ETDE-MX--9971749

IIE Bulletin.
Selected articles from 1991 issues of 'boletin iie'

DISCLAIMER

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

MX9800207

La confirmación de una hipótesis de trabajo: Una nueva caldera en el centro del Cinturón Volcánico Mexicano

Francisco Anguita
Surendra P. Verma
Marcos Milán
Luis García Cacho
Daniel Samaniego M.

- *Una serie de evidencias indica la existencia de una nueva caldera volcánica, en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano.*
- *Las calderas volcánicas son importantes porque pueden servir para documentar erupciones de alta explosividad y porque con frecuencia están asociadas a yacimientos geotérmicos.*

Resumen

Tras sintetizar los aspectos más destacados de la vulcanología actual y el proceso de génesis de las calderas de colapso, se describe el proceso de localización y confirmación de una nueva caldera (la Mazahua) en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM).

Introducción

La vulcanología es sin duda una de las especialidades fundamentales para el desarrollo de la geología actual porque une a sus capacidades explicativas de la dinámica general de la Tierra un amplio abanico de posibilidades de aplicación; sin olvidar el atractivo que por sí mismo tiene el fenómeno del vulcanismo para el público (véase Araña y Ortiz, 1984, y Anguita, 1988).

La génesis y distribución geográfica de los volcanes no ha sido bien comprendida hasta hace muy poco tiempo; en concreto, hacia la mitad del decenio de los sesenta, cuando surgió la teoría de la tectónica de placas, según la cual la capa rocosa superior de la Tierra (la litósfera) es creada y destruida continuamente mediante procesos magmáticos. Así, los geógrafos clásicos explicaban el Cinturón de Fuego del Pacífico como una zona de destrucción de litósfera (o subducción) y consideraban, sin más, al CVM, la banda de miles de volcanes que se extiende desde Veracruz hasta Puerto Vallarta, como el resultado de la subducción de la litósfera del Océano Pacífico bajo el continente mexicano.

En estos veiticinco años, la evolución de los conocimientos geológicos ha puesto en duda este modelo simplista. En primer término, porque los tipos de rocas emitidos por los volcanes del CVM no son sólo típicos de las zonas de subducción (Aguilar-Y-Vargas y Verma, 1987, y Verma y Aguilar-Y-Vargas, 1988). Los volcanes generados por la subducción emiten rocas llamadas genéricamente calcoalcalinas, siendo la andesita la más representativa. Sin embargo, los volcanes del CVM han emitido otras rocas que pertenecen al grupo de las alcalinas, que son más típicos de grandes fracturas continentales. Por ello, una región (o provincia) volcánica compleja como el CVM es como un gran laboratorio natural donde poner a prueba las grandes teorías sobre el origen de los magmas. Especialmente, desde especialistas en geoquímica son capaces de modelar, mediante el análisis de elementos traza y de sus isótopos, las condiciones de formación (fuente, profundidad, temperatura) y evolución (contaminación con otras rocas, por ejemplo) de los magmas. Hoy, más que nunca, es cierto que los volcanes son ventanas hacia el interior de la Tierra, zonas clave para interpretar la dinámica profunda del planeta.

Resulta evidente que los volcanes son sistemas geológicos potencialmente peligrosos. En este artículo, no se describirá ninguna de las catástrofes de origen volcánico, recientes o no que han sacudido al hombre. muchos recordarán, sin embargo, los efectos de la erupción del volcán El Chichón y algunos los del nacimiento del Paricutín. Lo cierto es que el riesgo volcánico es una de las disciplinas importantes de la casi recién nacida especialidad: prevención de riesgos geológicos.

Conocer las modalidades de evolución de una erupción volcánica significa poder calibrar su riesgo potencial y, por ello, estar en condiciones de adoptar las decisiones correctas respecto a ella. Sin embargo, como dicen los vulcanólogos, no hay dos volcanes idénticos. Esto significa que, tras estudiar detenidamente el registro de la actividad de un aparato volcánico y compararlo con el de otros similares, los especialistas podrán elaborar sólo un modelo probabilístico del curso de una erupción. Lógicamente, el modelo tendrá un mayor grado de confiabilidad cuanto más detallados sean los estudios previos, y esto, por sí sólo, bastaría para justificar la vulcanología básica.

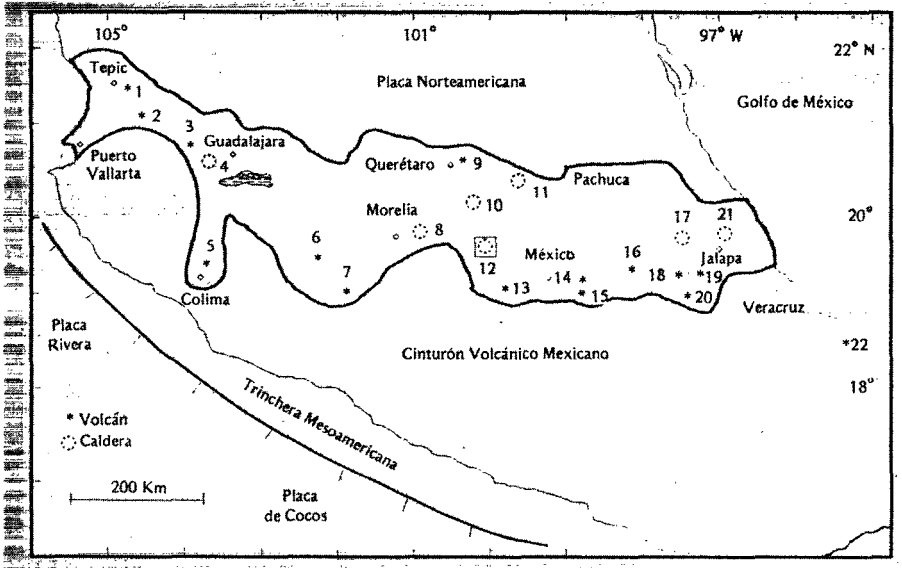
Por último, está la cuestión del aprovechamiento energético del fenómeno volcánico. Los yacimientos geotérmicos (zonas de rocas calientes y saturadas de fluidos, a profundidades relativamente pequeñas) han sido ya exhaustivamente descritas en este boletín (vol. 8, núm. 3). Para

los efectos de este artículo, interesa tan sólo precisar que buena parte de los yacimientos geotérmicos están localizados en la proximidad de calderas volcánicas. Una caldera volcánica es una estructura formada, en general, por el hundimiento (colapso) de un edificio volcánico, tras el vaciado parcial (en una erupción de gran magnitud) de la cámara magmática situada bajo éste. La existencia de una caldera de colapso es la evidencia de una cámara magmática de grandes dimensiones, que aun puede estar emitiendo calor residual hacia la superficie.

Así pues, las calderas volcánicas son importantes por un doble motivo: primero, porque pueden servir para documentar erupciones de alta explosividad (lógicamente las de más alto riesgo) y segundo, porque con frecuencia están asociadas a yacimientos geotérmicos, cuyo interés económico no hace falta resaltar. Para concluir esta quizá demasiado larga introducción, se dirá que aunque en el CVM abundan las rocas emitidas en erupciones explosivas (en las que potencialmente se pueden formar calderas), el número de calderas localizadas en él no llega a la decena (véase la Fig. 1), y que en esta región hay más de 8 000 edificios volcánicos reconocidos (Robin, 1982).

FIGURA 1

El Cinturón Volcánico Mexicano



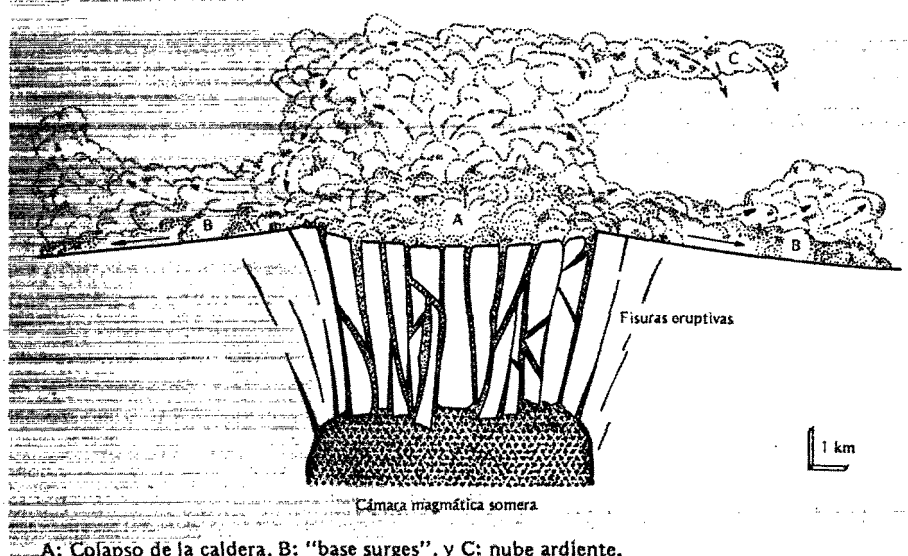
Algunos de sus volcanes más conocidos y todas las calderas localizadas en él: 1 Sanganguey, 2 Ceboruco, 3 Tequila, 4 La Primavera, 5 Colima, 6 Paricutín, 7 Jorullo, 8 Los Azufres, 9 El Zamorano, 10 Amealco, 11 Huichapan, 12 *Mazahua*, 13 Nevado de Toluca, 14 Iztaccíhuatl, 15 Popocatépetl, 16 La Malinche, 17 Los Humeros, 18 Las Derrumbadas, 19 Cofre de Perote, 20 Pico de Orizaba, 21 Chiconquiaco, 22 Los Tuxtlas.

Localizar una caldera

Los volcanes que tienen actividad explosiva, como la que puede llegar a producir un colapso caldérico, emiten frecuentemente un magma viscoso que se fragmenta por la explosión de los gases ocluidos y viaja a gran velocidad en una suspención densa: es una nube ardiente (véase la Fig. 2). Como los fragmentos de magma se llaman piroclásticos, el conjunto depositado se llama flujo piroclástico, y también ignimbrita. Los fragmentos de magma vesiculado se denominan pómex, y de ahí los términos comunes pumita o pumicita. De esta manera, un dato clave para la localización de calderas es la abundancia de ignimbritas. Sin embargo, una secuencia ignimbrítica, por sí sola, no es indicativo suficiente de una caldera. En primer lugar, habrá que averiguar su dirección de flujo. El mejor criterio para ello es la inclinación de los mantos (estratos) de la roca; no obstante, también una serie de valiosos elementos auxiliares. Por ejemplo, la nube ardiente empuja delante de sí material suelto y lo deposita en su frente formando capas con estructuras oblicuas llamadas oleadas piroclásticas (*base surges*). Otras veces un flujo piroclástico arranca fragmentos del anterior y los arrastra en su recorrido. Incluso, se dan factores aleatorios, como la presencia de troncos derribados (marcados por el molde hueco en el seno de la ignimbrita) que pueden ser indicativos, ya que tienden a alinearse en la dirección del flujo.

FIGURA 2

Esquema idealizado



A: Colapso de la caldera, B: "base surges", y C: nube ardiente.

Idealmente, estos criterios apuntarían hacia un área geográfica concreta. ¿Qué se debería esperar encontrar ahí? En principio, algún tipo de roca que indicase un episodio de alta explosividad (cataclísmico). En general, se suele hablar en vulcanología de niveles indicadores de la formación de una caldera (C-FE, de sus siglas en inglés *caldera-forming events*). Un C-FE suele ser una brecha (roca con grandes cantos angulosos) con matriz ignimbrítica, lo que implica que una gran explosión ha arrancado bloques de la chimenea (líticos) que se unen a los fragmentos de pómex.

Además de los criterios puramente vulcanológicos, existe otro tipo de indicios sobre la existencia de calderas. El principal de ellos es la presencia de fracturas circulares. Una cámara magmática puede tener formas diversas, pero su parte superior es con frecuencia cilíndrica o troncocónica. Por ello, el colapso de su techo se produce según pautas aproximadamente circulares. En la mayor parte de los casos se encuentran también fallas radiales a la estructura, generadas por tensiones diferenciales entre la zona central colapsada y la parte periférica.

Un último criterio recurre a datos geofísicos. Como la roca colapsada se fractura como resultado del propio colapso y también de la explosión que lo precedió, su densidad global es menor que las de las rocas de su exterior. Asimismo, la depresión caldérica puede ser ocupada, al menos temporalmente, por un lapso, donde se acumulan sedimentos, que serán rocas de baja densidad. Por todo ello, una caldera es sistemáticamente una zona con defecto de masa y, por tanto, habría que esperar en ella un mínimo de gravedad (anomalía gravimétrica negativa).

FIGURA 3

Imagen Landsat donde se realizó el descubrimiento inicial

A, Caldera de Amealco; H, Caldera de Huichapan, y M, Caldera Mazahua.

La Caldera Mazahua

En 1989, un equipo mixto hispanomexicano, compuesto por geólogos, ingenieros geólogos y geoquímicos, realizó una campaña de análisis y muestreo sobre dos calderas (las de Amealco y Huichapan), previamente localizadas en los estados de Querétaro e Hidalgo, respectivamente, en la parte central del CVM (véase Fig. 1). En el curso de la campaña, se localizó en una imagen de satélite (véase la Fig. 3) y de forma puramente casual lo que parecería ser una estructura circular de unos 8 km de diámetro, al sur de las dos calderas indicadas, ya en el Estado de México. El primer indicio lo proporcionó la curiosa forma en hoz de la presa de Tepetitlán, cerca de la villa de San Felipe del Progreso. A la sospecha siguió un reconocimiento en fotos aéreas de varias escalas (1:30 000 y 1:45 000) que permitieron localizar estructuras menores que cierran aproximadamente el círculo. Se planeó, entonces, una campaña de campo que permitiese completar los datos estructurales con criterios vulcanológicos.

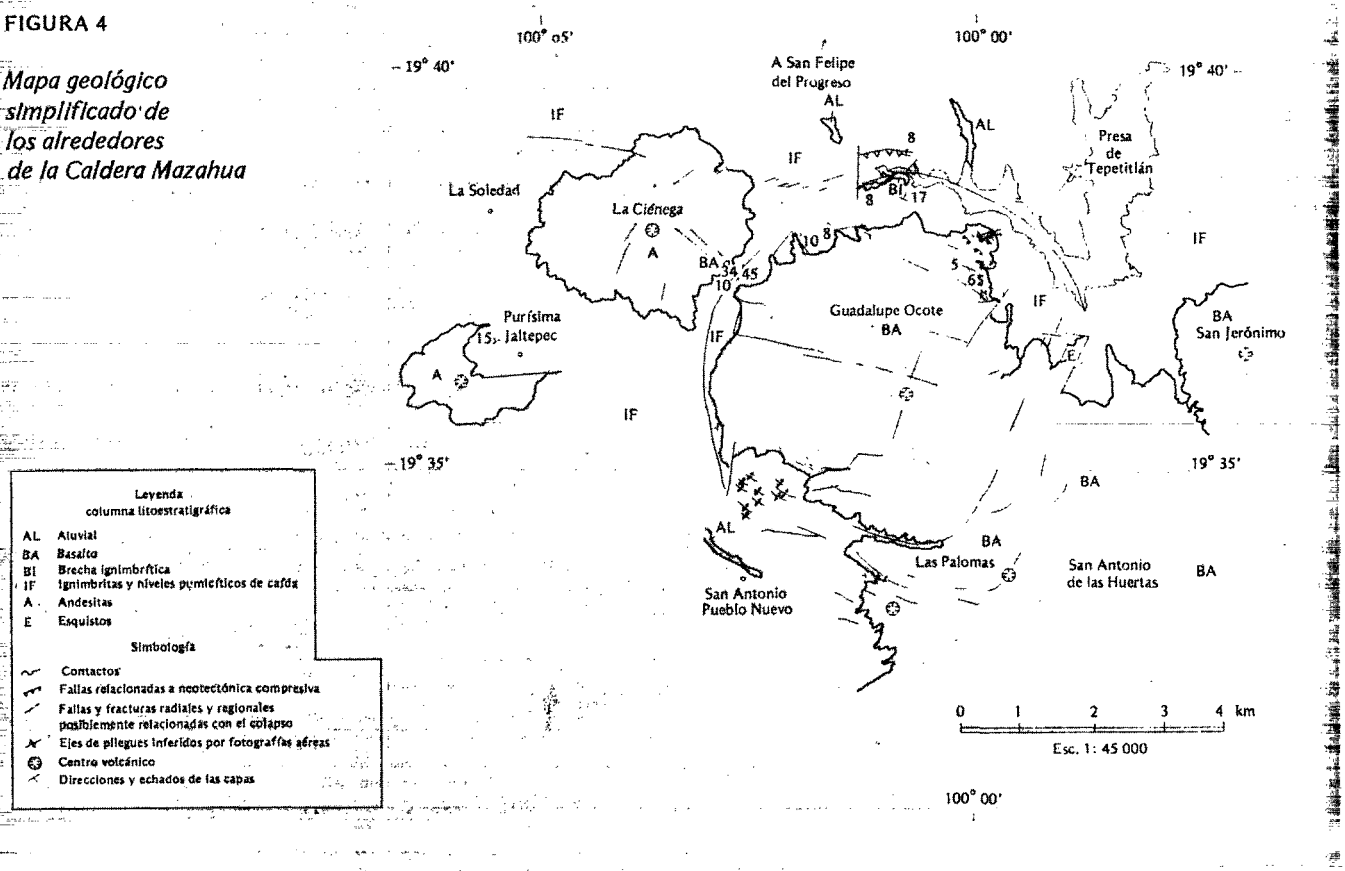
En el curso de esta campaña (octubre de 1990), se confeccionó el mapa geológico detallado de la zona (véase la Fig. 4), y se reconocieron las siguientes evidencias:

- La región está cubierta en su mayor parte por ignimbritas. Aunque no se puede asegurar que todas procedan de la estructura circular, la mayor parte de los criterios de campo así lo sugiere: hay huellas de arrastre en igual sentido en la parte alta de algunos mantos, se encontraron oleadas piroclásticas (véase la Fig. 5) también con indicación de flujo centrífugo desde el centro de la caldera e, incluso, los restos de un bosque derribado por las erupciones, cuyos troncos, en general, estaban dirigidos radialmente (véase la Fig. 6).

