en la siderúrgica Tubos de Acero de México y en el proyecto nucleoeléctrico de Laguna Verde. Es autor de artículos nacionales e internacionales en el área de sistemas expertos y redes neuronales orientados a la industria.

GERARDO MONTOYA TENA



Investigador de la hoy Unidad de Materiales Eléctricos en el área de aislamientos externos. Es ingeniero en comunicaciones y electrónica del Instituto Politécnico Nacional (IPN) (1985). Posee la maestría en ingeniería eléctrica con mención honorífica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (1993). Ingresó como investigador en el Departamento de Impacto Ambiental, participando en diversos proyectos de contaminación. En 1992 ingresó al Departamento de Materiales, donde desarrolló e implementó en campo un modelo de predicción del riesgo de flameo basado en la resistencia superficial. Asimismo, diseño y construyó un sistema para monitorear la corriente de fuga de aisladores contaminados en líneas de transmisión. es autor de diversos reportes técnicos y artículos sobre contaminación y factores meteorológicos, predicción de sistemas e instrumentación.

¿Necesita estimar cuándo hay que cambiar la tubería del generador de vapor?

Esta tarea puede simplificarse utilizando KarMa (Características de Materiales de Generadores de Vapor), una nueva herramienta de cómputo para estimar el tiempo de vida y las propiedades mecánicas de los materiales de tubería de generadores de vapor.

KarMa es un programa que toma en cuenta el fenómeno de termofluencia, así como el de corrosión. También estima las propiedades mecánicas, espesor mínimo, temperatura máxima y presión máxima de operación, con base en la norma ASME, y cuenta con un catálogo de las fallas más comunes que ocurren en la tubería de un generador de vapor.

KarMa funciona en Microsoft 3.1 y sólo ocupa 600 KBytes en el disco duro; aunque se recomienda, no requiere de un coprocesador matemático.

Llámenos y le daremos más información y si lo desea, le enviaremos sin costo un programa de demostración para que personalmente evalúe KarMa.

Comuníquese con nosotros al:

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Departamento de Fisicoquímica Aplicada, Avenida Reforma núm. 113, colonia Palmira, 62490 Temixco, Morelos, México. Teléfono (73) 19 98 48 y (73) 18 38 11, ext 7224, fax (73) 18 98 54.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

MX9800146

Claro que el combustible al ciclo combinado producirá energía eléctrica y vapor para la refinería y, potencialmente, energía para la República.

Todo lo anterior requiere de instalaciones comunes en las refinerías —las cuales tienen sus propios estanques y plantas tratadoras de aguas residuales centralizadas—, pero si se considera este tipo de aplicaciones, se podría obtener una recuperación del 85 al 90% del valor energético de estos productos, a través de vapor y de energía eléctrica (figura 2).

En México, el combustóleo pesado es la fuente principal de la generación de electricidad, y se está dando una nueva iniciativa para fomentar la inversión extranjera en la infraestructura de gas natural para 1996; sin embargo, ha sido un importador neto de gas natural desde 1989 y seguramente seguirá importando por varios años más. La estrategia en este caso podría ser que también utilizara lo que tiene disponible para aumentar la producción de energía con el potencial de gasificar posteriormente.

Otra opción sería el carbón utilizándolo de manera controlada y sólo en los sitios cercanos a su extracción como podría ser Monterrey. Incluso sería interesante considerar su importación. Aun así, la fuente principal para generar energía en México sigue y seguirá siendo por varios años, el combustóleo local.

Por otro lado, se podrían considerar algunas de las otras tecnologías como desulfuración de gases de evaporación o combustión o la utilización de gasificación de combustóleo pesado en ciclo combinado a un lado de las refinerías o en sus instalaciones, como había mencionado anteriormente.

En México existe más demanda que energía, por lo que las opciones son expandir refinerías o agregar unidades de conversión; considero que Pemex sigue hoy este camino; las consecuencias son tener producción de coque, una demanda mayor de hidrógeno, y por una nueva disposición legal, agregar oxigenados a la gasolina del Distrito Federal. Esto tiene que suministrarse a través de gas sintetizado. Una excelente oportunidad para las refinerías. Junto a las refinerías se pude disponer de turbinas de ciclo combinado que quemen gas con una eficiencia del 44 al 46% cuando se utilicen turbinas de gas tipo FA (cuadro 1).

En conclusión, considero que el ciclo combinado con gasificación tiene una base pragmática y tecnológica que puede jugar un papel muy importante para satisfacer las necesidades de energía de México con minimización de emisiones, utilizando fuentes nacionales como carbón local; asimismo, existen oportunidades de seguir utilizando combustibles pesados con alto contenido de azufre, al igual que material de refinerías. Una forma práctica de ir ascendiendo por la curva de aprendizaje en el uso de esta tecnología.

SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS •

SISTEMAS EXPERTOS

¡NUEVAS VERSIONES!

Se-Sismo y Se-Viento para Windows contienen módulos adicionales.
Software de apoyo para las versiones actualizadas de los capítulos:

Diseño por sismo
Diseño por viento

del *MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES*
de la *Comisión Federal de Electricidad*

Instituto de Investigaciones Eléctricas
Departamento de Ingeniería Civil

Informes
Teléfono (73) 18 38 11 extensión 7584, fax (73) 18 25 38,
correo electrónico: guerrero@iie.org.mx

• SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS •
• SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS • SISTEMAS EXPERTOS •

Mecánica de fractura probabilista en la evaluación de la integridad de componentes

José Manuel Franco Nava, José Gerardo Torres Toledano y Ramón Sánchez Sánchez

Resumen

Dada la importancia de la mecánica de fractura en aplicaciones de recipientes a presión, tuberías y otros componentes utilizados en centrales térmicas, la Unidad de Ingeniería Mecánica del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha venido desarrollando actividades en este campo desde hace algunos años. En el presente trabajo, se describe el proceso para el análisis de mecánica de fractura probabilista. Como ejemplo se presenta una aplicación al cálculo de probabilidad de falla en tuberías.

Introducción

En los últimos veinte años, la integridad estructural de componentes sujetos a presión ha dado lugar a diversos desarrollos numérico-computacionales para el estudio de los efectos debidos a la incertidumbre de los diferentes parámetros involucrados en dicha evaluación. De acuerdo con Garrick *et al.* (1984), a principios de los setenta, la probabilidad de falla de componentes se basa en un modelo de ``resistencia-esfuerzo''. Veseley *et al.*, y Lucia *et al.* (1978 y 1979) trabajaron en el cálculo de la probabilidad de falla de recipientes a presión de plantas nucleoeléctricas incorporando una gran cantidad de variables aleatorias. Para 1981, Gamble y Strosnider, –también para plantas nucleoeléctricas– determinaron la probabilidad de falla inducida por grietas utilizando expresiones matemáticas basadas en la mecánica de fractura lineal elástica para modelar las interacciones entre variables. Por otra parte, Busener (1978) desarrolló un sistema que incorporó la técnica de las funciones de influencia en el análisis de mecánica de fractura basado en fatiga y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo. En 1992 destacaron dos sistemas en el análisis de mecánica de fractura de componentes. El primero de ellos –basado en la estimación de la probabilidad de falla de los tubos– se utilizó para optimar el mantenimiento de los generadores de vapor de plantas nucleoelétricas [Granger *et al.*, 1992)]. El segundo sistema [Lo *et al.*, 1989], fue desarrollado para evaluar la confiabilidad de uniones soldadas en los sistemas de tuberías de las centrales nucleoléctricas.

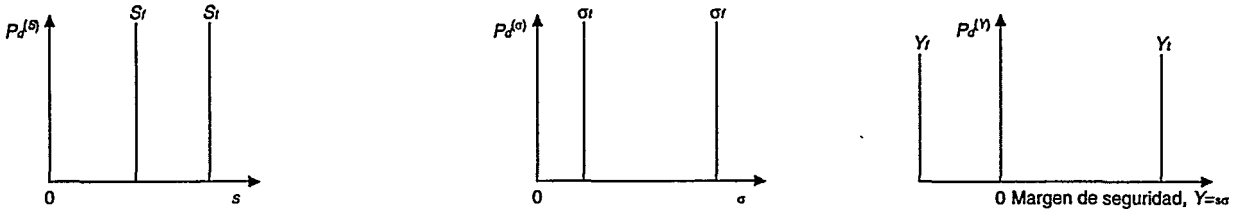
La típica evaluación determinística de la integridad de componentes mecánicos (mostrada en la figura 1a) compara algún parámetro relacionado con su resistencia, como la resistencia a la cedencia, contra los esfuerzos resultantes de cargas anticipadas que se aplican a dicho componente. Para ello se toma en cuenta un criterio para determinar si el componente está en condiciones de soportar las cargas establecidas. Por ejemplo, si la resistencia es mayor que los esfuerzos aplicados, el componente está en estado aceptable. En el caso en que los esfuerzos exceden la resistencia del material, el componente está sujeto a una posible falla. Cabe mencionar que en esta evaluación determinística, los valores de resistencia y esfuerzo utilizados son datos nominales establecidos con base en límites de carga y parámetros de resistencia conservadores. Es importante recordar que en la etapa de diseño de la mayoría de los componentes mecánicos se aplican los llamados ``márgenes de seguridad'', los cuales refuerzan el estado conservador de los análisis. Existen algunas incertidumbres asociadas con los diferentes factores involucrados en el diseño y evaluación de componentes mecánicos que de alguna forma se encuentran compensados en los márgenes de seguridad. Entre ellas se encuentran:

- Variación de la resistencia del material. Esto es la resistencia actual en relación con la especificada en el análisis.
- Degradación de la resistencia del material debido a las condiciones de operación del componente.
- Variación de las condiciones de carga establecidas.
- Eliminación de algunas condiciones de carga.
- Simplificaciones efectuadas en el modelo físico del sistema o componente.
- Métodos aproximados utilizados para calcular los

En los últimos veinte años, la integridad estructural de componentes sujetos a presión ha dado lugar a diversos desarrollos numérico-computacionales para el estudio de los efectos debidos a la incertidumbre de los diferentes parámetros involucrados en dicha evaluación.

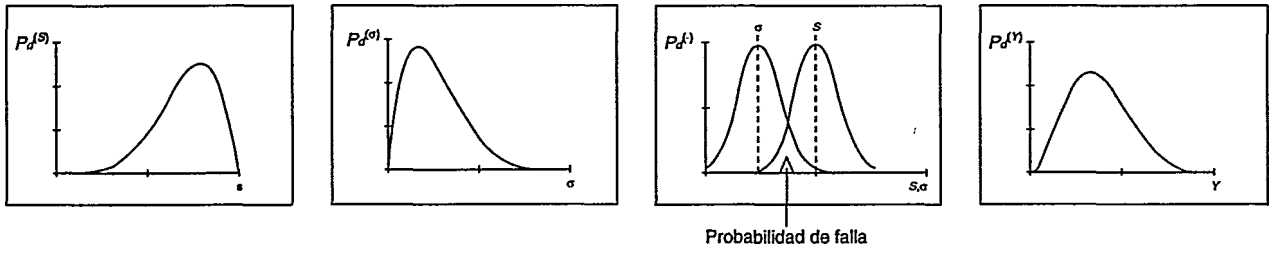
FIGURA 1
Comparación entre el análisis determinístico y probabilista.

FIGURA 1(a)
Análisis determinístico.



t = Análisis "típico" con margen de seguridad adecuado.
f = Análisis para "peor caso" con margen de seguridad negativo o condición de falla.

FIGURA 1(b)
Análisis probabilista.



esfuerzos y la respuesta del componente.

Por otra parte, los análisis probabilistas reemplazan los valores fijos por variables aleatorias. De esta forma se incluyen explícitamente las variaciones en resistencia y esfuerzo alrededor de sus valores nominales. En la figura 1b se presentan las distribuciones de probabilidad de estas dos variables, destacando que el área de intersección entre ellas representa la probabilidad de que los esfuerzos excedan a la resistencia, es decir, que el componente falle.

Análisis de mecánica de fractura probabilista en tuberías

El análisis de mecánica de fractura probabilista en las uniones soldadas de componentes pasivos como las tuberías, involucra principalmente los siguientes puntos:

a) Especificación de la unión soldada, incluyendo geometría (radio interior y espesor de la pared de la tubería); propiedades del material consideradas como aleatorias (resistencia a la cedencia, resistencia límite de ruptura y esfuerzo de fluencia), y cargas (esfuerzos debidos a peso propio, presión de operación, efectos térmicos y a presión hidrostática)

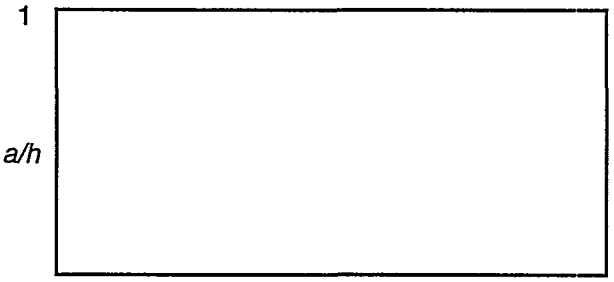
b) Selección aleatoria de grietas. Este proceso implica cinco puntos:

• Definición de un espacio muestral. Con el propósito de evaluar la profundidad de la grieta *a* en relación con su límite máximo (definido por el espesor de la tubería, *h*) se utiliza la variable *a/h*. Por otra parte, con la finalidad de especificar la variación circunferencial del tamaño de la grieta, se usa el inverso de la relación de aspecto, es decir, la relación entre la profundidad de la grieta y la semilongitud, *a/b*. Así, se puede representar el espacio muestral como se muestra en la figura 2. En el espacio muestral se puede representar cualquier valor y combinación de valores tanto de la profundidad de la grieta como de la semilongitud. En la figura 2, el límite máximo del eje de las ordenadas es de 1.0, esto significa que la profundidad de la grieta es igual al espesor de la tubería. Por otra parte, el límite máximo del eje de las abscisas también es de 1.0 y corresponde a un valor de la semilongitud de la grieta igual al de la profundidad de la misma. Es muy importante hacer notar que un valor próximo a cero en el eje de las abscisas representa los valores más grandes de la semilongitud en relación con cualquier valor de la relación *a/h*. Esto sugiere un tamaño mayor de grieta en dirección circunferencial.