- Aunque las oleadas piroclásticas son por sí mismas indicadores de la proximidad del centro eruptivo, el principal argumento en este sentido fue la localización, en el borde norte de la estructura, de un C-FE bajo la forma de una brecha ignimbrítica (véase la Fig. 7) con bloques de pumitas y de líticos de hasta 20 cm. Este conjunto de argumentos se ha considerado suficiente para definir esa estructura circular como una caldera de colapso, a la que se denominó Caldera Mazahua, como un tributo a la etnia dominante en la región.

FIGURA 4

Mapa geológico simplificado de los alrededores de la Caldera Mazahua



El trabajo futuro

De la comparación de este último apartado con el anterior, puede concluirse una evidencia: quedan aún muchos aspectos por investigar en la Caldera Mazahua. Quizá el principal de ellos sea confirmar, mediante una campaña gravimétrica, si existe un mínimo de gravedad en la caldera. La vulcanología de la zona también debe precisarse: cuál era el quimismo del magma inicial del edificio Mazahua, cómo evolucionó hasta su fase terminal, cuánto duró esta evolución, cuál es exactamente la edad de la caldera... Estas preguntas sólo podrán contestarse tras minuciosas campañas de muestreo y análisis. Aspectos aún no bien comprendidos, como la escasa extensión de la importante brecha ignimbrítica (C-FE), y la continuación (resurgencia) del vulcanismo explosivo con otro de composición radicalmente distinta (basáltico) podrían quizá resolverse entonces.

FIGURA 5

Oleada piroclástica en el borde oeste de la estructura

El sentido de flujo de la nube ardiente que lo depositó era de izquierda a derecha.

FIGURA 6

Moldes de troncos incluidos en la ignimbrita

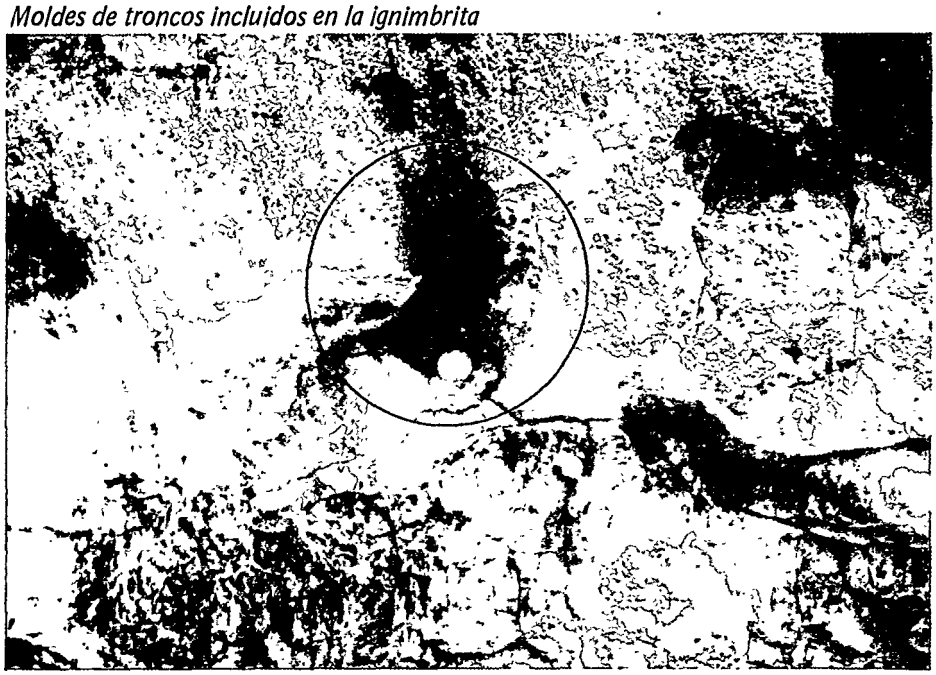


FIGURA 7

Brecha ignimbrítica en la periferia de la Caldera Mazahua

Por encima de estos débiles planes, una regularidad: el número de calderas generadas durante la evolución del CVM ha debido ser grande. ¿Por qué, entonces, se ha descubierto un número tan escaso de ellas? La aplicación sistemática de los criterios antes apuntados debe permitir en el futuro un avance cuantitativo importante en este aspecto de interés crucial para la vulcanología del país, tanto aplicada como básica.

Agradecimiento

Este trabajo fue financiado parcialmente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). La visita a México de los investigadores españoles, los doctores Luis García Cacho y Francisco Anguita fue posible gracias al convenio Conacyt-CSIC "Geoquímica, vulcanología e hidrología", México-España. Agradecemos la colaboración del doctor J. de D. Centeno Carrillo, del Departamento. de Geodinámica, de la Universidad Complutense de Madrid, en la interpretación fotogeológica inicial del área del presente estudio.

Referencias

Aguilar-Y-Vargas, V.H. y S.P. Verma, "Composición química (elementos mayores) de los magmas en el Cinturón Volcánico Mexicano", *Geofísica Internacional*, volumen especial sobre el Cinturón Volcánico Mexicano, parte 3B (ed. S.P. Verma), 26, 1987, pp. 195-272.

Araña, V. y R. Ortiz, *Vulcanología*, Madrid, Rueda, 1984, 510 p.

Anguita, F., *Origen e historia de la Tierra*, Madrid, Rueda, 1988, 527 p.

Robin, C., "Relations volcanologie-magmatologie-geodynamique: Application au passaje entre volcanismes alcalin et andesitique dans le sud Mexicain (Axe Trans-mexicain et Province Alcaline Orientale)". *Annales Scientifiques de l'Université de Clermont-Ferrand II*, núm. 70, Clermont-Ferrand, 1982, pp. 503.

Verma, S.P., "Metodología para el estudio del Cinturón Volcánico Mexicano", *Boletín IIE*, vol. 14, núm. 5, septiembre/octubre de 1990, pp. 224-229.

Verma, S.P. y V.H., Aguilar-Y-Vargas, "Bulk Chemical Composition of Magmas in the Mexican Volcanic Belt (Mexico) and Inapplicability of Generalized Arc-models", *Chemie der Erde*, 48, 1988, pp. 203-221.

MX9800208

Sistema supervisorio para el monitoreo en tiempo real de esfuerzos térmicos transitorios en rotores de turbinas

Gustavo Urquiza Beltrán
Edmundo Ríos Miranda
Ricardo Venegas Guzmán
Gabriela Alvarez García

- *El sistema supervisorio permite seguir, en tiempo real, el nivel de esfuerzos térmicos en régimen transitorio y reunir la evolución de los parámetros de operación de la turbina.*
- *El operador de las turbinas de vapor obtiene del sistema supervisorio información para mejorar la operación de las turbinas, flexibilizar la utilización y extender la vida útil del equipo.*

Resumen

En este artículo se presenta un sistema supervisorio que, como funciones principales, asiste al operador con base en el monitoreo de esfuerzos térmicos en tiempo real en los rotores de presión alta (PA) y presión intermedia (PI) de una turbina de vapor durante un arranque, paro y/o variaciones bruscas de carga. El sistema está basado en un modelo térmico unidimensional integrado al SIMPER (sistema informático para el mantenimiento predictivo de equipo rotatorio), experimentado en una unidad de 300 MW de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Introducción

En las turbinas de vapor modernas, los esfuerzos térmicos desempeñan un papel de suma importancia debido al grueso espesor de sus componentes. Estos limitan la flexibilidad de utilización de las máquinas en régimen transitorio (durante arranques, paros y/o variaciones de carga), estos componentes pueden limitar la velocidad de toma de carga de la turbina, así como la variación de la temperatura del vapor.

Considerando la estructura de las turbinas de vapor modernas, los rotores son los componentes sometidos a niveles más altos de esfuerzos, particularmente en la zona de admisión donde las variaciones de temperatura del vapor son más rápidas y de mayor amplitud.

En este estudio, se presenta un sistema supervisorio basado en un modelo matemático unidimensional para el cálculo de esfuerzos térmicos en los rotores de PA y PI de una turbina; este modelo programado en una computadora industrial permite seguir, en tiempo real, el nivel de esfuerzos térmicos en régimen transitorio y reunir la evolución de los parámetros de operación de la turbina con la magnitud de sus esfuerzos. Asimismo, se describen las experiencias realizadas con dicho modelo.

Modelo de cálculo de esfuerzos en tiempo real

Los esfuerzos térmicos en los rotores de las turbinas de vapor no son parámetros directamente medibles. Con la finalidad de operar las turbinas con mayor seguridad, es necesario, por una parte, conocer lo más exactamente posible los esfuerzos térmicos instantáneos y, por otra, prevenir las consecuencias de toda maniobra de operación, desde el punto de vista de estos esfuerzos. Con este fin, se desarrolló un modelo matemático simplificado para el monitoreo de esfuerzos térmicos en los rotores de PA y PI de una turbina.

Especificaciones

El objetivo es realizar un cálculo de esfuerzos en tiempo real en una computadora industrial, utilizando para esto un modelo lo más simple posible.

Los programas que constituyen el modelo ocupan poco espacio. Asimismo, para que los cálculos puedan realizarse en tiempo real, se requiere que el tiempo de ejecución de los programas sea suficientemente corto.

Si se desea utilizar todas las facilidades que ofrece el modelo, es posible realizar un cálculo provisional, de tal manera que proporcione al operador información sobre la futura operación de la turbina; esto puede efectuarse siempre y cuando el tiempo de ejecución, de un paso del cálculo del modelo, sea suficientemente corto.

Asimismo, los resultados que se obtienen con el modelo puede interpretarlos con facilidad un operador no especializado.

Por estas razones, el modelo utilizado es un modelo unidimensional que posee las características que en seguida se describen.

Modelo en tiempo real

El modelo en tiempo real no proporciona la distribución completa de los esfuerzos en los rotores, sino únicamente los esfuerzos térmicos tangenciales en las superficies externas e internas de los rotores de PA y PI. Estos esfuerzos son calculados en el nivel de los sellos de laberinto del primer paso de PA y del primero de PI, lugares considerados críticos debido a las fuertes variaciones de temperatura del vapor en esas zonas. Los esfuerzos térmicos calculados por el modelo son cuatro, y constituyen parámetros que fácilmente puede vigilar el operador de la turbina. Su evolución dinámica está directamente relacionada con la evolución de la temperatura del vapor a la admisión de PA y PI, así como de las variaciones de carga de la turbina, lo que facilita su control.

Por comparación entre los resultados suministrados por un modelo analítico (Estrada *et al.*, 1989) y el modelo simplificado para las mismas condiciones de operación de la turbina (presión y temperatura del vapor) fue posible equiparar el modelo de simulación en tiempo real y definir los límites admisibles de los parámetros calculados en tiempo real. Estos límites admisibles están en función de la temperatura del rotor en los puntos donde se calculan los esfuerzos, por lo que también se necesita conocer la temperatura del metal del rotor. Para obtener los límites admisibles de esfuerzos térmicos, se consideran igualmente los esfuerzos mecánicos debidos a la fuerza centrífuga calculados independientemente.

Método de cálculo

El modelo está basado en la aproximación de un cilindro hueco infinitamente largo y se supone por hipótesis que:

- El problema tiene simetría de revolución, el cilindro transmite calor por convección con un fluido externo a la temperatura Tv(t).
- Los flujos de calor son radiales.
- Las condiciones iniciales de temperatura en el rotor al tiempo $t = 0$ es $T(r,0) = Tv(0)$.
- El flujo de calor sobre la superficie interna se considera adiabático.

El flujo de calor sobre la pared externa es de la forma:

$$h\{T(r,t) - Tv(t)\}$$

donde T(r,t) representa la temperatura del metal en el radio al instante t; Tv, la temperatura del vapor en un tiempo dado, y h, el coeficiente de convección en la superficie del rotor.

Considerando la ecuación diferencial de conducción para el caso de un cilindro hueco infinitamente largo,

$$\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T(r,t)}{\partial t}$$

donde

$$\alpha = \frac{k}{\varrho c}$$

cuyas condiciones en los límites son:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = 0 \text{ en } r = r_i$$

$$Tv(t) - T(r,t) = \frac{k}{h}\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \text{ en } r = r_e$$

donde:

α — difusividad térmica.
k — conductividad térmica.
ϱ — densidad.
c — calor específico.

El conocimiento de la distribución de temperaturas en el cilindro permite calcular el esfuerzo térmico, dividiendo el rotor en once cilindros concéntricos. El esfuerzo térmico en el elemento (i) es:

$$\sigma = \frac{E\beta\,[Tm - T(i)]}{1 - \nu}$$

donde:

σ — esfuerzo térmico.
E — módulo de elasticidad.
β — coeficiente de dilatación.
ν — coeficiente de Poisson.

Para su solución, la ecuación diferencial parcial se expresa en diferencias finitas, utilizando un esquema implícito, y se obtiene un sistema de ecuaciones lineales simultáneas que se resuelven por iteración mediante el método de Gauss-Seidel. Para cada paso de tiempo, se calculan para los rotores de PA y PI, los parámetros:

- La temperatura del metal sobre la superficie externa (PA y PI).
- El esfuerzo térmico tangencial sobre la superficie externa y el límite admisible correspondiente (PA y PI).
- La temperatura promedio Tm del rotor (PA y PI).
- El esfuerzo térmico tangencial sobre la superficie interna y el límite admisible correspondiente (PA y PI).

Entradas del modelo

El modelo recibe como parámetros de entrada las variables:

a) Para el cuerpo de presión alta:

- La temperatura del vapor principal lado izquierdo.

- La temperatura del vapor principal lado derecho.
- La temperatura del vapor en la sección del paso curtis.

b) Para el cuerpo de presión intermedia:

- La temperatura del vapor recalentado lado izquierdo.
- La temperatura del vapor recalentado lado derecho.

c) Para el cálculo de esfuerzos mecánicos:

- La velocidad de rotación de la turbina (rpm).

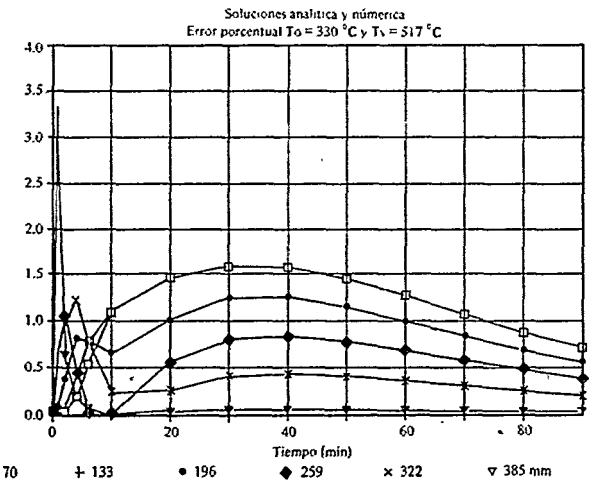
d) La variación de la carga (MW).

Validez del modelo simplificado

Con el fin de validar el modelo matemático simplificado y mostrar que es representativo respecto de la evolución del estado térmico en los rotores de PA y PI de la turbina, se compararon los resultados de la solución numérica contra la solución analítica para las mismas condiciones de operación (presiones y temperaturas), obteniéndose un error máximo de la solución numérica de 3.29% (véase la Fig. 1).

FIGURA 1

Distribución del error porcentual de la solución numérica como función del tiempo para los radios de 70, 133, 196, 259, 322 y 385 milímetros, con To = 330 °C y Tv = 517 °C



Al refinar tanto la malla como el paso de tiempo en la solución numérica el error se redujo, pero el tiempo de cómputo aumentó (Estrada *et al.*, 1989).

Experiencia de cálculo en tiempo real de esfuerzos térmicos

Una vez integrado el modelo simplificado en computadoras industriales, se instaló por primera vez en la U-3 de 300 MW de la central termoeléctrica de Manzanillo I, donde se realizaron los cálculos en tiempo real de los esfuerzos en los rotores de las turbinas, utilizando la información obtenida para mejorar la operación de las unidades en régimen transitorio.

Entre las múltiples opciones que se realizan en la computadora, se distinguen esencialmente:

- El cálculo de esfuerzos en tiempo real.
- La función de simulación.
- La función de asistencia en el arranque o guía al operador.

Las dos últimas funciones tienen por objeto facilitar la utilización de los resultados o efectuar modificaciones eventuales.

Cálculo de esfuerzos en tiempo real

En las pantallas de las computadoras, aparece cada ΔT segundos (programables) las medidas suministradas por cada unidad, a partir de ellas se obtiene la temperatura del vapor y se efectúa un paso de cálculo utilizando el modelo.

En las pantallas aparecen mensajes de alarma cuando se sobrepasan los esfuerzos admisibles. El cálculo de un paso en el modelo, comprendiendo el cálculo de las temperaturas, dura un segundo aproximadamente.

El operador puede, en cualquier momento, mandar a imprimir la lista de los valores de esfuerzos térmicos y de los límites admisibles, así como una lista de los principales parámetros de operación.

Función de simulación

Considerando el corto tiempo de ejecución de un paso de cálculo del modelo, el operador puede solicitar un cálculo provisional si así lo desea; se indica entonces el gradiente de temperatura en grados Celsius por minuto que el operador desee probar y la simulación calculada. A partir de este gradiente aplicado al modelo, se obtienen la evolución de los esfuerzos y sus límites durante un periodo deseado (de máximo 2 horas). El operador puede probar diferentes gradientes hasta que encuentre el gradiente que proporcione los esfuerzos aceptables. De esta manera, el modelo permite al operador apreciar la evolución de los esfuerzos térmicos y de maniobrar oportunamente. El modelo elabora así una información de tipo predictivo basada en los esfuerzos calculados (véase la foto 1).

Para cada cálculo realizado, las magnitudes de admisión de la turbina evolucionan linealmente, según su tendencia desde el inicio del cálculo, en que el estado térmico del rotor se considera estado inicial en el modelo.

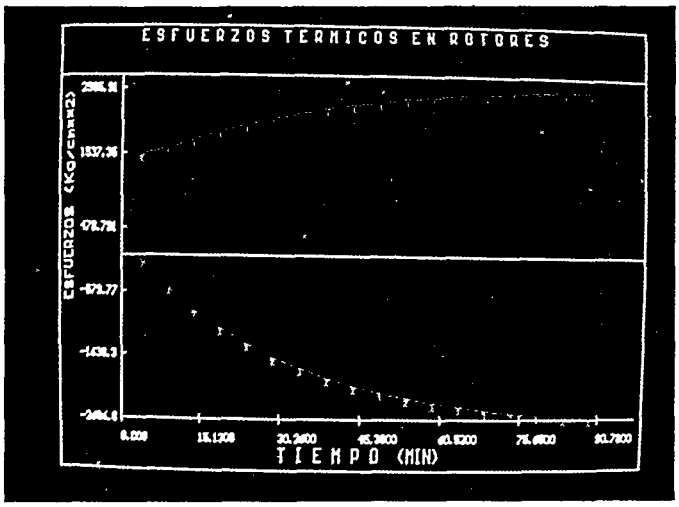


Foto 1. Simulación de esfuerzos térmicos para un tiempo dado.

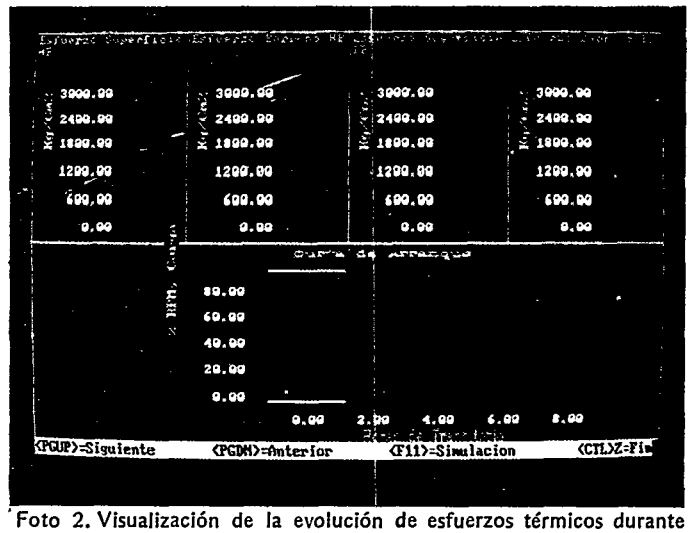


Foto 2. Visualización de la evolución de esfuerzos térmicos durante un arranque.

Equipo utilizado y visualización

La función principal del sistema supervisorio es aportar al operador una ayuda eficaz en la decisión y presentar las informaciones suministradas de manera diversificada.

El sistema instalado para la realización de esta experiencia constó de una PC Olivetti con disco duro de 40 MB, así como de una impresora Epson. La interfaz hombre/máquina fue mediante despliegues gráficos en pantalla. El equipo de adquisición de datos fue el ACROMAG modelo 6000, que se utiliza para las mediciones de las variables mencionadas.

Durante el seguimiento del programa de arranque, se observaron en las pantallas de las computadoras las funciones:

- El estado de avance del programa. El valor real y el valor programado de las instrucciones y de las pendientes para los parámetros principales aparecen en la pantalla en forma gráfica. Según la instrucción, una zona de evolución aceptable tiene en cuenta los aleatorios de operación, los cuales son visualizados por límites que, cuando son sobrepasados, activan una alarma (véase la foto 2).

- Registrador de esfuerzos. Este registrador suministra, para cada rotor, el esfuerzo equivalente instantáneo y el esfuerzo límite admisible para el barreno y la periferia del rotor.

Esta información se complementa, indicando cuándo está un periodo de calentamiento o enfriamiento del rotor.

- Diálogo entre el operador y el sistema. Se ha previsto una serie de diálogos entre el operador y el sistema que se refieren ya sea a programas de cálculo o a solicitudes de información relativas a resultados de cálculo.

Cuando estos diálogos necesitan respuestas del operador, los intercambios se realizan en lenguaje muy claro. Todo lenguaje informático ha sido eliminado, así como las abreviaturas.

- Gráficas de las curvas de arranque o variaciones de carga, según el programa elaborado por el sistema a solicitud del operador.

- Edición de un diario recapitulativo que grafica de nuevo (por el periodo seleccionado por el operador) las evoluciones de una serie de magnitudes analógicas, ya sea adquiridas por los sistemas de medición o el resultante de cálculos efectuados por el sistema. Este diario recapitulativo es una valiosa herramienta de formación y de perfeccionamiento para el personal, que puede analizar *a posteriori* la operación en periodo de arranque o en régimen variable, así como el aspecto cualitativo de las decisiones tomadas por el operador. En particular, es aconsejable editar un diario de este tipo que pueda ser archivado, después de cada arranque o evento transitorio.

Resultados

Con el material antes descrito, se efectuaron las primeras pruebas de cálculos en tiempo real de esfuerzos térmicos transitorios. El objetivo de estas pruebas fue registrar, durante un periodo de arranque en frío (temperatura del vapor menor a 121°C en la cámara de impulso), los esfuerzos térmicos calculados en los rotores de PA y PI de la turbina, así como los parámetros principales del funcionamiento de la unidad, con el propósito de relacionar los esfuerzos observados con el procedimiento de arranque.

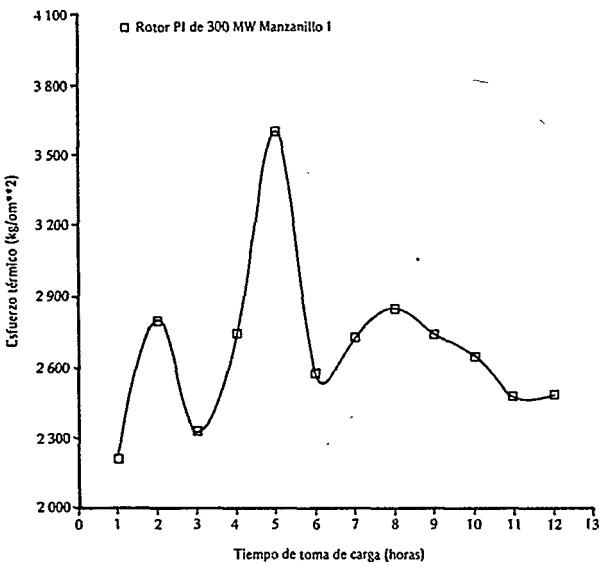
Ejemplo de resultados obtenidos. Procedimiento de arranque

Un arranque en frío puede dividirse en cuatro fases de interés térmico para la turbina:

1. Sincronización y choque del vapor en el cuerpo de PA.
2. Incremento de la temperatura del vapor sobrecalentado.
3. Incremento de carga.
4. Incremento de la temperatura del vápor recalentado.

FIGURA 2

Variación de esfuerzos térmicos vs. *tiempo*



Las fases 2 y 3 no siempre son iguales: a veces se conjuntan y los esfuerzos observados son los resultados de los esfuerzos debidos a cada fase.

Los esfuerzos térmicos dependen de la forma con que se opera cada fase del arranque. De la forma de la fase 1, depende el choque térmico en el rotor de PA. De las fases 2 y 3, dependen los gradientes de temperatura del vapor en el nivel del primer paso de PA, generándose así los esfuerzos térmicos transitorios.

Los resultados obtenidos durante las pruebas han mostrado (véase la Fig. 2) que, para este tipo de máquina y en las condiciones de operación normal, la distribución de estos esfuerzos con el tiempo es variable y, algunas veces, desfavorable (esfuerzos altos cuando los límites son pequeños e inversamente).

El cálculo de los esfuerzos y las maniobras realizadas permiten considerar mejoras en las recomendaciones de operación con el propósito de obtener una distribución más regular de esfuerzos durante el arranque.

Optimación

En la realidad, resulta relevante conocer con anticipación cuáles son las posibilidades máximas de maniobra de una turbina de vapor compatibles con los esfuerzos térmicos. En efecto, puede cuestionarse la operación de arrancar rápidamente una turbina o bien, tomar instantáneamente la carga máxima admisible. El arranque más rápido es aquel en el que se unen lo más rápido posible la curva de esfuerzo térmico real con el esfuerzo límite admisible, lo que comúnmente se conoce como arranque en tiempo mínimo.

Utilizando el sistema para el cálculo de esfuerzos, se tiene determinado un algoritmo que permite conocer —cualquiera que sea el estado térmico inicial de la turbina— la ley de variación de la temperatura en el nivel del primer paso de PA (o PI) que proporciona los esfuerzos térmicos máximos admisibles en el rotor de PA (o PI). A partir de esta ley, se calcula el arranque en tiempo mínimo o la variación de carga máxima para la turbina, determinando las leyes de variación de los principales parámetros de operación (presión y temperatura del vapor a la admisión y carga).

Conclusiones

Puede decirse que el sistema supervisorio desarrollado suministra informaciones de gran interés para el personal de operación de turbinas de vapor de las centrales termoeléctricas. Las experiencias de cálculo han proporcionado un mejor conocimiento del comportamiento térmico de una turbina en régimen transitorio; se ha mostrado claramente la influencia de las maniobras de operación sobre los esfuerzos térmicos y la importancia de las indicaciones permanentes de esfuerzos para mejorar, con mayor seguridad, la operación de las turbinas con la intención de obtener mayor flexibilidad de utilización y una extensión de la vida útil del equipo.

Referencias

Alvarez, G. y G. Urquiza (1989), *Algoritmo numérico básico para determinar la distribución de temperaturas transitorias en un rotor modelado como un cilindro hueco* (informe interno), Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE/34/2476/I/001/I).

Ballet, M., A. Lannoy y R. Montmayeul (1974), "Analyse des contraintes thermiques dans les rotors de turbines a vapeur utilization d'un pilote de démarrage pour l'amélioration des conditions d'exploitation en régime transitoire", *Revue Française de Mécanique*, núm. 52.

Blazejowski, J., B. Chorowski y J. Sasiadek (1980), *A Model to Simulate Transient Temperature Distribution and Thermal Stresses in Turbine Rotor*, Politechniki Wroclawskiej, Wroclaw.

Estrada, C., G. Alvarez y G. Urquiza (1989), *Solución analítica del problema transitorio de conducción de calor en un cilindro hueco y su comparación numérica* (informe interno), Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE/34/2476/004/I).

condiciones para simular las condiciones antes descritas de falla tanto del proceso como de la misma instrumentación. Los transmisores de flujo tienen *blocks* de válvulas para practicar la forma de llevar a cabo la salida simulando cero presión diferencial.

Conclusiones y recomendaciones

Al considerar la diversidad de operaciones que se pueden realizar con el simulador de procesos, se puede afirmar que es una herramienta muy poderosa en el área de capacitación y con ventajas muy superiores con respecto a otros medios, entre las que se pueden citar: capacitación permanente, ya que al tener el simulador junto a la planta se podrá hacer un número ilimitado de prácticas; manipulación en vivo de los instrumentos que son iguales a los reales; prueba de alternativas que pueden optimizar la operación real, repetición de la operación cuantas veces sea necesario.

Por lo anterior, se recomienda amplia-mente el uso de simuladores de proceso, tal como el descrito, en la capacitación efectiva de cualquier tipo de planta industrial.

Finalmente, no queremos dejar de mencionar que el simulador es también una importante herramienta para efectuar cursos de actualización para el personal y para capacitar a elementos de nuevo ingreso al centro productivo. La inversión que se haga por todas las razones anteriormente descritas se verá ampliamente justificada.

Agradecimientos

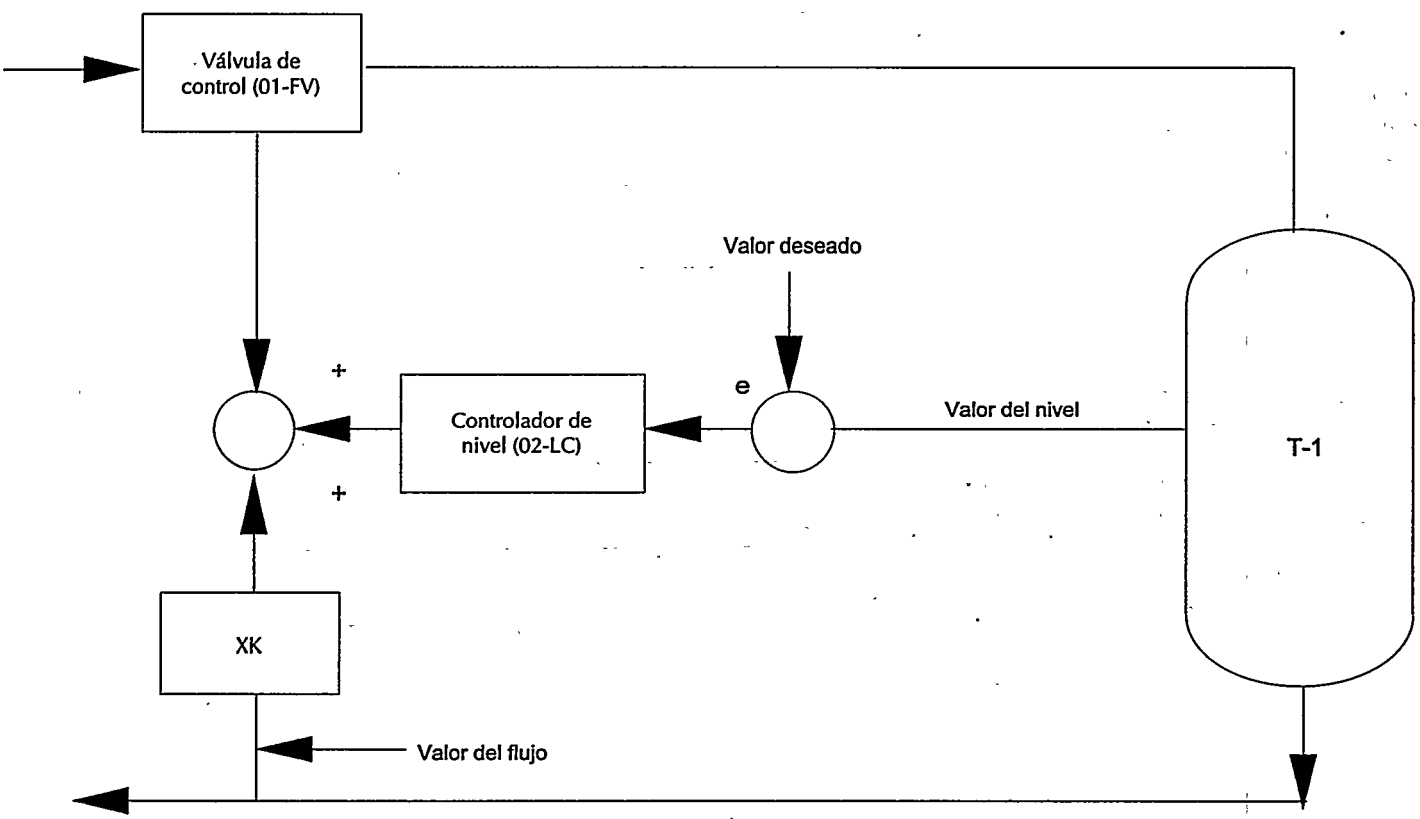
Los autores agradecen las facilidades prestadas por TEMSA para el diseño y especificación del simulador.

Bibliografía

Considine y Ross (1971). *Manual de Instrumentación Aplicada* Cía. Editorial Continental, primera edición, tomo 1, 10-3.