• Definición de una celda en un espacio muestral. Una celda es una fracción, sección o área dentro de un espacio muestral. Así, el espacio muestral puede dividirse en varias celdas (C_j). Si el espacio no se divide en dos o más celdas, el espacio en sí constituye una celda. La división del espacio muestral puede llevarse a cabo de las siguientes formas: definiendo un número *m* de divisiones en la coordenada *a/b*, y un número *n* de divisiones en la coordenada *a/h*; de este modo, el número total de celdas será el resultado del producto *mxn*, definiendo una celda en función de los límites máximo y mínimo de coordenada *a/b* y, los límites máximo y mínimo de coordenada *a/h* y definiendo varias celdas, cada una definida por los límites máximo y mínimo de coordenada *a/b* y, los límites máximo y mínimo de coordenada *a/h*.

• Generación aleatoria de la profundidad de la grieta.

FIGURA 2
Espacio muestral.



La generación de la variable aleatoria correspondiente a la profundidad de la grieta debe atender a un modelo probabilista de la distribución de dicha variable.

• Generación aleatoria de la relación de aspecto *b/a*. La generación de la variable aleatoria relacionada con el aspecto de la grieta debe atender a un modelo probabilista de la distribución de dicha variable.

• Evaluación de los parámetros que definen el tamaño inicial de la grieta en relación con los límites de la celda. Una vez generados aleatoriamente los parámetros que definen el tamaño inicial de la grieta se calculan los valores de las relaciones *a/h* y *a/b*. Con estas coordenadas se define un punto en el espacio muestral. Posteriormente, se verifica si este punto se localiza en la zona definida por la celda definida en el espacio muestral. Si se cumple esta condición, tanto la semilongitud como la profundidad de la grieta son utilizadas en la siguiente etapa del proceso; de lo contrario, se repite la etapa de generación aleatoria de ambos parámetros.

c) Cálculo de la velocidad de propagación de la grieta. Para realizar el cálculo de la velocidad de propagación de la grieta se utilizan los resultados de la evaluación del factor de intensidad de esfuerzos, así como de los datos o cálculos de la frecuencia de los eventos de carga. Cabe recordar que el factor de intensidad de esfuerzos controla el nivel de los esfuerzos y deformaciones en la punta de la grieta y que en problemas de fatiga tiene un efecto en la velocidad de propagación de la grieta. El cálculo del factor de intensidad de esfuerzos involucra a los esfuerzos generados en la tubería y las características que definen el tamaño de la grieta. Por otra parte, la frecuencia de los eventos de carga se utiliza para calcular ciclo por ciclo la propagación de la grieta, que para el caso bidimensional tiene dos grados de libertad. Para determinar la propagación de una grieta en función de las condiciones de carga, de acuerdo con Lo *et al.* (1992), para tuberías austeníticas se utiliza el modelo de Paris:

$$\frac{da}{dn} = C[\,K'\,]^m \qquad [1]$$

donde:

da/dn = velocidad de propagación de grieta.
n = número de ciclos a la fatiga.
a = profundidad de la grieta.
K = factor efectivo de intensidad de esfuerzos.
$K = \Delta K/(1-R)^{1/2}$.
R = relación o tasa de carga.
$R = K_{mín}/K_{máx}$.
ΔK = factor de intensidad de esfuerzos cíclicos.
$\Delta K = K_{máx} - K_{mín}$ [ksi-in$^{1/2}$]
m = constante empírica.

En la ecuación 1, C es una constante empírica distribuida *lognormalmente*. Para acero inoxidable se considera una media de 9.14 E-12, y una desviación estándar de 2.2 E11. C=0 para $K' < 4.6$ [ksi-in$^{1/2}$].

d) Aplicación del criterio de falla. Para la unión soldada se aplicará el criterio de los esfuerzos en la sección transversal neta, el cual relaciona los esfuerzos aplicados y el área efectiva de sección transversal que soporta las cargas. Es decir, una falla ocurrirá si el área efectiva (área de la sección transversal de la tubería menos el área de la grieta) es insuficiente para soportar las cargas aplicadas, como lo expresa la siguiente condición:

$$\sigma_{aplicado}\, A_{tuber}\, a > \sigma_{fluencia}\,(A_{tuber}\, a - A_{grieta}) \qquad [2]$$

donde:

$\sigma_{aplicado}$= (esfuerzos de peso propio) + (esfuerzos de presión).
$A_{tuber} = \pi\,(\,(R_i + h)^2 - (R_i)^2\,)$.
$A_{grieta} = ab\,(\pi/2 + 2/3\,(a/R_i))$.
R_i = radio interior.
h = espesor de la pared de la tubería.

e) Evaluación de la falla en el periodo de vida de diseño de la planta. En esta etapa se verifica que una grieta con una profundidad y semilongitud especificada, se propague a través del tiempo de vida útil de la planta. Durante este proceso, se evalúa si la grieta contribuye a una condición de falla para la tubería.

f) Evaluación del número de muestras en la simulación. En esta etapa se verifica que el número total de grietas analizadas sea igual al número de muestras (grie-

Dada la importancia de la mecánica de fractura en aplicaciones de recipientes a presión, tuberías y otros componentes utilizados en centrales térmicas, la Unidad de Ingeniería Mecánica del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha venido desarrollando actividades en este campo desde hace algunos años.

tas) solicitadas para la unión soldada.

g) Cálculo de la probabilidad de falla para la unión soldada. Mediante la aplicación del método de Monte Carlo se calcula la probabilidad de que la unión soldada falle antes o en el tiempo de vida de diseño de la falla. Esta probabilidad se obtiene de la sumatoria de las probabilidades individuales de cada una de las celdas definidas, las cuales se obtienen dividiendo el número de pruebas en las que ha ocurrido una falla antes o en el tiempo de prueba entre el número de total de pruebas estimadas para el análisis, y multiplicando el resultado por la probabilidad de que una grieta inicial tenga coordenadas dentro de los límites de la celda en cuestión. La probabilidad de falla de la unión soldada está dada por la siguiente ecuación:

$$P\,(t_F <= t) = \sum_{m=1}^{M} \frac{(N_F)_m\,(t)}{N_m} P_m \qquad [3]$$

donde:

$P\,(t_F \leq t)$= probabilidad de que la soldadura falle antes o en el tiempo (t).

M = número total de celdas.

N_{Fm} (t) = número de pruebas en las cuales ha ocurrido falla antes o en el tiempo (t).

N_m = número total de pruebas.

P_m= probabilidad de que una grieta inicial esté dentro de los límites de la celda *m*.

Aplicando técnicas probabilistas y mecánica de fractura [Franco, 1995] se calcula la probabilidad de falla de una unión soldada entre dos tramos rectos de tubería, la cual cuenta con una grieta inicial, soporta una presión interna, está sujeta a cargas axiales y a transitorios de calentamiento/enfriamiento que ocurren regularmente cinco veces al año.

Ejemplo de aplicación en una unión soldada

Aplicando técnicas probabilistas y mecánica de fractura [Franco,1995] se calcula la probabilidad de falla de una unión soldada entre dos tramos rectos de tubería, la cual cuenta con una grieta inicial, soporta una presión interna, está sujeta a cargas axiales y a transitorios de calentamiento/enfriamiento que ocurren regularmente cinco veces al año. Además, se incluyen las siguientes premisas: no se consideran los esfuerzos residuales ni vibratorios, no está sujeta a inspecciones previas a su puesta en servicio, el modo de falla considerado será la fuga de fluido, el tiempo de vida de la planta donde se encuentra la unión soldada es de cuarenta años, y se aplicará el criterio de falla que relaciona el esfuerzo en la sección neta excediendo al esfuerzo de fluencia.