Perry Robert H. y Cecil H. Chilton (1973) *Chemical Engineers' Handbook*, McGraw Hill, quinta edición, cap. 22.

FIGURA 4
Diagrama de bloques para configurar el circuito de control anticipatorio con retroalimentación.



MX9800209

Degradación por efecto sinérgico en aisladores sintéticos

Anibal Garza M.
José I. Montesinos S.

- *Los aisladores sintéticos son cada vez más utilizados en las líneas de distribución y transmisión por las ventajas que tienen sobre los aisladores de porcelana y vidrio templado.*
- *La fotólisis y la termoxidación son dos de los fenómenos de degradación que se presentan en los aisladores sintéticos instalados a la intemperie.*

Resumen

Se presenta un estudio de los principales fenómenos de degradación que sufren los aisladores sintéticos y la participación simultánea de dichos fenómenos para propiciar un efecto sinérgico.

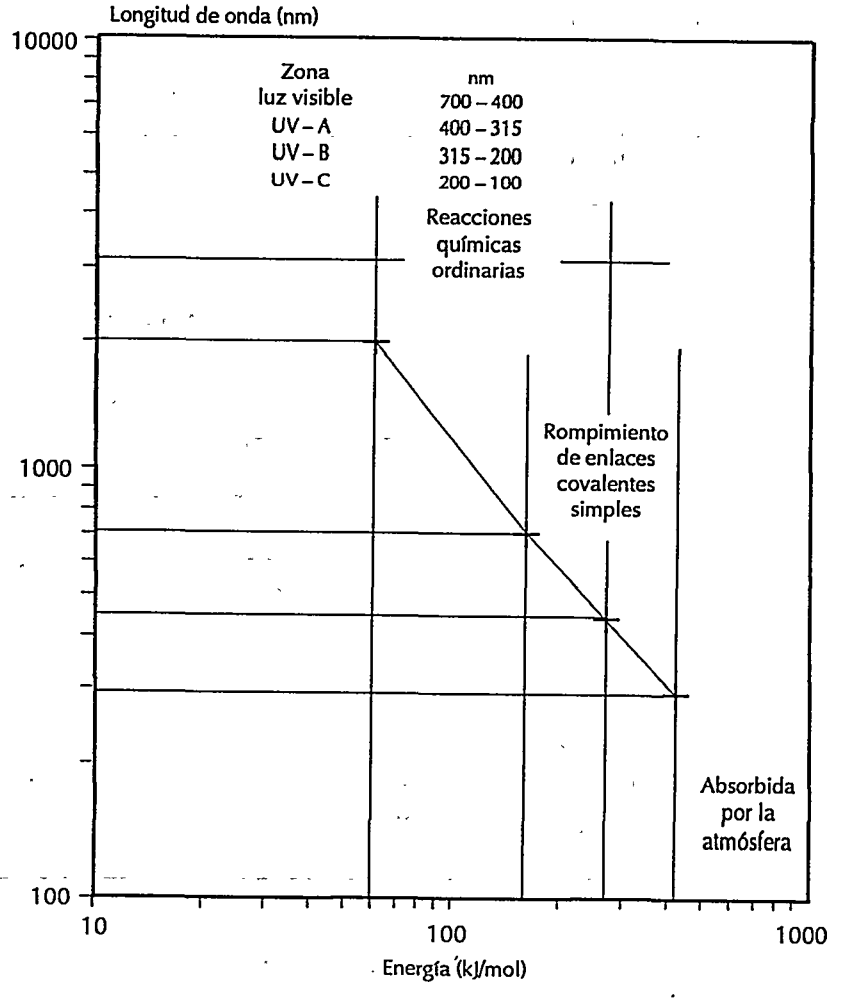
Introducción

En las líneas eléctricas de transmisión y distribución existe la tendencia a sustituir los aisladores de porcelana y de vidrio templado por aisladores sintéticos, puesto que: tienen un menor peso; toleran mejor el vandalismo; son más económicos y poseen excelentes propiedades eléctricas y mecánicas. Sin embargo, algunos agentes del medio (radiación ultravioleta, radiación infrarroja y contaminación) al actuar simultáneamente provocan con el tiempo una disminución de las propiedades físicas del aislador, lo que puede representar un riesgo de falla. En la especialidad de ingeniería eléctrica, esta acción simultánea de agentes que propician la degradación dieléctrica se conoce como efecto sinérgico.

Degradación de los aisladores sintéticos

Los aisladores sintéticos (hechos básicamente a partir de polímeros) en algunos casos se mezclan con otros materiales, como la alúmina o la arena sílica, para mejorar su resistencia al intemperismo y al arco eléctrico. Durante el procesamiento de los polímeros es usual añadir sustancias tales como las cetonas, aldehídos y peróxidos, compuestos que, por absorción de energía, pueden ser los responsables del inicio de la degradación que sufre el aislador cuando se encuentra instalado en el campo.

FIGURA 1
Longitud de onda asociada a la energía de activación de los polímeros.



Cualquier fenómeno de degradación que se presente en los aisladores sintéticos, requiere una entrada de energía (energía de activación). La manifestación de la degradación depende del tipo de energía que haya actuado. Por ejemplo, cuando la energía proviene de la luz solar, la fotólisis es el deterioro más significativo que se presenta.

Observando la figura 1, vemos que la energía requerida para romper algunos enlaces covalentes simples se encuentra entre 165 y 420 kJ/mol, correspondiéndole longitudes de onda entre 710 y 290 nm. Aun cuando gran cantidad de la radiación emitida por el sol es rechazada por la atmósfera, en especial por la capa de ozono, una parte se filtra (específicamente aquella que tiene longitudes de onda entre 300 y 400 nm), generando energía suficiente para romper algunos enlaces químicos, lo que provoca el inicio de la degradación del aislador.

Esta degradación comúnmente se manifiesta de las siguientes formas: agrietamiento, originado por el cruce de cadenas poliméricas; resquebrajamiento de la superficie, debido al corte de cadenas poliméricas y la pérdida de hidrofobicidad, propiciada por la volatilización superficial del material.

Los agentes que producen tales manifestaciones pueden actuar simultáneamente provocando, por efecto sinérgico, una aceleración del envejecimiento de los aisladores.

A continuación se presentan los fenómenos de degradación que se registran con mayor frecuencia en los aisladores instalados en el campo.

Degradación por radiación

La degradación por radiación se adopta en dos formas:

1) Fotólisis, causada por la radiación ultravioleta,
2) Radiólisis, originada principalmente por los rayos x y los rayos gamma.

La fotólisis es un proceso de baja energía que aparece cuando la radiación ultravioleta excita electrónicamente algunos grupos funcionales específicos como, por ejemplo, los carbonilos.

Durante la etapa de excitación se forman radicales de polímero que posteriormente originan un corte de cadenas poliméricas, manifestándose como un resquebrajamiento superficial del material. La pérdida de hidrofobicidad y el agrietamiento también son manifestaciones de la degradación por fotólisis.

$$RH \xrightarrow{uv} R^{\circ} + H^{\circ}$$

donde:

RH - molécula del polímero,
R° - radical del polímero,
H° - radical hidruro,
uv - radiación ultravioleta.

Aunque algunos polímeros puros no deberían absorber radiación con longitudes de onda más allá de 300 nm, en ocasiones, como se mencionó, la presencia de impurezas tales como las cetonas, aldehídos y peróxidos, son los responsables de la degradación.

La radiólisis es causada por radiación con longitud de onda extremadamente corta y por lo tanto con una gran energía. Se puede presentar en dos formas: de manera directa, cuando la radiación incide sobre el material o indirectamente, cuando se forman iones o moléculas excitadas en el gas que rodea al aislador. Esta última forma, aparece comúnmente durante el efecto corona cuando los iones del gas que se forman, se aceleran sobre el aislamiento debido a la presencia de un campo eléctrico intenso.

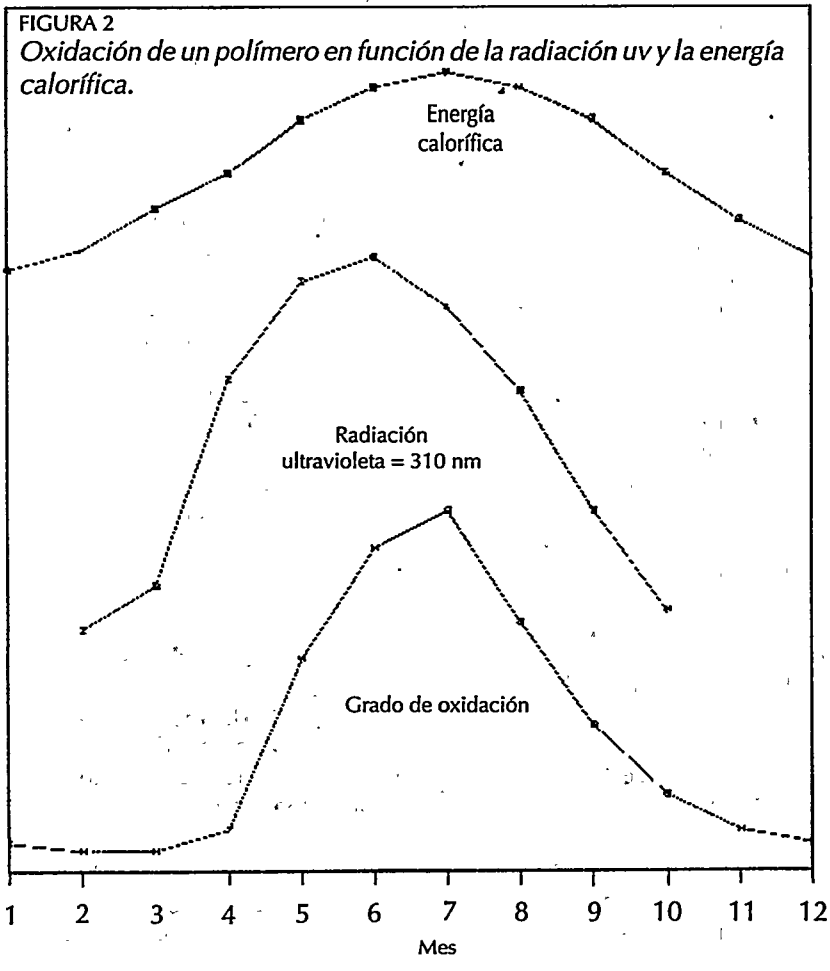
Los resultados de la radiólisis, se manifiestan a menudo como la volatilización de grandes cantidades de hidrocarbonos.

Degradación por oxidación

Al igual que en la degradación por radiación, el primer paso en la degradación por oxidación es la formación de radicales de polímero.

Los principales factores que inducen la oxidación son la radiación ultravioleta y el calor. En la figura 2, se muestra cómo se presenta una variación considerable en el grado de oxidación de un polímero en función de la cantidad de radiación

FIGURA 2
Oxidación de un polímero en función de la radiación uv y la energía calorífica.



ultravioleta y de la energía calorífica que recibe durante un año.

Si el proceso de oxidación se induce por medio de la radiación ultravioleta, el fenómeno se llama fotoxidación, en tanto que si es inducido por calor el fenómeno se llama termoxidación.

$R^\circ + O_2 \longrightarrow ROO^\circ$
$ROO^\circ + RH \longrightarrow ROOH + R^\circ$
$ROOH \xrightarrow{uv,\ ir} RO^\circ + OH^\circ$
$ROOH + RO^\circ \longrightarrow ROO^\circ + ROH$
$ROOH + HO^\circ \longrightarrow ROO^\circ + H_2O$

Donde:

O_2 - oxígeno molecular,
ROO° - radical peróxido,
ROOH - molécula de hidroperóxido,
RO° - radical alcoxilo,
OH° - radical hidroxilo,
ROH - molécula de hidroxicompuesto,
H_2O - molécula de agua,
ir - radiación infrarroja.

En ambos casos, la decoloración por ayesamiento y el resquebrajamiento por el corte de cadenas poliméricas son las manifestaciones de la oxidación.

Degradación por esfuerzos eléctricos

La degradación que se presenta en un aislador sintético por arqueo eléctrico superficial puede ser *tracking* o erosión.

El *tracking* es un camino conductor carbonizado, que se forma cuando se aplica suficiente tensión eléctrica a un aislador contaminado en un medio húmedo. Esto se debe a la evaporación irregular de la película húmeda del aislador, que produce áreas secas y con ello el arqueo superficial.

La erosión ocurre cuando la energía del arqueo eléctrico es tan grande que provoca la volatilización del material.

Degradación por contaminación ambiental

Los aisladores sintéticos son susceptibles de sufrir una degradación por la contaminación ambiental, especialmente en zonas donde hay altas concentraciones de ozono.

Es bien sabido que el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre son compuestos que generalmente contienen los gases emanados de fábricas y automóviles. Estos gases, en combinación con el aire y estando presente la radiación ultravioleta, son los causantes del incremento del ozono, el cual reacciona rápidamente a temperatura ambiental con los polímeros insaturados y con algunos saturados, aunque con menor intensidad. Este fenómeno es conocido como ozonólisis.

$SO_2 + 2O_2 \xrightarrow{uv} SO_3 + O_3$
$NO_2 + O_2 \xrightarrow{uv} NO + O_3$
$RH + O_3 \longrightarrow RO^\circ + HOO^\circ$
$RO^\circ + RH \longrightarrow ROH + R^\circ$
$R^\circ + O_2 \longrightarrow ROO^\circ$

Donde:

SO_2 - molécula de dióxido de azufre,
SO_3 - molécula de sulfito,
O_3 - molécula de ozono,
NO_2 - molécula de dióxido de nitrógeno,
NO - molécula de monóxido de nitrógeno,
HOO° - radical hidroperóxido.

La manifestación más común de la ozonólisis es el resquebrajamiento del material. El agrietamiento sólo se presenta cuando previamente se han formado radicales de polímero a partir de un fenómeno de oxidación.

Existen otros tipos de contaminación sólida (desértica, rural y marina) que son nocivos cuando el material depositado se humedece y se presentan los fenómenos de *tracking* y erosión.

Efecto sinérgico

Todos los sistemas de aislamiento eléctrico están expuestos en el campo a más de un agente degradador. La combinación de radiación infrarroja, radiación ultravioleta y tensión eléctrica está, al menos, siempre presente.

Basándonos en el análisis de los fenómenos de degradación que se presentan en los aisladores sintéticos, se ha desarrollado el esquema de la figura 3, en el que se muestra la interrelación que existe entre los agentes involucrados en el efecto sinérgico. Todos ellos provocan un cambio en el material y, como vemos, comúnmente la manifestación es la misma, aún cuando el fenómeno que la originó sea diferente. Esta es una de las principales razones por las cuales se hace difícil la evaluación de este tipo de aisladores.

En la publicación IEC 505 *Guía para la evaluación e identificación de sistemas de aislamiento eléctrico*, se señala que una prueba de validez funcional requiere la aplicación de todos los factores relevantes de influencia al objeto probado y que idealmente, los esfuerzos que actuan al mismo tiempo en el servicio, deben aplicarse simultáneamente.

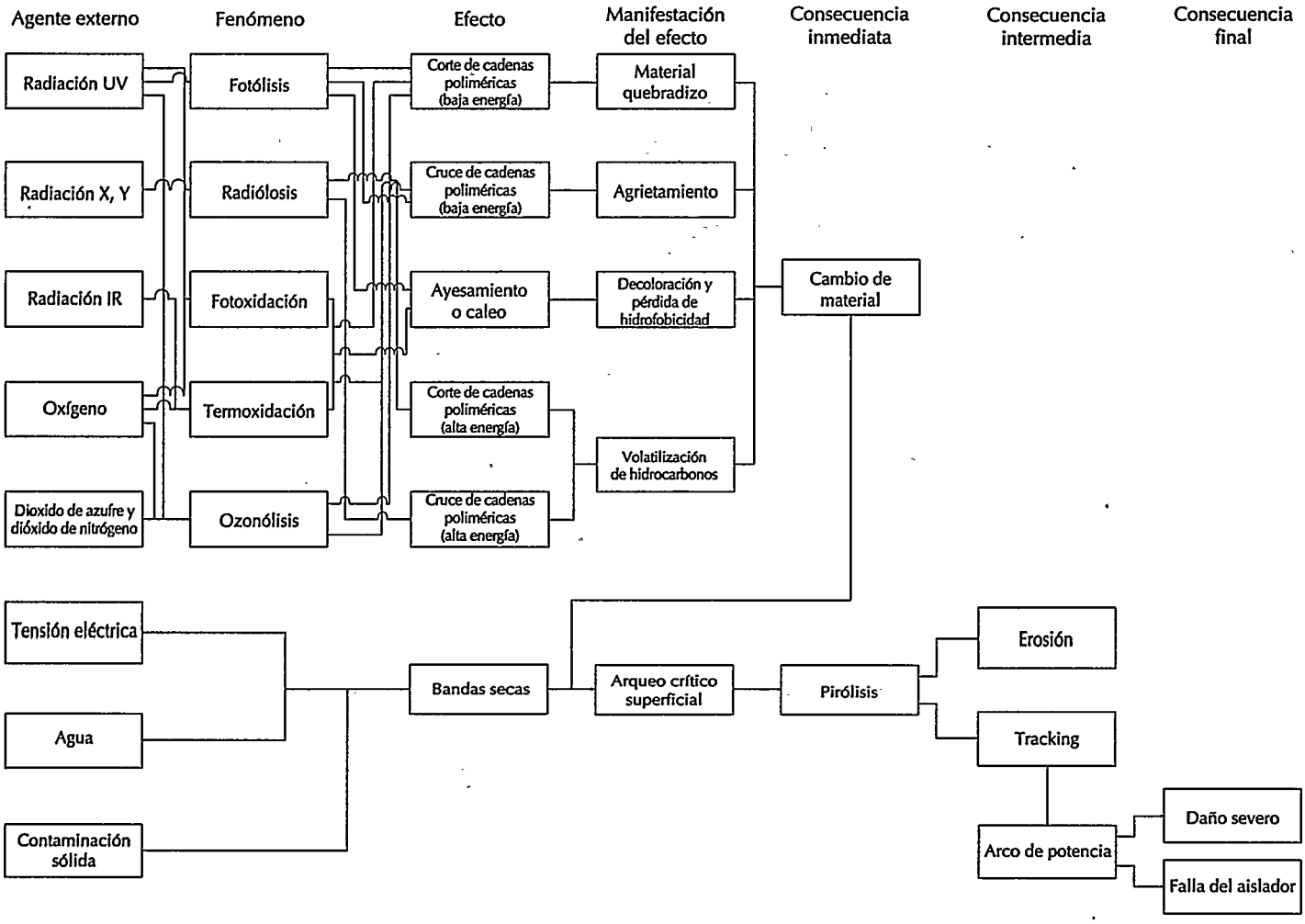
Una evaluación múltiple como la que sugiere dicha publicación es muy difícil de realizar hasta la fecha. Todavía se tiene un conocimiento relativo de la forma en que interactúan los agentes que degradan a los aisladores sintéticos y aún no se conocen los niveles de esfuerzo que provocan daños significativos en cada tipo de material que se emplea en su fabricación.

Por otra parte, tampoco se cuenta con una técnica de evaluación apropiada que permita conocer el grado de deterioro del aislador y que a su vez permita tratar de hacer un intento para pronosticar su vida en el servicio.

Las técnicas como la cromatografía, el análisis térmico diferencial, la espectrometría infrarroja, etc., muestran que efectivamente hay una degradación, pero ¿cómo saber en cuanto tiempo este estado de degradación provocará una falla del aislador?

Encontrar una técnica que resuelva la problemática planteada anteriormente, es uno de los objetivos del área de aislamientos externos del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Por esta razón, el laboratorio eléctrico del IIE inició un proyecto que entre otras cosas plantea el desarrollo de un equipo original de pruebas para continuar con esta línea de investigación. Al respecto, se concluyó el diseño preliminar de un equipo que se denominó EESA-1 (Equipo Evaluador de Sinergismo en Aisladores-1) y se encuentra en proceso de construcción.

FIGURA 3
Agentes que actúan sinérgicamente en la degradación de los aisladores sintéticos.



Conclusiones

- Los principales fenómenos de degradación que se presentan en los aisladores sintéticos cuando se utilizan a la intemperie son:

1) Fotólisis,
2) Radiólisis,
3) Termoxidación,
4) Fotoxidación,
5) *Tracking*,
6) Erosión,
7) Ozonólisis.

Estos fenómenos de degradación se interrelacionan de acuerdo al esquema que se presenta en la figura 3.

- Se presenta un efecto sinérgico con los agentes que provocan la degradación de este tipo de aisladores, siendo ésto una de las principales razones por la que se hace difícil su evaluación.
- Es necesario el desarrollo de una técnica de evaluación que permita el pronóstico preliminar de la vida útil de los aisladores instalados en el campo.

Bibliografía

American National Standard (1986), *IEEE Guide for Aging Mechanisms and Diagnostic Procedures in Evaluating Electrical Insulation Systems*, (ANSI/IEEE Std 943).

American Society for Testing and Materials (1987), *Electrical Properties of Solid Insulating Materials : Measurements Techniques*, (Engineering Dielectrics, vol. II B), (ASTM 926).

American Society for Testing and Materials (1983), *Electrical Properties of Solid Insulating Materials : Molecular Structure and Electrical Behavior*, (Engineeering Dielectrics, vol. II A), (ASTM 783).

American Society for Testing and Materials (1988), *Standard Practice for Operating Light and Water Exposure Apparatus (Fluorescent UV Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic Materials*, (ASTM G53).

American Society for Testing and Materials (1988), *Standard Practice for Operating Light Apparatus (Xenon Arc Type) with and without Water Exposure of Nonmetallic Materials*, (ASTM G26).

American Society for Testing and Materials (1986), *Standard Test Method for Rubber Deterioration - Surface Ozone Cracking in a Chamber*, (ASTM D1149).

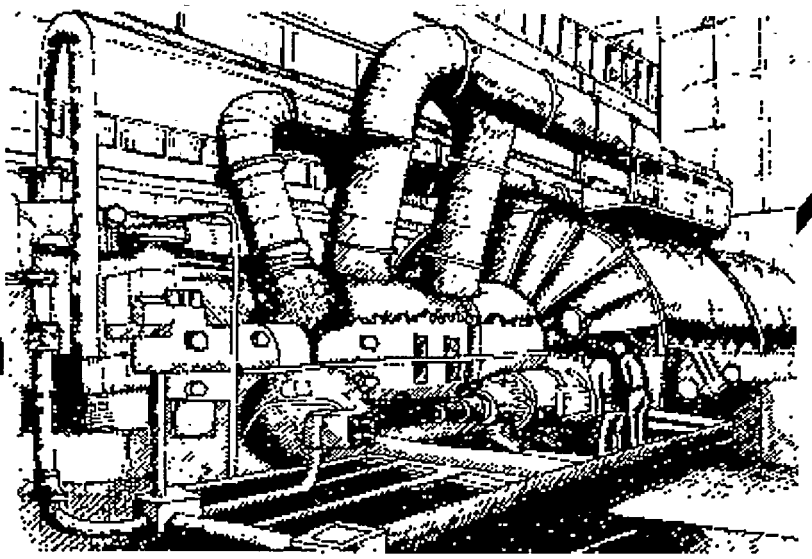
Electrical Power Research Institute (1981), *Experimental Techniques for Investigating the Degradation of Electrical Insulation*, (EPRI EL 1954).

International Electrotechnical Com-mission. IEC Report (1975), *Guide for the Evaluation and Identification of Insulating Systems of Electrical Equipment*, (publication 505).

Krevelen Dirk, W. V. (1976), *Properties of Polymers: Their Estimation and Correlation with Chemical Structure*, Elsevier Publishing.

Treatise on Materials Science and Technology (1977), *Properties of Solid Polymeric Materials*, vol. II B, Academic Press Inc.

Zbigniew D. Jastrzebski (1964), *Nature and Properties of Engineering Materials*, John Wiley and Sons Inc.



becas-tesis

licenciatura maestría doctorado

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas, con el apoyo del CONACYT y de la CFE

Egresados de:

- Ingenierías
  eléctrica
  mecánica
  electrónica
  química
  civil
  de sistemas
  en computación
- Química
- Física
- Matemáticas aplicadas
- Informática, entre otras.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

Beneficios:

- Oportunidad de iniciar una carrera de especialización en campos de la industria eléctrica, tanto del sector público como privado.
- Oportunidad de trabajar en coordinación con los investigadores y técnicos más experimentados de la industria eléctrica.
- Uso de laboratorios, talleres y equipos del IIE, asociados al programa autorizado.
- Uso de información y documentos técnicos autorizados.
- Consultas con expertos del IIE.
- Colaboración en el análisis y la solución de problemas y retos técnicos actuales del sector eléctrico.
- Beca crédito del Conacyt para el desarrollo del programa de tesis.

Requisitos:

- Ser mexicano.
- Tener menos de 27 años de edad para tesis nivel Licenciatura, de 35 para nivel Maestría y de 40 para nivel Doctorado.
- Promedio mínimo 80/100 o su equivalente en otros sistemas.
- Haber cubierto 100% de los créditos y requisitos correspondientes del plan de estudios.
- Disponibilidad de residir en Cuernavaca, Mor.; D.F.; Ciudad Hidalgo, Mich.; Mexicali, B.C.; o Salazar, Edo. de México.

Mayores informes:

Instituto de Investigaciones Eléctricas
Departamento de Relaciones con el Sector Educativo
Leibnitz 14, 3er. piso
Col. Anzures, Del. Miguel Hidalgo
11590 México, D.F.
Apartado Postal 5-620
Col. Cuauhtémoc, Del. Cuauhtémoc
06500 México, D.F.
Tel. 531-00-33

dor de base de datos DBase IV o el manejador de base de datos gráfica ABase.

En el caso de los diagramas, se podrá realizar la consulta de los mismos mediante el editor gráfico Acad.

Intercambio de información con áreas relacionadas

La información que aparece en documentos y diagramas se podrá transferir a otras bases de datos del área mecánica o eléctrica mediante el uso del manejador de base de datos DBase IV o el editor gráfico Acad.

Herramientas

Software

El SCDIC utilizará los siguientes subsistemas:

- DBase
- Autocad (ACAD)
- ABase

El subsistema DBase se usará para generar el índice de instrumentos, hojas de datos de instrumentos, memorias de cálculo y listas.

El subsistema Autocad (ACAD) se empleará para generar los diagramas.

El subsistema ABase se utilizará para efectuar la extracción de información y actualización de datos.

Asimismo, se usarán programas escritos en Autolisp y DBase para realizar las diferentes funciones del sistema computarizado de documentación en instrumentación y control.

Hardware

El SCDIC está conformado por dos microcomputadoras PC con monitor y una impresora. Asimismo, cuenta con una tablilla digital para el uso de plantillas.

Conclusiones

El SCDIC, desarrollado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) será un sistema que podrá usarlo un instrumentista con experiencia en el área.

Dicho sistema tendrá la suficiente capacidad para generar todos los documentos y diagramas requeridos en la etapa de diseño de instrumentación y control de una planta termoeléctrica, carboeléctrica o nucleoeléctrica.

Asimismo, el *software* utilizado está conformado para que tenga flexibilidad y además se pueda adaptar fácilmente a otras necesidades de documentación de plantas industriales.

En el futuro, el IIE prevé una gran demanda de dichos sistemas debido al volumen de información que actualmente manejan los Departamentos de Diseño y Operación de la Comisión Federal de Electricidad.

Referencias

ISA Standard S5.1 (1986), *Instrumentation Symbols and Identification.*

SAMA Standard PMC 22.1 (1986), *Functional Diagramming of Instrument and Control Systems.*

ISA Standard S20 (1986), *Specification Forms for Process Measurement and Control Instruments, Primary Elements and Control Valves.*

ISA Standard S5.1 (1986), *Instrumentation Symbols and Identification.*

SAMA Standard PMC 22.1 (1986), *Functional Diagraming of Intrument and Control Systems.*

bolsa de trabajo

52734
Químico industrial, 22 años, soltero, masculino, egresado de la Universidad Autónoma de Puebla (1984-1988).

Tema de tesis: "Estudio de la corrosión de aleaciones cobre-níquel en agua de mar por técnicas electroquímicas". Sin problemas de residencia, disponibilidad inmediata.

52418
Química industrial, 24 años, soltera, femenino, egresada de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (1985-1989).

Tema de tesis: "Oxidación-corrosión por depósitos de ceniza del combustóleo de aceros expuestos a alta temperatura". Sin problemas de residencia, disponibilidad inmediata.

52431
Química industrial, 24 años, casada, femenino, egresada de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (1985-1989).

Tema de tesis: "Evaluación de la materia prima y fabricación de ferritas duras a base de estroncio". Sin problemas de residencia, disponibilidad inmediata.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS
División de Información Tecnológica y Desarrollo Profesional
Departamento de Relaciones con el Sector Educativo
Interior Internado Palmira
Palmira, Temixco, Morelos
62490, México
Tel. (73) 183 811, ext. 3350 y 2094
Télex 178351 INELME

MX 9800210

Diagnóstico de bombas de agua de alimentación, condensado y circulación en centrales termoeléctricas

Carlos Colín Castellanos

- *Se presenta una metodología que permite determinar el funcionamiento de los equipos de bombeo en una central termoeléctrica.*
- *Para lograr resultados confiables con esta metodología sólo se requiere que la instrumentación de la planta está bien instalada y calibrada.*

Resumen

Este artículo comprende el análisis y el diagnóstico de comportamiento de las bombas, las cuales forman parte de los sistemas de agua de alimentación, condensado y circulación de una central termoeléctrica (CT).

Para el análisis se recopilan datos de presión, temperatura y flujo de la instrumentación instalada en campo, así como de los valores de consumo de corriente y de voltaje en los motores de dichas bombas. Posteriormente, se calcula la capacidad y la eficiencia de las bombas en operación real y se comparan con los valores de diseño, para obtener el comportamiento real del equipo con ayuda de las curvas características (Q vs ΔH, Q vs π, etcétera).

Nomenclatura

C	-	Capacidad - adimensional
Fa, b	-	Flujo de la bomba a,b - Ton/hr
F.P.	-	Factor de potencia - adimensional
I	-	Intensidad de corriente - Amperes
PE	-	Potencia eléctrica - KW
PH	-	Potencia Hidráulica - KW
Pd	-	Presión a la descarga - Kg/cm^2
Ps	-	Presion de succión - Kg/cm^2
Qr	-	Flujo real - Ton/hr
Qt	-	Flujo teórico - Ton/hr
Td	-	Temperatura a la descarga - °C
Ts	-	Temperatura a la succión - °C
V	-	Tensión - KV
n	-	Velocidad de rotación de la bomba - rpm
nd	-	Velocidad de rotación de la bomba de diseño - rpm
Ve	-	Volumen específico - m^3/Kg
Δp	-	Carga - Pa
π	-	Eficiencia - adimensional

Introducción

Los equipos de bombeo en una central termoeléctrica (de los sistemas de agua de alimentación, condensado y circulación) son fundamentales, ya que ellos tienen dos funciones primordiales que inciden directamente en la generación de la central: la transferencia de líquido de un lugar a otro y el aumento de presión con objeto de introducirlo a recipientes presurizados. Por ello, es importante revisar periódicamente el funcionamiento de las bombas para garantizar la operación eficiente de la planta a cualquier carga, sobre todo las cercanas a la nominal. La metodología que se presenta permite determinar de manera rápida y sencilla, si la bomba cumple o no con su función. Es importante mencionar que si se observa que una bomba no tiene la capacidad adecuada, es recomendable someterla a pruebas más controladas, para detectar el problema con mayor precisión.

Análisis de comportamiento de bombas

Para la evaluación del comportamiento de las bombas se toman en cuenta la capacidad y la eficiencia.

La capacidad es una medida cuantitativa del comportamiento de la bomba y se define como el cociente, en porcentaje, entre el flujo real que entrega la bomba y el flujo teórico de la curva característica con la Δp de operación. Matemáticamente se expresa como:

$$C = (Qr/Qt) \times 100 \qquad [1]$$

Dependiendo del valor calculado mediante la expresión [1] el comportamiento del equipo será:
Si $C \geq 100\%$, la bomba opera de acuerdo a su curva característica.
Si $C < 100\%$, indicará que al equipo le falta capacidad, tal vez, debido a desgaste por lo que, en este caso conviene realizar una inspección de sus partes internas para ajustar, reparar o reemplazar aquellas que muestren deterioro.

La eficiencia de la bomba se define como el cociente, en porcentaje, de la potencia hidráulica que suministra la bomba al fluido, entre la potencia mecánica que se proporciona a la bomba.

Sin embargo, la casi imposible forma de medir la potencia mecánica (comúnmente llamada potencia al freno) en campo, obliga a evaluar la eficiencia del conjunto bomba-motor que es la relación entre la potencia hidráulica y la potencia eléctrica que se le suministra al motor. La ecuación matemática se expresa como:

$$\pi = \frac{PH}{PE} \times 100 \qquad [2]$$

Se aclara que este valor no se compara directamente con la eficiencia de diseño correspondiente al flujo que entrega realmente la bomba, ya que dicho valor será afectado tanto por la eficiencia del motor como por la del variador o incrementador de velocidad en caso de que éste exista. Sin embargo, el cálculo de esta eficiencia nos da un marco de referencia para diagnosticar el estado de la bomba.

Si la eficiencia del conjunto bomba-motor es igual o muy cercana al valor de diseño, este equipo opera adecuadamente. Un valor menor indicará deterioro en alguno de los componentes del conjunto.

Para realizar el diagnóstico de las bombas en una CT es necesario recopilar datos de operación en campo; estos datos son:

- Caudal bombeado.
- Presión de succión.
- Presión a la descarga.
- Temperatura a la succión.
- Temperatura a la descarga.
- Velocidad de rotación de la bomba.
- Corriente consumida.
- Tensión de operación.
- Factor de potencia.

Como requisito primordial debe contarse con las curvas características proporcionadas por el fabricante de la bomba. Cabe aclarar, que la mayoría de los errores en la realización de las pruebas se debe a la instrumentación, razón por lo que se recomienda calibrar e instalarla en forma adecuada cada vez que se realice una prueba de esta naturaleza.