Especificación de la unión soldada

a) Geometría:
   - Radio interior = 14.5 in
   - Espesor de la pared de la tubería = 2.5 in

b) Propiedades del material (ver cuadro 1).

c) Cargas:
   - Esfuerzo debido a peso propio = 2.08 ksi
   - Presión de operación = 2.30 ksi

Selección aleatoria de grietas

La mecánica de fractura probabilista en uniones soldadas de tuberías concentra su análisis en grietas circunferenciales. Estas grietas en dos dimensiones tienen una forma semielíptica y generalmente se utilizan dos parámetros aleatorios para representar la forma de la grieta como son la profundidad de la grieta y la relación de aspecto. Para este estudio, la distribución de la profundidad de la grieta es del tipo exponencial, con un parámetro (λ) igual a 4.7. La distribución de la relación de aspecto es del tipo *lognormal* con una media (μ) igual a 1.34 y un parámetro de forma (σ) igual a 0.538.

Con estas distribuciones, el método de análisis selecciona aleatoriamente valores que definen las características de la forma inicial de una grieta. Así, se tiene que existe una grieta en la unión soldada con las siguientes características iniciales:

- Profundidad a = 2.486 in
- Relación entre profundidad de grieta y el espesor de tubería a/h = 0.989
- Semi-longitud de la grieta b = 11.77
- Relación de aspecto b/a = 4.733
- Inverso de la relación de aspecto a/b = 0.211

En la figura 3 se representa el espacio muestral, así como la definición de una celda C_1 en función de cuatro límites:

- Límite máximo de a/h= 0.99
- Límite mínimo de a/h= 0.60
- Límite máximo de a/b= 0.90
- Límite mínimo de a/b= 0.01

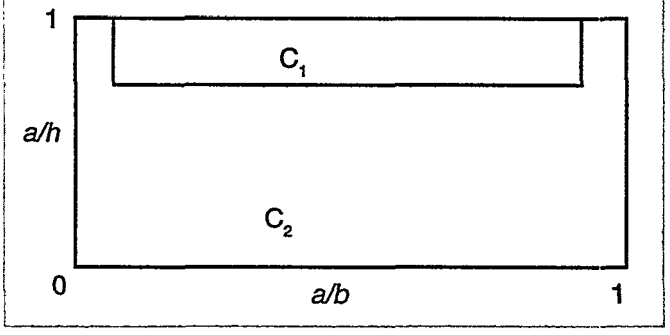
Cálculo de la velocidad de propagación de la grieta

Para determinar la propagación de una grieta en fun-

CUADRO 1
Propiedades de acero inoxidable SA-240 tipo 304 [Lo et al., 1989].

Propiedad	*Media*	*Desviación estándar*
Resistencia a la cedencia	23.5 ksi	4.0 ksi
Resistencia límite de ruptura	63.0 ksi	4.4 ksi
Esfuerzo de fluencia	43.0 ksi	4.2 ksi

FIGURA 3
Espacio muestral de la unión soldada con dos celdas.



ción de las condiciones de carga, de acuerdo con la ecuación 2 es necesario efectuar:

Cálculo del factor de intensidad de esfuerzos

Al asumir que el factor de intensidad de esfuerzos en una forma generalizada está dado por [Harvey, 1985]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \qquad [4]$$

De acuerdo con Hahn (1969), los recipientes cilíndricos a presión pueden tratarse como una placa plana con cargas a tensión, donde el esfuerzo nominal σ en la placa es un múltiplo del esfuerzo tangencial σ_T, es decir:

$$\sigma = M_F \sigma_T \qquad [5]$$

donde:
M_F = factor de corrección que es función de *a*, *h*, R_i.
R_i = radio interior del recipiente.
h= espesor de la pared del recipiente.
a= profundidad de la grieta.
σ_T= $(PR_i)/h$, donde *P* es la presión interna o presión de operación.

Existen varias expresiones para calcular el factor de corrección M_F, destacando la de Folias que corrige la ecuación 5 para determinar el factor de intensidad de esfuerzos para el caso de tuberías agrietadas, según la ecuación:

$$K_I = \frac{PR_i}{h}\left(\left(1+\left(1.61\frac{a^2}{R_i\, h}\right)\right)\pi a\right)^{1/2} \qquad [6]$$

Al sustituir valores en la ecuación 6 se tiene:

K_I= 94.31 ksi

Cálculo de la propagación de la grieta

Tomando en cuenta que la propagación de la grieta en presencia de esfuerzos cíclicos es de amplitud constante, y que la tasa de carga es *R*=0, implica que el factor de intensidad de esfuerzos máximo, $K_{máx}$, contribuya directamente en la velocidad de propagación de la grieta. Por lo tanto, ΔK= 94.31 kpsi-in$^{1/2}$ y el factor efectivo de intensidad de esfuerzos es:

K'= 94.31 ksi-in$^{1/2}$

Al sustituir el valor de K', *m*= 4 y considerando un valor constante de *C*= 9.14 E-12, en la ecuación 1 se obtiene:

$da/dn = (9.14 \times 10^{-12})(94.31)^4 = 7.23 \times 10^{-4}$ in/ciclo

Así, la propagación por cada ciclo es:

$da = (7.23 \times 10^{-4}$ in/ciclo$)dn$

Al definir la propagación de la grieta por fatiga como 2.4 meses por ciclo, el crecimiento de la grieta por cada mes es de:

$da = (7.23 \times 10^{-4}$ in/ciclo$)(1$ ciclo$/2.4$ meses$) = 3.01 \times 10^{-4}$ in

Se incorporaron métodos probabilistas a la teoría de la mecánica de fractura lineal elástica para la evaluación de la integridad de una unión soldada, considerando la propagación de grietas bajo fatiga. La implantación de este tipo de técnicas, en un futuro, apoyará las técnicas y procedimientos relacionados con las evaluaciones y el mantenimiento de componentes pasivos de las centrales generadoras de energía eléctrica.

Aplicación del criterio de falla

De acuerdo con la ecuación 2:

$\sigma_{aplicado}$= (2.08 kpsi + 6.4 kpsi) = 8.48 ksi
$A_{tuber} = \pi\,((14.5 + 2.5)^2 - (14.5)^2 = 247.4$ in^2
$A_{grieta} = 2.486\,(11.769)(\pi/2 + 2/3\,(2.486/14.5)) = 49.302$ in^2
$(\sigma_{aplicado})(A_{tuber}) = 2\,097.95$ ksi
$(\sigma_{fluencia})(A_{tuber} - A_{grieta}) = 8\,518.21$ ksi

Los resultados anteriores indican que no se presenta la falla para el tamaño de grieta estudiado.

Evaluación de la falla en el periodo de diseño de la planta

El modo de falla considerado para la unión soldada será la fuga, en donde el criterio de falla o condición para que

exista una fuga está definido por la siguiente desigualdad [Provan, 1987]: Profundidad de la grieta ≥ espesor de la pared de la tubería

$$a \geq h \qquad [7]$$

El tamaño de la grieta inicialmente estimado se utiliza al igual que la velocidad de propagación de la grieta con el propósito de analizar la evolución de la grieta en función del número de ciclos o del tiempo. Esto se lleva a cabo mediante el cálculo de la profundidad final que tendrá la grieta después de un determinado número de ciclos, utilizando esta nueva característica en el cálculo del factor efectivo de intensidad de esfuerzos, velocidad de propagación y en la evaluación de la falla en el periodo de vida de diseño (verificación de la condición de fuga). Para el caso analizado, se sabe que la propagación por cada ciclo es:

$da = (7.23 \times 10^{-4}$ in/ciclo$)dn$

El incremento de la grieta dentro tiempo de los primeros 20 ciclos del periodo de vida de diseño de la planta (40 años) es:

$da = (7.23 \times 10^{-4}$ in/ciclo$)(20$ ciclos$) = 0.01446$ in

Cuando se suma la profundidad inicial más este incremento se tiene la profundidad final dentro del periodo de tiempo de vida de la planta:

$a_{final} = 2.486 + 0.01446 = 2.50046$ in

Al aplicar el criterio de falla (ecuación 7), se tiene que:

$a_{final} > h$

Esta desigualdad implica que la grieta se propagará hasta alcanzar la pared exterior de la tubería antes o en el tiempo de vida de la planta. También considerado como tiempo de análisis.

Cabe mencionar que si la falla no tiene lugar antes o en el tiempo de análisis, el tamaño de la grieta se utiliza para la evaluación en el siguiente incremento en número de ciclos de una nueva velocidad de propagación con la cual se determina un nuevo tamaño final de la profundidad de la grieta que a su vez se compara con el criterio de falla.

Evaluación del número de muestras en la simulación

La simulación y evaluación de cada tamaño de grieta se realiza hasta que es cubierto el número total de muestras definido para dicha simulación.

Cálculo de la probabilidad de falla para la unión soldada

La probabilidad de falla de la unión soldada está dada por la ecuación 3. Considerando que el espacio muestral se dividió en dos celdas, y que la probabilidad de que la grieta se encuentre dentro de la celda C_1 cuya área es el 31.2 % del área total del espacio muestral, entonces $P_m = 0.312$.

Para la primera prueba en la celda 1,

$N = 1 \qquad N_F(t) = 1 \qquad P_m = 0.312$

La probabilidad es:

$P(t_F \leq t) = (1/1)\ 0.312 = 0.312$

Después de repetir el procedimiento anterior, para la celda del espacio muestral con límites de *a/h* definidos de 0.6 a 0.99 y límites de *a/b* definidos de 0.1 a 0.9 se tienen los resultados siguientes:

$N = 150 \qquad N_F(t) = 3 \qquad P_m = 0.312$

La probabilidad es:

$P(t_F \leq t) = (3/150)\ 0.312 = 0.00624 = 6.24 \times 10^{-3}$

Conclusiones

Se incorporaron métodos probabilistas a la teoría de la mecánica de fractura lineal elástica para la evaluación de la integridad de una unión soldada, considerando la propagación de grietas bajo fatiga. La implantación de este tipo de técnicas, en un futuro, apoyará las técnicas y procedimientos relacionados con las evaluaciones y el mantenimiento de componentes pasivos de las centrales generadoras de energía eléctrica. Sin embargo, es importante mencionar que las limitaciones de la mecánica de fractura determinística son las mismas que para la mecánica de fractura probabilista, de aquí que cualquier avance en los análisis determinísticos repercutirá en los probabilístas. Cabe recordar que la aplicación de técnicas numérico-computacionales, como la del elemento finito, en las evaluaciones del estado de esfuerzos de los componentes analizados contribuye a la incorporación de análisis elásticos y elastoplásticos para una mejor evaluación del comportamiento de tuberías y recipientes a presión.

Referencias

Besuner, P. M. (1978), *BIGIF fracture mechanics code for structures. Introduction and theoretical background (Manual 1)*, Electric Power Research Institute, (EPRI Report NP-838).

Franco Nava, José Manuel (1995), "Metodología para el análisis de mecánica de fractura probabilística en tuberías", Informe IIE/44/0164/I002/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México.

Garrick, B. J. y S. J. Tugart, *Application of probabilistic and decision analysis methods to structural mechanics and materials sciences problems*, vol. 2, Electric Power Research Institute (EPRI Report NP-3613).

Granger, B., P., Pitner y B., Flesch (1992), *Probabilistic fracture*

mechanics code for PWR steam generator tube maintenance, Proceedings of the American Power Conference, pp. 849-854.

Hahn, G.T., M. Sarrate y A. R. Rosenfield, *Criteria for crack extension in cylindrical pressure vessels*, International Journal of Fracture Mechanics, vol. 5, núm. 3, pp. 187-210.

Harvey, John F. (1985), *Theory and design of pressure vessels*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., Nueva York.

Lo, T., S. E. Bunpus, D. J. Chinn, R. W. Mensing y G. S. Holman (1989), *Probability of failure in BWR reactor coolant piping*, vol. 2, preparado por Lawrence Livermore, National Laboratory, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D. C. (Reporte NUREG/CR-4792).

Provan, J. W. (1987), *Probabilistic fracture mechanics and reliability*, Martinus Nijhoff Publishers.

JOSÉ MANUEL FRANCO NAVA



Maestro en ciencias en ingeniería mecánica del Imperial College de la Universidad de Londres, Inglaterra (1990). Su licenciatura en ingeniería mecánica la obtuvo en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) en 1982. Ingresó al IIE en 1983 y ha trabajado en proyectos relacionados con el diseño, desarrollo e implantación de sistemas computacionales con técnicas de mantenimiento predictivo y sistemas expertos para diagnóstico de fallas en equipos rotatorios. Ha aplicado técnicas y modelos numérico-computacionales de análisis modal para el estudio del comportamiento dinámico de rotores de turbogeneradores de la CFE. Actualmente se desempeña como investigador de la hoy Unidad de Ingeniería Mecánica en proyectos relacionados con el análisis de índices del comportamiento de la generación eléctrica nacional, la remodelación de centrales hidroeléctricas y la aplicación de mecánica de fractura y análisis de esfuerzos en la evaluación de la integridad de componentes pasivos de centrales generadoras. Es miembro de ASME y ha presentado diversas publicaciones técnicas tanto en el país como en el extranjero.

JOSÉ GERARDO TORRES TOLEDANO

Obtuvo su licenciatura en ingeniería química industrial en la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Durante 1981-1984 trabajó para el Instituto Mexicano del Petróleo en ingeniería de proyectos de explotación, donde cursó la especialización en ingeniería básica de procesos. De enero de 1985 a la fecha ha trabajado como investigador en la hoy Unidad de Ingeniería Mecánica del IIE en proyectos relacionados con el análisis de disponibilidad y confiabilidad para el mejoramiento de plantas termoeléctricas. En 1989 obtuvo el grado de maestro en ingeniería en investigación de operaciones, en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Actualmente es candidato a doctor en ciencias computacionales en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) campus Morelos.