La frecuencia recomendada para la realización de las pruebas depende del equipo por analizar, siendo norma en centrales termoeléctricas que la variación de las características del equipo contra el tiempo sea lenta, por lo que se considera adecuado determinar su comportamiento en forma mensual para observar la variación del comportamiento del equipo en un año.

Procedimiento de pruebas

Una vez instrumentada la bomba, se procede a la recopilación de datos en campo, realizando en forma simultánea la toma de presiones, temperaturas, velocidad (mediante el uso de una lámpara estroboscópica) y flujo con la medición de corriente y voltaje que consume el motor de la bomba. Si ésta opera a una velocidad de rotación diferente a la de diseño, se aplicarán las leyes de afinidad de las bombas para construir las curvas características equivalentes.

Con la Δp (Pd - Ps) de operación real y con la curva de fabricante, se obtiene el flujo que debería entregar la bomba si esta fuera nueva. Comparando este valor con el que entrega realmente la bomba, se tiene un marco de referencia para diagnosticar el comportamiento de la misma, es decir, se calcula su capacidad (ecuación 1).

La potencia hidráulica de la bomba se calcula mediante la expresión:

$$PH = 2.78\ \Delta p\ Ve\ Qr \times 10^{-7} \qquad [3]$$

y la potencia eléctrica se obtiene con la ecuación:

$$PE = V\ I\ F.P.\ \sqrt{3} \qquad [4]$$

Con los valores obtenidos de las ecuaciones [3] y [4] se calcula la eficiencia del conjunto bomba-motor (ecuación 2).

En muchas ocasiones, sobre todo cuando existe más de una bomba en operación, las CT no cuentan con elementos medidores de flujo para cada una de ellas (generalmente tienen un medidor de flujo total (FT)); en estos casos, el flujo de cada bomba se evalúa por medio de la expresión que relaciona la corriente consumida por el motor de cada bomba con su flujo que entrega. Lo anterior se puede expresar como:

$$Ia \times Fb = Ib \times Fa \qquad [5]$$

$$Fa + Fb = FT \qquad [6]$$

La ecuación [5] supone que la eficiencia del conjunto es la misma para ambas bombas, esta es una buena práctica a falta de mayor información.

Finalmente, resolviendo las ecuaciones [5] y [6] obtenemos el flujo de cada bomba el cual se compara con el de diseño.

Ejemplo numérico

Los datos recopilados en la CT Mazatlán para la bomba de agua de alimentación "A" de la unidad 2 son:

Qr =	270.8	Td =	142.6
Ps =	4.9	V =	4.16
Pd =	172.5	A =	279.3
Ts =	136.0	F.P. =	0.85
n =	5 200	nd =	5 280

Las curvas características de la bomba se muestran en la figura 1, en la que se marcan los flujos con la Δp de operación real, comparando los valores real e ideal.

$\Delta p = (172.5\text{-}4.9)\ (1 \times 10^5/1.02) = 164.3 \times 10^5$

[5901 ft H_2o]

De la curva se obtiene que Qt = 1 180 GPM = 243.6 ton/hr, entonces, la capacidad de la bomba es C = 111.2 por ciento.

Por lo que respecta a la eficiencia del conjunto bomba-multiplicador-motor tenemos:

PH = 1 326.12

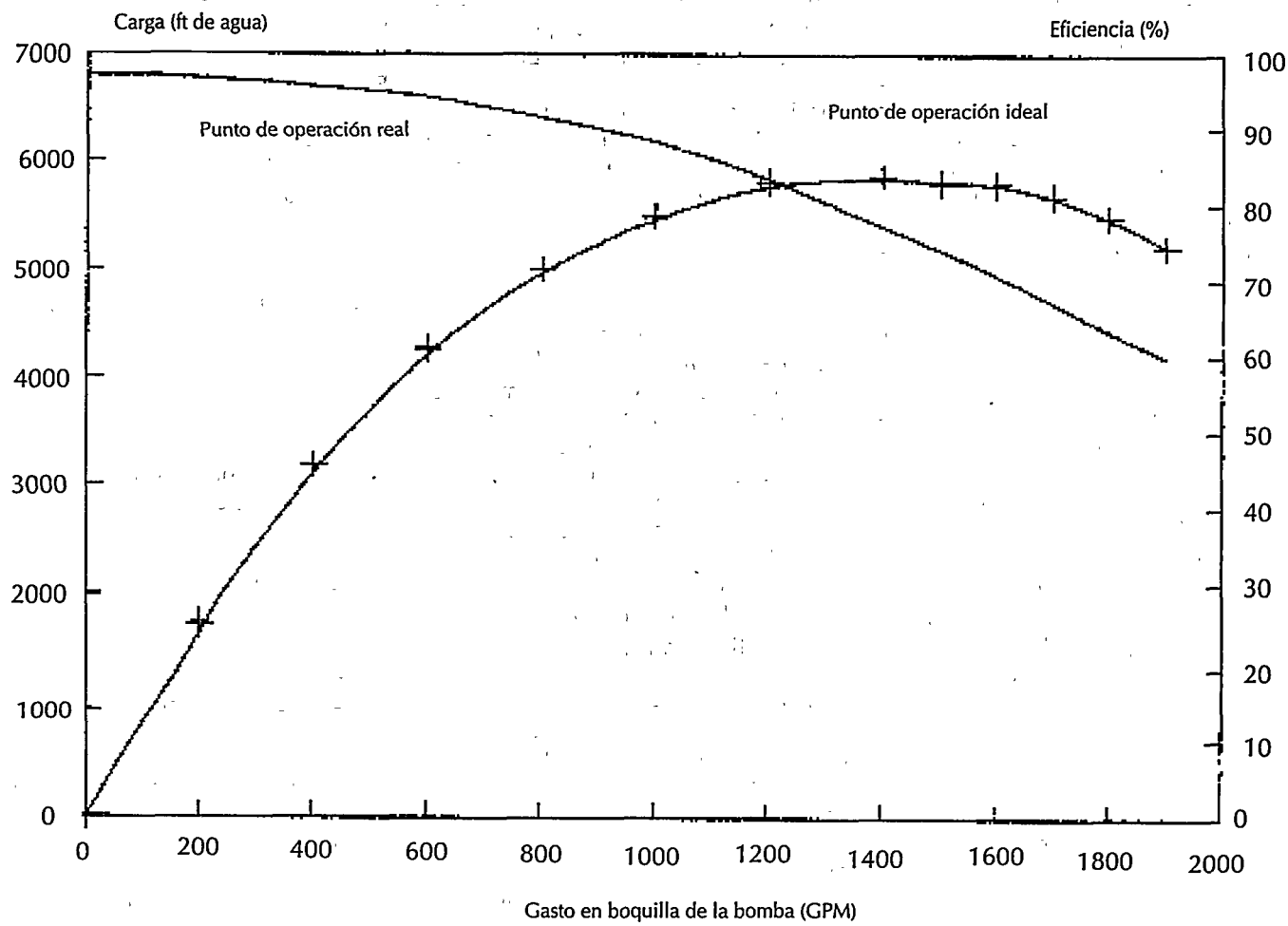
PE = 1 710.6

n = 77.5%

Conclusiones

Es importante contar con los procedimientos necesarios para la evaluación

FIGURA 1
Curva característica (carga vs gasto).



del funcionamiento de los equipos, no sólo de centrales termoeléctricas sino de cualquier tipo de planta, con el fin de mejorar la disponibilidad de los mismos.

En el caso específico de las bombas, el cálculo de la capacidad y la eficiencia proporcionan la medida del rendimiento, entendiendo este concepto como la determinación de las variables que definen el comportamiento y el estado de un equipo.

Además, si la instrumentación de la planta para la realización de estas pruebas esta bien instalada y calibrada, los resultados serán confiables. En la información obtenida en el ejemplo numérico, se observa que los valores de capacidad y eficiencia son mayores a los de diseño; por tanto, el diagnóstico de esta bomba se califica como bueno.

Las condiciones de prueba apropiadas son cruciales e incluyen una carga alta de la unidad, condiciones de operación estables y capacidad a carga máxima de la bomba. Para evitar incertidumbre es necesario aislar los flujos de recirculación y purgas o contar con instrumentos de medición de dichos flujos.

Agradecimiento

Se agradece al Departamento de Análisis Operativo, de la Gerencia de Generación y Transmisión, de la CFE, así como a las centrales Salamanca, Mazatlán y Monterrey por el apoyo brindado a las actividades de aplicación de la metodología presentada.

Referencias

Ruíz Esparza G., Rogelio, GerardoTorres T., Carlos Colín C., (1990), *Actualización de información técnica, diagnosis y recomendaciones a la problemática asociada a los sistemas de agua de circulación, condensado y alimentación de las centrales termoeléctricas. Segunda etapa.* Informes parciales del proyecto 2725, núms. 44095 (abril 1990), 44106 (junio 1990) y 44107 (julio 1990).

Gill, A. B. (1984), *Power Plant Performance,* Butterworths.

MX9800211

El combustor de lecho fluidizado IIE

Julio Milán F.

- *El combustor se construyó con el propósito de investigar el quemado de combustibles nacionales con el mínimo impacto ambiental.*
- *Es el primero de su tipo construido en Latinoamérica y ya se utilizó para investigar el quemado de carbón proveniente de Río Escondido, Coahuila.*

Resumen

Tras sintetizar los aspectos más importantes de la tecnología de combustión en lecho fluidizado, se describe el combustor experimental desarrollado en el IIE, así como los resultados de las experiencias realizadas con carbón proveniente de Río Escondido, Coahuila.

Introducción

El crecimiento de la industria eléctrica, aunado a la necesidad de preservar el medio ambiente, ha impulsado a las empresas productoras de energía a considerar diferentes opciones para cumplir con los límites de emisión de contaminantes en sus unidades de generación.

En la última década, las calderas de lecho fluidizado surgieron como una alternativa ventajosa frente a los sistemas convencionales de quemado de combustibles residuales y carbón, que requieren de lavadores de gases para operar sin exceder los límites arriba mencionados.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), ha mantenido activa una línea de investigación en lechos fluidizados desde 1981. A partir de 1989, en el marco de un proyecto conjunto con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se comenzó el diseño y la construcción de un prototipo experimental de combustor, con capacidad de hasta 0.5 MW térmicos, con el propósito de que pueda utilizarse para ensayar el quemado de combustibles propios de México con esta tecnología, así como para comprobar, con dichos combustibles, la capacidad de absorción de contaminantes de diversos aditivos locales.

El combustor desarrollado, primero en su tipo en Latinoamérica, comenzó a operar en diciembre de 1990.

Aspectos básicos de combustión en lecho fluidizado

Un combustor de lecho fluidizado está compuesto, fundamentalmente, por un recipiente cuya presión interior es cercana a la atmosférica. En la base del mismo, se encuentra un plato distribuidor a través del cual se inyecta aire, uniformemente, a toda la sección del combustor.

El aire, así distribuido en pequeños chorros, pasa a una velocidad de entre 1 y 5 m/s, a través de un lecho de partículas a temperaturas entre 700 y 1 000°C, causando fuerte agitación y manteniendo el lecho en estado fluidizado.

Las partículas, cuyo tamaño puede variar desde menos de 1 mm hasta varios centímetros, son una mezcla de material inerte, aditivo (generalmente carbonato de calcio) y pequeñas cantidades de combustible (no más de 5%). El combustible, aditivo y material inerte se alimentan al sistema en forma continua y dadas las condiciones de operación del lecho, el combustible se quema liberando calor, gases de combustión y ceniza. Dentro del lecho, el aditivo absorbe los óxidos de azufre que se forman a partir del azufre contenido en el combustible y reacciona con los óxidos de vanadio de las cenizas, lo que permite utilizar combustibles con alto contenido de azufre y vanadio sin producir estos contaminantes.

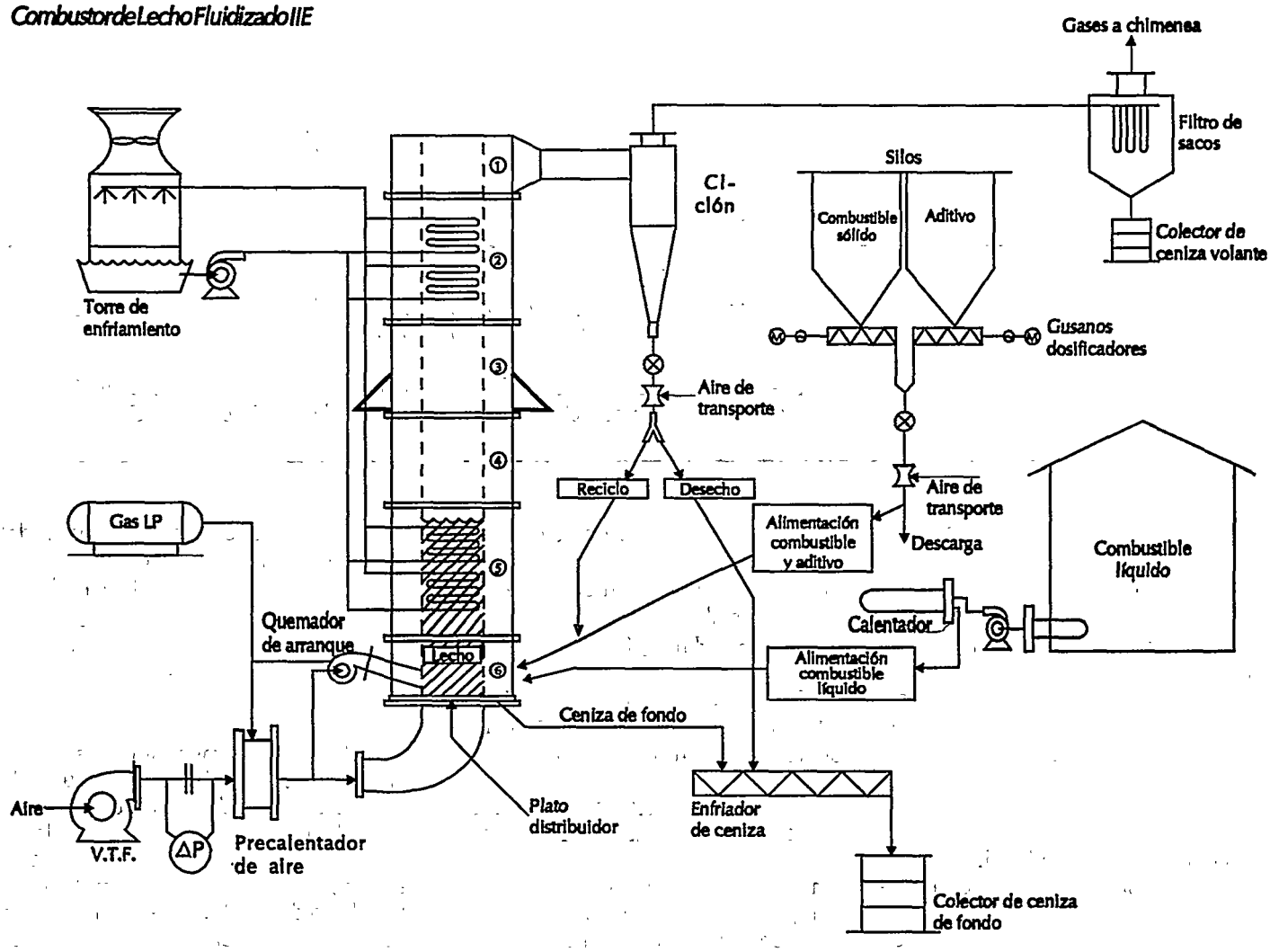
Además, las temperaturas de operación relativamente bajas, disminuyen la formación de óxidos de nitrógeno e impiden la fusión de las cenizas, y el largo tiempo de residencia del combustible en el lecho (a temperatura uniforme) posibilita el uso de combustibles con muy alto contenido de ceniza. Las anteriores constituyen las principales ventajas de este tipo de combustores, comparados con los sistemas de combustión tradicionales.

El 60% del calor liberado por el proceso de combustión, se absorbe dentro del propio lecho mediante intercambiadores de tubos inmersos en él, aprovechando la ventaja de los altos coeficientes de transferencia de calor que se obtienen (alrededor de 5 veces mayores que los correspondientes a sistemas gas - sólido). El resto se absorbe fuera del lecho en intercambiadores de convección colocados en la parte superior del combustor.

El Combustor de Lecho Fluidizado IIE

El Combustor de Lecho Fluidizado IIE es un prototipo experimental diseñado en forma modular con el objeto de cambiar

FIGURA 1
Combustor de Lecho Fluidizado IIE



CUADRO 1
Características del Combustor de Lecho Fluidizado IIE.

- Potencia térmica: 0.5 MW (t)
- Tipo: atmosférico burbujeante
- Geometría: cilíndrica
- Area del lecho: 0.1256 m^2 (d= 0.4 m)
- Altura total: 5.0 m
- Altura del lecho: 0.2 a 0.6 m
- Alimentación de combustible: 0 a 100 kg/h
- Alimentación de aditivo: 0 a 100 kg/h
- Velocidad superficial: hasta 2.5 m/s a 60°C
- Temperatura del lecho: hasta 900°C
- Plato distribuidor: toberas de orificios múltiples
- Número de toberas: 117
- Tamaño de combustible sólido: hasta 1.5 cm.
- Intercambiador inmerso en el lecho
  Tipo: tubos lisos en "U"
  Arreglo: 52 tubos de 3/4 de pulgada de diámetro en 2 bancos de 26 tubos c/u
  Area: 1.14 m^2
- Intercambiador de convección
  Tipo: tubos aletados en "U"
  Arreglo: 104 tubos de 3/4 de pulgada de diámetro con 4 aletas/pulgada, h=1/2 pulgada en 4 bancos de 26 tubos c/u
  Area: 2.9 m^2

su configuración para adaptarlo al ensayo de diversos combustibles (véase la figura 1 y el cuadro 1).