RAMÓN SÁNCHEZ SÁNCHEZ



Obtuvo su licenciatura en ingeniería mecánica en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (1983) y la maestría en ciencias computacionales en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) (1993). Fue investigador del IIE desde 1985 hasta 1989 en el Departamento de Hidromecánica, donde desarrolló modelos matemáticos y sistemas computacionales para el diseño asistido por computadora de elementos de turbinas Francis, el análisis de fenómenos transitorios en centrales hidroeléctricas y sistemas de bombeo. Desde 1989 es investigador en la hoy Unidad de Ingeniería Mecánica, donde ha trabajado en proyectos relacionados con el análisis de indicadores del comportamiento de la generación eléctrica nacional, confiabilidad para el mejoramiento de plantas termoeléctricas e hidroeléctricas, así como en la remodelación de centrales hidroeléctricas. Ha publicado varios artículos relacionados con su especialidad en congresos nacionales e internacionales.

VI VI VI VI **VI** VI VI VI VI

Congreso y Exposición Latinoamericana de

TURBOMAQUINARIA

18, 19, 20 Y 21 de febrero de 1997, México, D. F.

Hotel Fiesta Americana

MX9800147

Confiabilidad de componentes, sistemas y unidades de generación hidroeléctrica

Ramón Sánchez Sánchez, Gerardo Torres Toledano y José Manuel Franco Nava

Resumen

En este artículo se presenta una metodología para calcular la confiabilidad de componentes, sistemas y unidades de generación hidroeléctrica, así como el alcance de un sistema computacional para evaluar dicha confiabilidad. En el caso del cálculo de la confiabilidad de componentes y sistemas, el programa de cómputo no se limita a centrales hidroeléctricas y puede utilizarse en otro tipo de sistemas.

Introducción

El análisis de confiabilidad de componentes y sistemas complejos ha sido aplicado en diversas ramas de la ingeniería, entre las que destacan la aeronáutica y las plantas nucleoeléctricas. En la actualidad, el análisis de confiabilidad se está utilizando en las plantas termoeléctricas y plantas petroquímicas, entre otras, para pronosticar posibles problemas en los sistemas que las conforman, así como para mejorar su funcionamiento, contribuyendo en la programación del mantenimiento preventivo de los componentes y sistemas que integran dichas plantas.

El análisis de confiabilidad también puede aplicarse en los componentes y sistemas de las plantas de generación hidroeléctrica para mejorar su funcionamiento.

Confiabilidad

La confiabilidad de un componente, sistema o unidad se puede definir como la probabilidad de que dicha entidad pueda operar durante un periodo de tiempo determinado (tiempo de misión) sin pérdida de su función.

Confiabilidad de componentes

Modelo exponencial

Para el cálculo de la confiabilidad de componentes se puede utilizar una distribución exponencial, asumiendo que el componente se encuentra en su etapa de vida útil [Lewis, E . E.], en la cual la tasa de fallas es constante. Con estas suposiciones, la confiabilidad de un componente se puede expresar como:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

donde:

$R(t)$ = confiabilidad del componente en función del tiempo.
t = tiempo de misión.
λ = tasa de fallas.
e = base de los logaritmos neperianos (2.718281...).
F = número de fallas en el periodo de tiempo considerado.
T = tiempo real de operación del periodo de tiempo considerado.

En algunos problemas, en vez de conocer el tiempo total real de operación T, se conoce el tiempo entre fallas, lo cual permite el cálculo del tiempo real de operación. Con esta información se puede probar si el mejor ajuste para los datos disponibles es el modelo exponencial o algún otro modelo como el Weibull.

Modelo Weibull

Para el modelo Weibull [Hines, W. W. *et al.*, 1994], la función de densidad de probabilidad de falla se expresa como:

$$F(t_i) = 1 - e^{-\left(\frac{t_i-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

donde:

α = parámetro de forma.
β = parámetro de escala.
γ = parámetro de localización (generalmente igual a cero).
$F(t)$ = función de densidad de probabilidad de falla.
t_i = tiempo entre fallas.

En general, para el cálculo de la confiabilidad con el modelo expresado por la ecuación anterior, la función $F(t)$ únicamente se evalúa con dos parámetros (haciendo γ=0), con lo cual se obtienen resultados aceptables para fines prácticos.

Confiabilidad de un sistema en serie

Si en un sistema en serie se supone que los n componentes son independientes, es decir, que el comportamiento de alguno de ellos no afecta la confiabilidad de los restantes, su confiabilidad puntual puede calcularse como:

$$R_s = \prod_{i=0}^{n} R_i$$

donde:

R_i = confiabilidad del i-ésimo componente.
R_s = confiabilidad del sistema en serie.

Confiabilidad de un sistema en paralelo (sistemas con redundancia)

Los sistemas de *n* componentes independientes conectados en paralelo, en general funcionan satisfactoriamente con *m* de los *n* componentes en operación, mientras que los demás son redundantes y únicamente se requiere que alguno de los *n-m* componentes sustituya a cualquiera de los que están en operación cuando por alguna razón fallen.

Una forma de clasificar los sistemas en paralelo sujetos a mantenimiento es la siguiente [EPRI AP-5974, 1988]:

a) Sistemas en paralelo con mantenimiento de sus componentes mientras el sistema está operando.

b) Sistemas en paralelo con mantenimiento de sus componentes únicamente cuando el sistema está fuera de servicio.

Los sistemas en paralelo con mantenimiento de sus componentes cuando el sistema se encuentra en operación son los que más se aproximan a los sistemas reales de las centrales generadoras. Por esta razón, el modelo para la confiabilidad de los sistemas de centrales hidroeléctricas como se indica en el inciso a.

Para llevar a cabo el cálculo de la confiabilidad de los sistemas en paralelo con mantenimiento durante la operación, es necesario diferenciar los casos en los cuales los elementos redundantes se encuentran en reserva activa o pasiva. Estos sistemas se agrupan de acuerdo con el número de componentes requeridos en operación como se muestra en el cuadro 1 [EPRI AP-5974, 1988]:

En las expresiones dadas en el cuadro 1 para evaluar la inconfiabilidad, se asume lo siguiente:

- La activación de un componente que se encuentra en reserva es completamente confiable; es decir, la probabilidad de que el sistema de activación falle es nula.
- Los componentes tienen las mismas tasas de falla y reparación.
- El tiempo entre fallas y el tiempo de reparación tiene una distribución de probabilidad exponencial.

Los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores son aproximados.

El análisis de confiabilidad también puede aplicarse en los componentes y sistemas de las plantas de generación hidroeléctrica para mejorar su funcionamiento.

Confiabilidad de un sistema compuesto

La confiabilidad de un sistema compuesto por componentes conectados en serie y en paralelo puede calcularse en dos pasos:

- Reducir el sistema compuesto a uno equivalente en serie. Esto quiere decir que cada uno de los grupos de componentes conectados en paralelo se reducirán a un elemento equivalente conectado en serie con los componentes restantes del sistema.
- Aplicar las reglas dadas para un sistema en serie para obtener la confiabilidad del sistema equivalente.

Confiabilidad de generación hidroeléctrica

Confiabilidad de componentes

El cálculo de la confiabilidad del componente se puede obtener por medio de los siguientes pasos:

- Los datos de tiempo entre fallas se ordenan en for-

CUADRO 1
Sistemas con redundancia.