Consta de una cámara vertical cilíndrica de acero al carbón, revestida interiormente de material refractario, de 0.4 m de diámetro interior, formada por ocho módulos desmontables e intercambiables, acoplados mediante bridas. Esto permite modificar la longitud del combustor, aumentar o disminuir el espacio por encima del lecho, cambiar fácilmente el plato distribuidor o la caja de aire, agregar, quitar, o cambiar de lugar intercambiadores de calor, etcétera.

Posee un precalentador de aire, para operar ocasionalmente al combustor con aire caliente y un quemador de arranque alimentados con gas LP. Para controlar la temperatura del lecho, cuenta con dos

intercambiadores de calor de convección de tubos aletados, ubicados en el módulo superior. El combustible sólido y el aditivo se almacenan en silos, se dosifican mediante tornillos de velocidad variable y juntos son conducidos al combustor mediante transporte neumático. La alimentación puede ser por encima o por debajo del nivel del lecho. Para ensayos con combustibles líquidos, se dispone de un tanque de almacenamiento y el correspondiente sistema de bombeo, calentamiento y dosificación.

Los finos arrastrados son retenidos por un ciclón y recirculados total o parcialmente al lecho mediante transporte neumático.

La ceniza de fondo se descarga a través de una válvula de cuchilla y, después de enfriada, se almacena en barriles metálicos.

El combustor incluye varias mirillas para observar el comportamiento del lecho, así como numerosas penetraciones a través de las paredes para medir presiones y temperaturas y obtener muestras de gases y de sólidos.

Tanto en la zona correspondiente al lecho propiamente dicho, como en el espacio por encima del mismo, se han colocado puertos para insertar tubos testigo, para ensayos de corrosión y erosión.

La instrumentación del combustor incluye elementos de medición de flujos, de temperaturas y de presiones, así como equipos para el muestreo y análisis continuo de los gases de combustión.

Ensayos de fluidización

Con el objeto de establecer las características de fluidización del lecho, se determinó la caída de presión en el mismo, con diferentes velocidades del aire y diferentes alturas estáticas iniciales.

Como material del lecho se utilizó mármol molido (99.7% de carbonato de

contextos

Desarrollo en México de la tecnología de lechos fluidizados

*Entrevista con el ingeniero Alberto Ramos Elorduy, jefe de la Disciplina de Ingeniería Mecánica Básica, del Departamento Mecánico, de la Coordinación de Proyectos Termoeléctricos, de la Comisión Federal de Electricidad.**

La Disciplina de Ingeniería Mecánica Básica, tiene como funciones principales la elaboración de los criterios de diseño de ingeniería básica de las centrales termoeléctricas; el análisis y estudio de las tecnologías más recientes en el mercado que sean susceptibles de implantarse en este tipo de centrales; la especificación de la ingeniería preliminar de las centrales termoeléctricas y –conjuntamente con la Gerencia de Estudios, de la Subdirección de Programación de la CFE– la definición y selección de las tecnologías más apropiadas para cada proyecto termoeléctrico en particular.

En 1989, dentro de las actividades de esta Disciplina, se inició un proyecto conjunto con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para desarrollar en nuestro país la tecnología de lechos fluidizados, la cual surgió en la última década como una alternativa frente a los sistemas convencionales de quemado de combustibles residuales y carbón.

Acerca de este proyecto, habla en entrevista para el *Boletín IIE* el ingeniero Alberto Ramos Elorduy, jefe de la Disciplina de Ingeniería Mecánica Básica.

ALBERTO RAMOS ELORDUY

Ingeniero mecánico electricista, egresado de la Facultad de Ingeniería, de la UNAM. Actualmente, realiza estudios de la maestría en administración, en la Escuela Superior de Contabilidad y Administración, del IPN. Después de trabajar en varias compañías privadas, en 1978 ingresó a la CFE donde laboró en diversas áreas de ingeniería de proyecto. En 1981, fue nombrado jefe de la Disciplina de Ingeniería Mecánica, cargo que ocupa hasta la fecha. Asimismo, dentro de la CFE, ha coordinado varios grupos, entre ellos el de intercambiadores de calor, dentro del área de sustitución de importaciones. Es miembro del grupo de especialistas en generadores de vapor, de la propia Comisión.

* Entrevista realizada por la licenciada Ma. Alejandra Elvira Sandoval, investigadora del Departamento de Difusión Tecnológica.

calcio) con la granulometría que se indica en el cuadro 2.

El material se escogió considerando su futura utilización en las pruebas de combustión.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 2, en la que se aprecia que la velocidad mínima de fluidización es de alrededor de 0.5 m/s. Para velocidades mayores que ésta, se forma un lecho fluidizado burbujeante, con caída de presión prácticamente constante e independiente de la velocidad.

Ensayos de combustión con carbón de Río Escondido

Los primeros ensayos de combustión en el Combustor de Lecho Fluidizado IIE se realizaron en mayo de 1991, previamente clasificado por tamaños (A y B) determinados mediante tamices (véase el cuadro 3), utilizando carbón de Río Escondido.

Como material del lecho se utilizó el mismo mármol molido usado en las pruebas de fluidización. El ensayo comprendió dos series de 24 pruebas cada una. La serie 1 se realizó con carbón A y la serie 2, con carbón B. Para cada prueba se fijaron diferentes condiciones de altura y temperaturas del lecho, velocidad de fluidización, recirculación y uso de aditivo.

Se midieron las temperaturas del lecho en la superficie del mismo y a la salida del combustor, los flujos de aire, carbón y aditivo, la caída de presión en el lecho y en el plato distribuidor, el flujo y la composición de las cenizas arrastradas por los gases y capturadas por el ciclón, y la composición de los gases de combustión (O_2, CO y SO_2).

Con los resultados obtenidos se efectuó un análisis gráfico para definir tendencias y conocer los parámetros de operación que afectaron el comportamiento del combustor, especialmente en lo relativo a la temperatura del lecho, emisiones (CO, SO_2) y eficiencia de la combustión.

En la figura 3 se presentan los valores de CO y O_2 medidos durante todas las pruebas, así como la curva que corres-

CUADRO 2
Granulometría del mármol molido.

# malla	abertura mm	peso retenido g	% retenido	% pasado
5	4.00	5.4	1.08	98.92
10	2.00	305.6	61.35	37.57
18	1.00	127.3	25.55	12.02
20	0.84	56.7	11.38	0.64
charola	----------	3.1	0.64	----------
total		498.1	(peso de la muestra 500 g)	

FIGURA 2
Caída de presión en el lecho

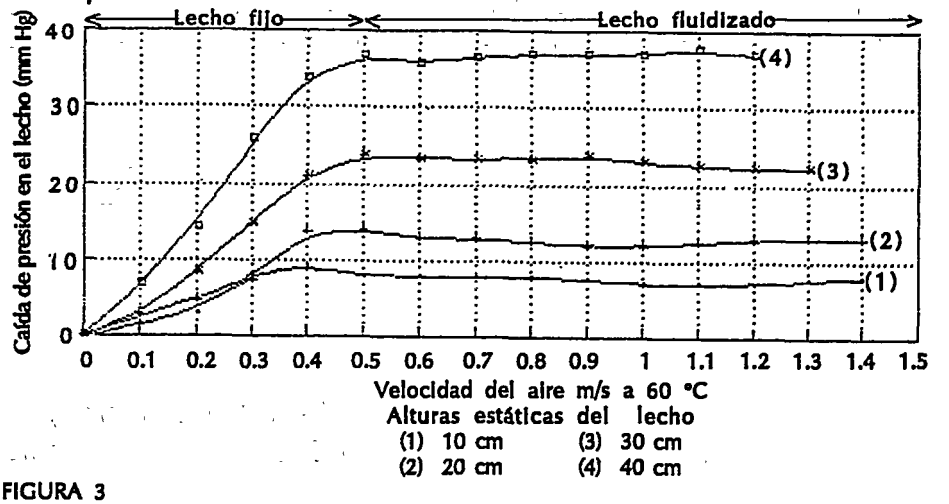
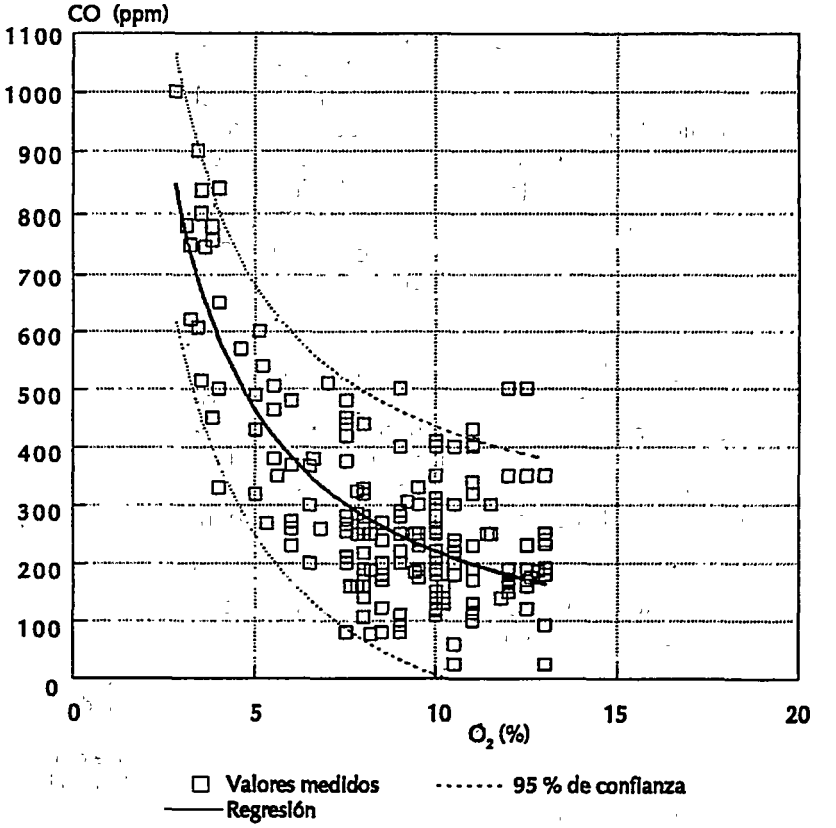


FIGURA 3
Valores de CO y O_2



contextos

¿Cómo surgió el interés de la CFE por la tecnología de lechos fluidizados?

Gran parte de la energía eléctrica que genera la CFE se basa en el combustóleo mexicano que, como sabemos, tiene un alto contenido de metales que pueden provocar una corrosión acelerada o deterioro de los generadores de vapor, tanto en la parte de alta como de baja temperatura del equipo. Para manejar eficientemente el combustóleo, mejorar la disponibilidad de las centrales y disminuir al máximo sus emisiones contaminantes, la CFE ha trabajado constantemente en la implantación de nuevas tecnologías.

Partiendo de estas consideraciones, desde 1987 se inició el análisis de diversos métodos como el de gasificación en el proceso de quemado del combustóleo y carbón, y con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) se lleva a cabo un proyecto para manejar los asfaltenos del combustóleo a través de lecho fluidizado, lo que finalmente condujo a trabajar con el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

¿En qué estado de avance se encuentra la tecnología de lechos fluidizados en el mundo?

Esta tecnología se ha estudiado en varios países en forma simultánea, con base en la utilización de carbón. Existen centrales de generación, de 150 MW aproximadamente, que utilizan lechos fluidizados.

Actualmente, los lechos fluidizados se encuentran en una segunda generación. En la década pasada, se pensaba su aplicación únicamente para centrales convencionales y ahora los diseños, por lo menos en teoría, consideran aplicaciones en centrales de ciclo combinado. En fin, las posibilidades de esta tecnología avanzan constantemente.

En Estados Unidos, por ejemplo, existen varios contratos para la adquisición de esta tecnología por parte de empresas generadoras de energía eléctrica y en otros sectores industriales como el del cemento ya hay algunas centrales de alrededor de 100 MW, con base en la utilización de carbón, operando con lechos fluidizados. En resumen, en este nivel de carga la tecnología ya está dominada plenamente.

¿Es conveniente desarrollar esta tecnología en nuestro país?

En estos momentos, en todas las áreas no solamente en lo que se refiere a la tecnología, el mundo atraviesa por una etapa de integración; sin embargo, la integración no debe significar dependencia.

La tecnología es una de las áreas en las que el país ha sido altamente dependiente, por diferentes razones. Simplemente, porque puede parecer una solución fácil comprar la tecnología, pero esta situación, a la larga, trae consecuencias debido a que no se conocen los procesos que se desean manejar o resolver.

Particularmente, la tecnología de lechos fluidizados no estaba tan desarrollada en la década pasada. Por ello, en la CFE se consideró la oportunidad de participar en su desarrollo, no con el propósito de ser plenamente autosuficientes, sino para comprenderla mejor; adaptarla a las condiciones del país (en este caso del tipo de combustóleo que se utiliza en México); especificar los equipos con un fuerte conocimiento de causa, y utilizarla en nuestros procedimientos de operación. Es muy diferente comprar una tecnología y seguir "instrucciones", a desarrollarla desde sus conceptos básicos de investigación, conocer el proceso de combustión, sus características, como actúa el combustóleo nacional en un lecho fluidizado, etcétera.

¿Cuál es el objetivo específico de la CFE en relación con este proyecto?

El objetivo específico de la CFE, es analizar la tecnología de lecho fluidizado con base en el quemado de combustóleo, ya que a nivel mundial este proceso sólo está desarrollado para la utilización de carbón. Si bien dentro de la investigación mundial, no se considera un problema el quemado del combustóleo a partir de este proceso, la experiencia ha demostrado que, por sus características, el combustóleo nacional presenta diferencias muy importantes, inclusive en los generadores de vapor convencionales, sobre todo en lo que se refiere a la rapidez de combustión y a la longitud de la flama, por ejemplo.

¿Cómo se integraron la CFE y el IIE para el desarrollo de este proyecto?

La idea que se concibió, consistió en desarrollar un proyecto de largo alcance dividido en varias etapas y, como ya se mencionó, con un objetivo muy preciso: conocer a fondo el proceso de combustión de lechos fluidizados, utilizando diferentes tipos de combustibles como carbón, asfaltenos y principalmente el combustóleo mexicano; conocer sus características, los fenómenos que se presentan en el proceso de dosificación de aditivos, y las emisiones contaminantes de cada uno de los combustibles.

El desarrollo y la construcción del modelo, primera etapa del proyecto, ya se concluyó. Ahora, estamos en la etapa de puesta en servicio para aprender a manejarlo, ya que esta experiencia es nueva, tanto para el personal de la CFE como del IIE. El prototipo ya se encuentra en operación y se pudo controlar la combustión, principalmente con carbón, para tener una referencia con las experiencias que se han tenido en lechos fluidizados en el resto del mundo. En este proceso, se experimentó con variaciones en la dosificación de piedra caliza y se midió el tipo de emisiones para retención de azufre.

Próximamente, se iniciarán las pruebas con otros combustibles y principalmente con el combustóleo mexicano.

ponde a una regresión exponencial de los mismos y los límites de 95% de confianza (en líneas punteadas).

Eficiencia de la combustión

En la figura 4 se presentan las eficiencias de combustión obtenidas con carbón B. Aunque estos valores son relativamente bajos, en ambas curvas se aprecia la influencia de la temperatura del lecho: a mayor temperatura, mayor eficiencia. Además, los valores se separan en dos grupos, dependiendo si la prueba se realizó con o sin recirculación, obteniéndose eficiencias consistentemente mayores para el primer caso.

En la figura 5 (eficiencia de combustión en función de la recirculación) se aprecian dos aspectos: la eficiencia crece con la recirculación, y los valores para el carbón B se ubican por encima de los correspondientes al carbón A. De allí se infiere que a mayor tamaño promedio del carbón hay mayor eficiencia (dentro de los límites ensayados).