Tipo de sistema		*Caso 1*	*Caso 2*	*Caso 3*	*Caso 4*	*Caso 5*	*Caso 6*
Número de componentes en operación requeridos		1	1	2	1	1	2
Número de componentes redundantes	Activos	1	2	1			
	Reserva				1	2	1
Inconfiabilidad del sistema *I(t)*		$t\lambda^2/\mu$	$t\lambda^3/\mu^2$	$4t\lambda^2/\mu$	$2t\lambda^2/\mu$	$3t\lambda^3/\mu^2$	$6t\lambda^2/\mu$

λ = tasa de fallas de los componentes. I(*t*) = inconfiabilidad del sistema.
μ = tasa de reparación de los componentes. *t* = tiempo de misión.

ma creciente y se etiquetan con los números del uno hasta *n*, donde *n* corresponde al número de fallas.

- Se estima la función de densidad de probabilidad de falla $F(t)$ utilizando el criterio de Blom u otro [Mandel, J., 1984]. Se calcula la confiabilidad $R(t_i)$ para los datos discretos con $1\text{-}F(t_i)$.
- Se ajusta una curva continua para los datos discretos, utilizando una distribución exponencial o una distribución Weibull [Lewis, E. E.]. Utilícese el mejor ajuste como modelo definitivo de confiabilidad $R(t)$.

En la actualidad, el análisis de confiabilidad se está utilizando en las plantas termoeléctricas y plantas petroquímicas, entre otras, para pronosticar posibles problemas en los sistemas que las conforman, así como para mejorar su funcionamiento, contribuyendo en la programación del mantenimiento preventivo de los componentes y sistemas que integran dichas plantas.

Confiabilidad de sistemas

Un sistema se integra por un conjunto de componentes conectados en serie, en paralelo o por una combinación de ambos. La confiabilidad del sistema integrado se puede calcular reduciendo los componentes de los subsistemas en paralelo a un componente equivalente. Para la reducción del subsistema en paralelo a un componente equivalente se requiere conocer el tipo de redundancia que conforma al subsistema en paralelo. Para llevar a cabo este cálculo, se considerarán únicamente los casos de redundancia mostrados en el cuadro 1, debido a que con estos esquemas se contemplan la mayoría de los sistemas de las centrales hidroeléctricas. El procedimiento para el cálculo de la confiabilidad del sistema es el siguiente:

- Calcular la confiabilidad de los componentes del sistema conectados en serie.
- Calcular la confiabilidad de subsistemas redundantes de acuerdo con la configuración descrita en el cuadro 1.
  - Calcular la tasa de fallas λ_i de cada uno de los componentes de la redundancia.
  - Calcular la tasa de reparación μ_i de cada uno de los componentes de la redundancia.
  - Calcular la tasa de fallas del sistema equivalente λ.
  - Calcular la tasa de reparación del sistema equivalente μ.
  - Calcular la inconfiabilidad $I(t)$ del sistema equivalente, en función de λ y μ de acuerdo con la ecuación propuesta en el cuadro 1.
  - Calcular la confiabilidad del sistema equivalente en función de la inconfiabilidad.
- Calcular la confiabilidad del sistema por medio del producto de las confiabilidades de los componentes en serie y de los subsistemas redundantes.

Confiabilidad de unidades

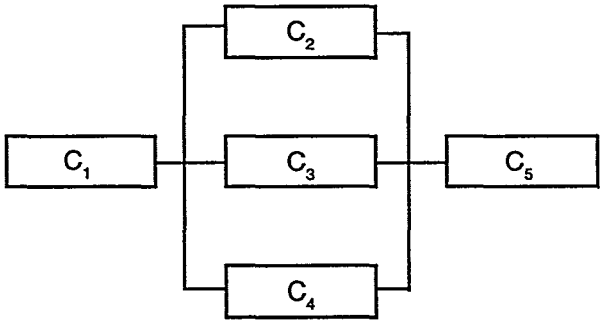
La confiabilidad de una unidad generadora (turbogenerador) se puede calcular por medio del modelo exponencial [Torres, J. G. *et al.*, 1995], considerando a la unidad generadora como un componente. En este modelo, se supone que la unidad generadora se encuentra en su vida útil. Para la aplicación del modelo exponencial se requiere información para evaluar la tasa de fallas. Este parámetro depende del número de fallas que ocurren en el periodo considerado, así como del tiempo real de operación de la unidad en el mismo lapso. Los datos necesarios para calcular el tiempo real de operación son las horas del periodo, las horas equivalentes que la unidad está fuera de servicio por fallas, las horas equivalentes que la unidad está fuera de servicio por mantenimiento programado, las horas equivalentes fuera de servicio por mantenimiento excedidas, las horas equivalentes fuera de servicio por causas externas, el número de mantenimientos excedidos y el número de fallas, en función de los cuales se calcula la confiabilidad de una unidad generadora.

Ejemplos de aplicación

Cálculo de la confiabilidad de un sistema

Para aplicar la metodología en el nivel de componentes y sistemas se considera un sistema que consta de cinco componentes, tres de los cuales forman una redundancia (caso 3 del cuadro 1), mientras que los dos restantes se encuentran conectados en serie como se muestra en la figura 1. En el cuadro 2 se presentan los datos de los cinco componentes que integran el sistema. El subsistema formado por los componentes C_2, C_3 y C_4, se reduce a un componente equivalente conectado en serie con los componentes C_1 y C_5, y la confiabilidad del sistema completo se evalúa por medio del producto de la confiabilidad de los componentes en serie. Para todos

FIGURA 1
Sistema serie-paralelo.



CUADRO 2
Datos de los componentes del sistema.

Componente	*Número de Fallas*	*Tiempo entre fallas (horas)*	*Número de reparaciones*	*Tiempo de Reparación (horas)*
1	4	230	-	-
		200		
		140		
		100		
2	3	250	2	2
		230		10
		225		
3	4	260	3	5
		185		8
		135		8
		130		
4	4	255	3	10
		190		10
		125		10
		115	-	-
5	3	250		
		200		
		170		

los componentes se considera un tiempo de misión de 24 horas.

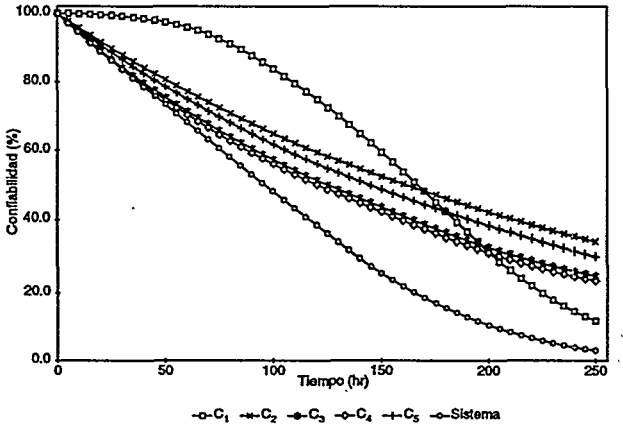
Los resultados de confiabilidad para cada uno de los componentes y del sistema se presentan en el cuadro 3 para un tiempo de misión de 24 horas. En la figura 2 se muestra una gráfica de la variación de la confiabilidad en función del tiempo de los cinco componentes, de manera independiente, y la confiabilidad del sistema.

Para el componente 1 se aplica el modelo Weibull. Para el resto de los componentes se utiliza el modelo exponencial debido a que resultan ser los mejores ajustes para los datos dados. Por esta razón, únicamente para el componente 1 se presentan los coeficientes α y β correspondientes al modelo Weibull. Para los componentes restantes se presenta la tasa de fallas λ del modelo exponencial (ver el cuadro 3). En dicho cuadro, también se presentan las confiabilidades calculadas por el programa de computadora para los componentes de manera individual y para el sistema integrado por dichos componentes.

En la figura 2 se muestra la variación de la confiabilidad particular en función del tiempo de los cinco componentes. En ella se observa que el componente C_1 es el más confiable, mientras que el C_4 tiene la menor confiabilidad. También se presenta la confiabilidad resultante del sistema.

Estos resultados permiten, entre otras cosas, determinar qué componentes del sistema presentan un funcionamiento deficiente, lo cual puede servir para comparar su desempeño relativo con otros componentes y sistemas similares.

FIGURA 2
Confiabilidad de componentes y sistema.



Cálculo de la confiabilidad de unidades (turbogeneradores)

Para mostrar la aplicación de la metodología para el cálculo de la confiabilidad de una unidad hidroeléctrica, se consideran los datos estadísticos de tres turbogeneradores que forman parte de una central hidroeléctrica, de los cuales se conocen el número de fallas y el número de mantenimientos excedidos, así como el tiempo real de operación en un periodo determinado. En el cuadro 4 se muestran dichos datos, así como los resultados del programa de cómputo para un tiempo de misión de 24 horas.

En la figura 3 se muestra la variación de la confiabilidad en función del tiempo para los tres turbogeneradores; en ella se observa que el mejor turbogenerador es el número 3 (el más confiable), mientras que el número 2 tiene la confiabilidad más baja de los tres (el menos confiable).

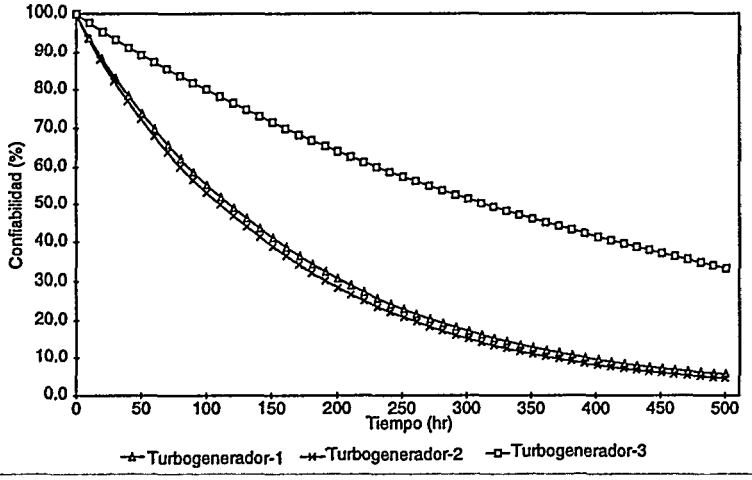
CUADRO 3
Resultados del programa de cómputo (confiabilidad de componentes y del sistema).

Componente	λ	α	β	μ	*Confiabilidad*
1	-	189.6104	2.8094		0.9970
2	0.0043	-	-	0.1333	0.9029
3	0.0056	-	-	0.1429	0.8735
4	0.0058	-	-	0.1000	0.8692
5	0.0048	-	-	-	0.8904
Sistema	0.0052	-	-	0.1254	0.8690

CUADRO 4
Resultados del programa de cómputo (confiabilidad de turbogeneradores).

Unidad	*Número de fallas*	*Número de mantenimientos excedidos*	*Tiempo real de operación*	*Tasa de fallas*	*Confiabilidad*
1	3	0	512	0.0059	0.8680
2	2	1	474	0.0063	0.8597
3	1	0	445	0.0022	0.9486

FIGURA 3
Confiabilidad de turbogeneradores.



Estos resultados permiten, entre otras cosas, hacer comparaciones relativas del comportamiento de turbogeneradores similares para evaluar su desempeño y planear el mantenimiento.

Conclusiones

• En este artículo se presentó e ilustró con ejemplos, una forma de calcular la confiabilidad de sistemas con redundancia sujetos a mantenimiento y unidades hidroeléctricas. El método, aunque aproximado para calcular la confiabilidad de sistemas con redundancias, proporciona resultados prácticos que pueden tener una aplicación inmediata.

• Se presentó el alcance y resultados de un sistema computacional para calcular la confiabilidad de arreglos multicomponentes, el cual no está limitado a componentes y sistemas de centrales hidroeléctricas.

• La utilidad de los resultados obtenidos es muy variada, dependiendo de los objetivos propuestos. Algunos de los cuales son:

- Permite establecer bandas de confiabilidad de los sistemas y unidades hidroeléctricas, con la finalidad de establecer metas de desempeño realistas.
- Identifica los equipos o sistemas que se encuentran en estado de desgaste o envejecimiento.
- Ayuda en la planeación del mantenimiento preventivo.

Referencias

EPRI AP-5974 (1988), *Reliability and availability data for gas turbine generator procurement,* Electric Power Research Institute.

Hines, W. W. y D. C. Montgomery (1994), "Probabilidad y estadística para ingeniería y administración", CECSA.

Lewis, E. E. (1984), *Introduction to reliability engineering,* John Wiley & Sons.

Mandel, J., *The statistical analisys of experimetal data,* Dover Publications, Inc., Nueva York.

Torres, J. G., R. Sánchez, H. M. Zúñiga y L. E. Leyva (1995), "Cálculo de confiabilidad de generación termoeléctrica", XVIII Taller Internacional de Capacitación en Calderas, Recipientes a Presión, Temas Afines y Exposición Industrial, AMIME.

RAMÓN SÁNCHEZ SÁNCHEZ

Ver su currículum en la página 266.

GERARDO TORRES TOLEDANO

Ver su currículum en la página 266.

JOSÉ MANUEL FRANCO NAVA

Ver su currículum en la página 266.

Estimado lector

¡Su opinión nos interesa!

Por favor envíenos a vuelta de correo, por medio de fax o por Internet sus respuestas de la *Encuesta Boletín IIE* (septiembre/octubre de 1996).

Nuestra dirección:
Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)
Departamento de Difusión
Avenida Reforma núm. 113, colonia Palmira, CP 62490 Temixco, Morelos, México,
Teléfono (73) 18 38 11, extensión 7185.
Fax: (73) 18 98 54
Internet: http://www.iie.org.mx/

Ratificación y suscripciones

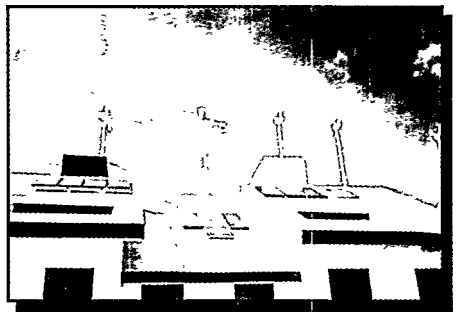
Si está suscrito a *Boletín IIE,* remítanos su ratificación —con todos los datos— si desea seguir recibiendo esta revista.

Para suscripciones, llene por favor la *Forma de ratificación de suscripción al Boletín IIE* y envíela por correo o por fax a nuestras instalaciones.
También puede hacer uso del correo electrónico: asa@iie.org.mx.

Para mayores informes, comunicarse con la señora **Laura Cárdenas, al teléfono (73) 18 25 27.**

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
Tel. (73) 18 38 11 ext. 7771.