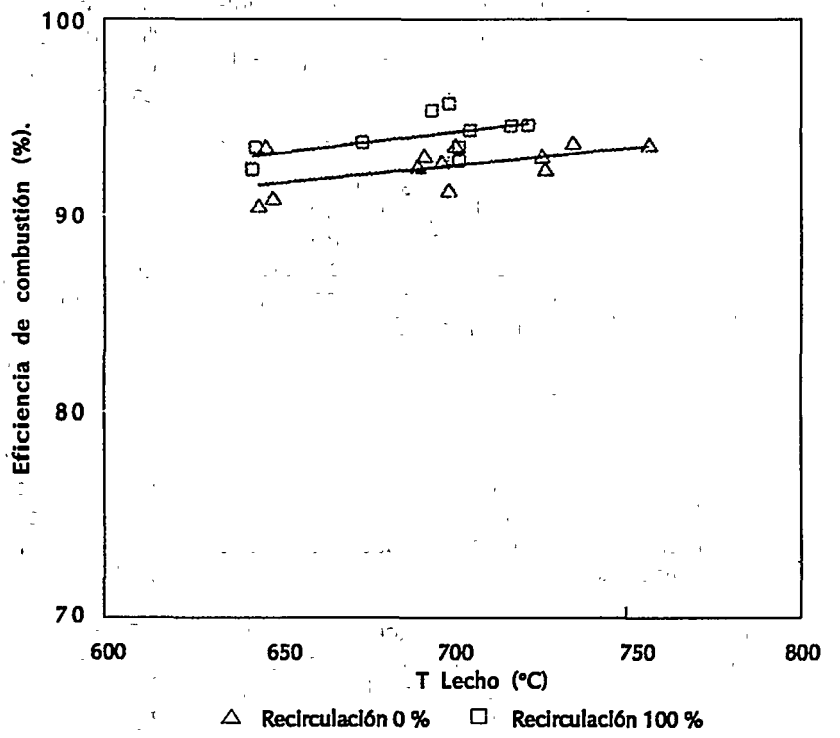
Formación y absorción de bióxido de azufre

Durante el proceso de combustión, prácticamente todo el azufre del combustible se transforma en SO_2. En el caso particular del lecho fluidizado, parte de éste es

CUADRO 3
Análisis del carbón utilizado

Propiedad	Carbón A	Carbón B
Granulometría	< 5 mm	> 5 mm y < 10 mm
Humedad %	2.91	3.79
Ceniza %	39.03	44.04
Carbón fijo %	30.86	28.66
Volátiles %	29.39	26.52
Azufre %	0.72	0.78
Poder calorífico Kcal/Kg	4344	4339

FIGURA 4
Eficiencia de la combustión en función de la temperatura del lecho; carbon B.



¿Qué es un lecho fluidizado?

Imaginemos un recipiente que contiene arena descansando sobre una malla. Al soplar aire lentamente desde abajo, éste pasará a través de los granos de arena casi sin moverlos. Si la velocidad de la corriente de aire se incrementa gradualmente, llegará un momento en que las partículas quedan suspendidas en el aire. A esta velocidad se le llama "velocidad mínima de fluidización" (Vmf). A velocidades mayores, el lecho se vuelve turbulento, apareciendo burbujas similares a las de un líquido en ebullición. En estas condiciones, el lecho se considera "fluidizado", ya que posee tanto la apariencia como también varias propiedades similares a las de los líquidos.

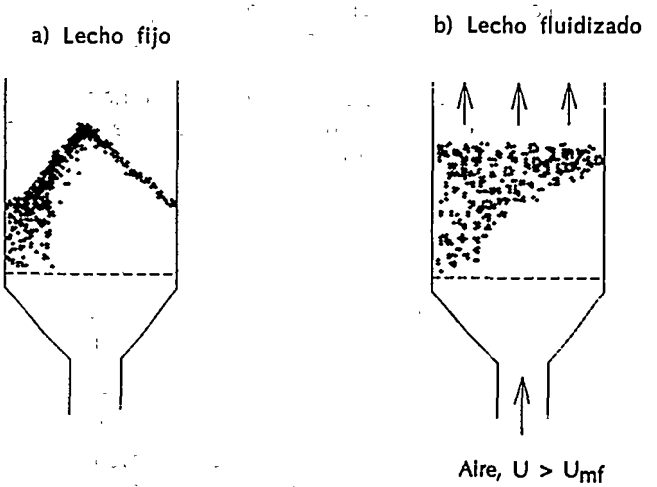
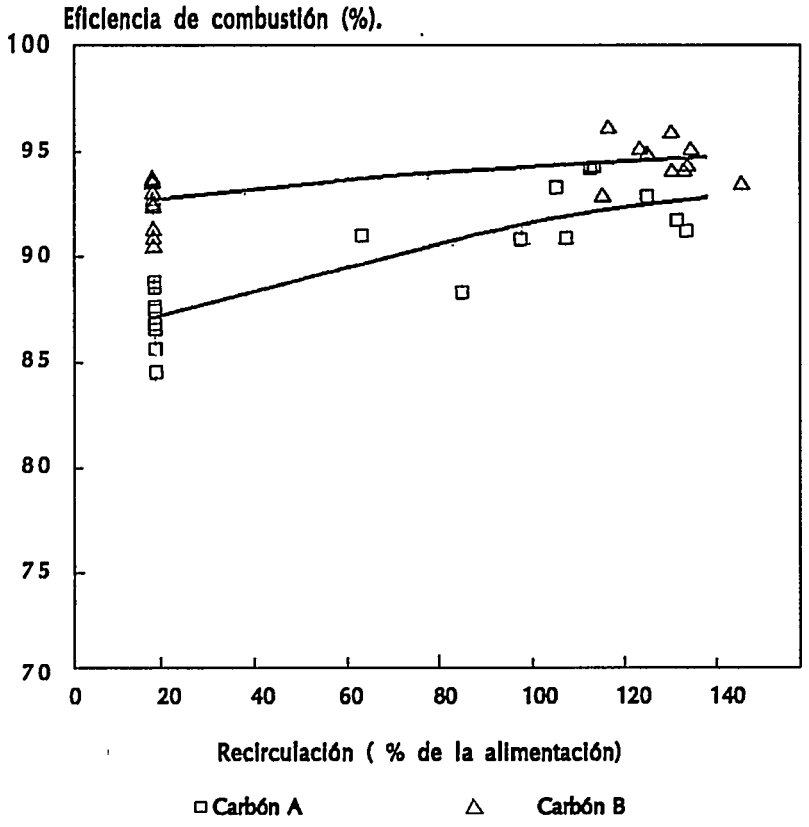


FIGURA 5
Eficiencia de la combustión en función de la recirculación.



retenido por el lecho. La concentración de SO_2 en los gases de combustión dependerá entonces del contenido de azufre del combustible, de la fracción retenida en el lecho y del exceso del aire, el que actuará como diluyente.

Con el objeto de hacer comparables los valores de SO_2 medidos con diferentes excesos de aire, es necesario corregirlos refiriéndolos a un exceso de aire constante, usualmente 6% de oxígeno en los gases de combustión. La expresión para la corrección, que se deriva de consideraciones estequiométricas, es:

$$[SO_2] @ 6\% O_2 = 0.655 \left[\frac{1 + \% O_2}{17.35 - \% O_2} \right] [SO_2] @ \% O_2$$

La absorción de bióxido de azufre en el lecho y, por lo tanto, la correspondiente disminución en sus emisiones resultó afectada por la temperatura del lecho, el agregado o no de aditivo y la recirculación.

contextos

¿Qué aplicaciones tiene la tecnología de lechos fluidizados?

La CFE –también con la colaboración del Instituto– apoya al Departamento del Distrito Federal (DDF) en un estudio muy interesante para determinar un mayor aprovechamiento de la basura. Una de las posibilidades es construir pequeñas centrales generadoras que quemarían este material a través de lechos fluidizados. La idea para la aplicación de dicha tecnología, es poder controlar el quemado de la basura y reducir con ello la emisión de contaminantes. Básicamente, la realización de este proyecto ayudaría a reducir los niveles de contaminación en la ciudad de México, originados por la quema de la basura.

Además, la posibilidad de utilizar los tiraderos de basura que existen en el DF para generar energía eléctrica, evitaría incrementar el tamaño de los mismos. En concreto, se estudia cómo es el manejo de la basura durante la combustión en lechos fluidizados y qué cantidades de emisiones contaminantes se presentan para poder hacer la ingeniería de estas pequeñas centrales con precisión.

Ahora bien, en lo que se refiere a las perspectivas de la CFE en relación a esta tecnología, vale la pena aclarar que cuando una central termoeléctrica agota su vida útil, se tienen dos opciones: retirarla de operación o aprovechar la infraestructura existente para renovar la central y extender su vida por unos quince años o más. En este sentido, es como se aplicaría dentro de la Comisión la tecnología de lechos fluidizados en la actualidad.

Para el futuro, la CFE considera la posibilidad de implantar, una vez dominada, la tecnología de lechos fluidizados y dar oportunidad, también, para que evolucione en el ámbito internacional.

Dentro del proyecto normalizado de la CFE, las centrales termoeléctricas incorporan tecnología muy avanzada lo que las hace muy eficientes y su capacidad está en una gama que todavía no alcanzan las de lecho fluidizado. Es decir, con esta tecnología sólo se han instalado centrales de 160 MW máximo y la CFE va a crecer con plantas de 350 MW o más.

Sin embargo, es posible que más adelante –cuando la tecnología de lechos fluidizados esté comercializada en el mundo para instalar centrales de gran capacidad de cualquier tipo– la experiencia permita garantizar un grado de confiabilidad aceptable para implantarla en nuestro país.

Propiedades de los lechos fluidizados

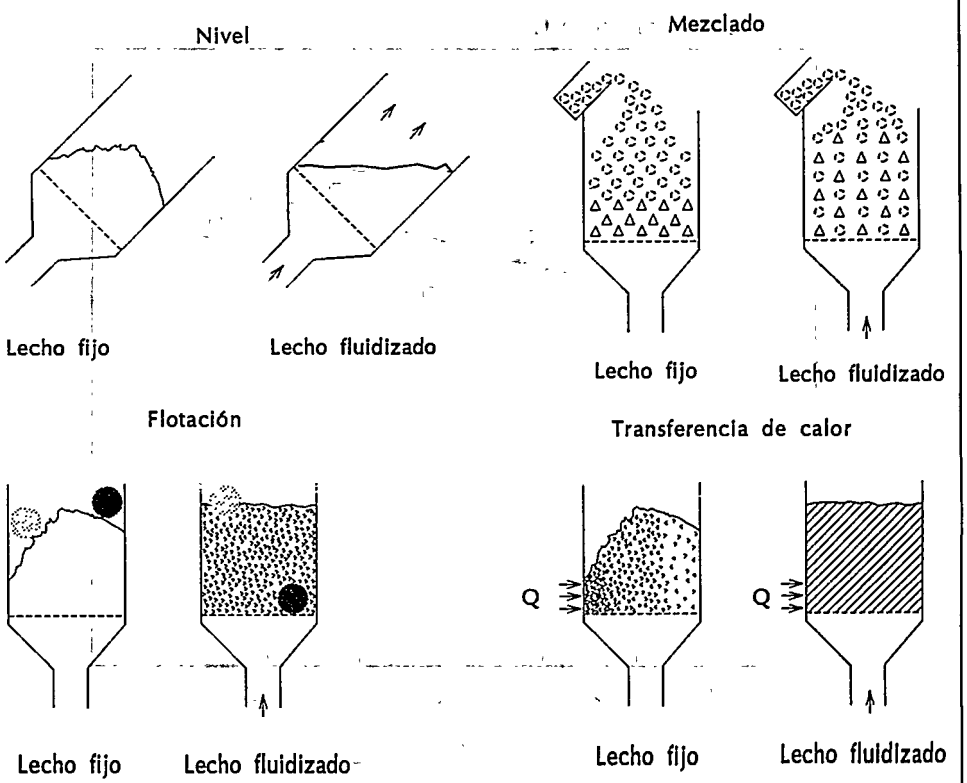
Un lecho fluidizado se comporta en muchos aspectos como si fuera un líquido. Por ejemplo:

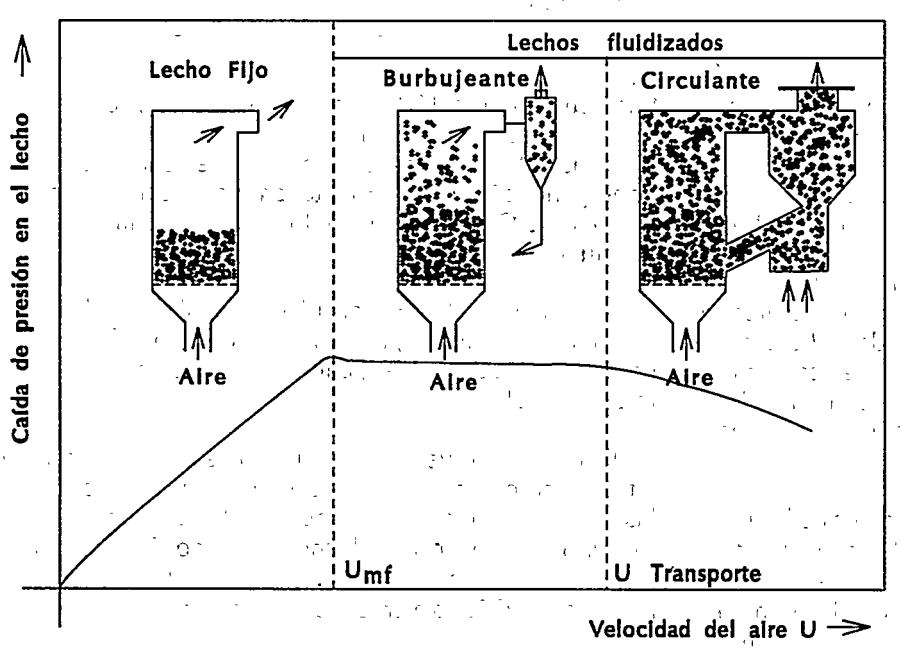
a) Mantiene a nivel su superficie cuando se le inclina.

b) Las partículas del mismo están en constante agitación; por ello, cualquier agregado se mezcla y distribuye rápidamente.

c) Como en un líquido, los objetos flotan en él o se hunden según sea su densidad menor o mayor que la del lecho.

d) Debido a la fuerte agitación de sus partículas, el calor se transfiere rápidamente y la temperatura del lecho es prácticamente constante.

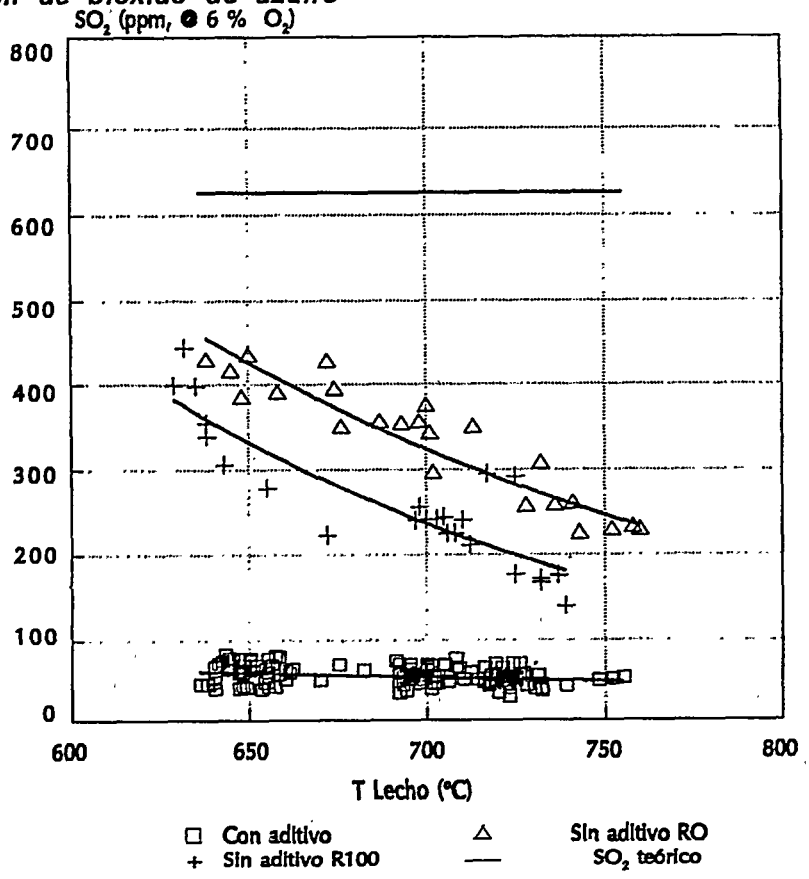




Tipos de lechos y caídas de presión

A medida que la velocidad del aire se incrementa, el lecho –originalmente fijo y en reposo–, se fluidiza y burbujea como un líquido en ebullición. A velocidades mayores, las burbujas desaparecen y los sólidos comienzan a ser arrastrados, debiendo recircularlos para mantener la altura del lecho. La caída de presión a través del lecho alcanza un valor máximo cuando la velocidad del aire se iguala a la Vmf: en ese instante las partículas están totalmente suspendidas en el aire y la caída de presión en el lecho es igual a su peso entre su área.

FIGURA 6
Emisión de bióxido de azufre



En la figura 6 se presentan las relaciones entre la concentración de SO_2 medida (con corrección de 6% de O_2) y la temperatura del lecho, distinguiéndose cuatro curvas: la primera, en la parte superior, representa la emisión teórica de SO_2 que correspondería al total del azufre contenido en el carbón; la segunda curva (triángulos) representa la emisión de SO_2 sin aditivo obtenida en las pruebas 2-13 a 2-24, en las que el material del lecho estaba formado por la propia ceniza del carbón. Como se aprecia, la ceniza del carbón utilizado posee cierta capacidad para absorber SO_2.

La tercera curva (en orden descendente) corresponde a pruebas también sin aditivo, pero recirculando al lecho la ceniza capturada por el ciclón. En este caso, el efecto de absorción por parte de la ceniza es aún más marcado.

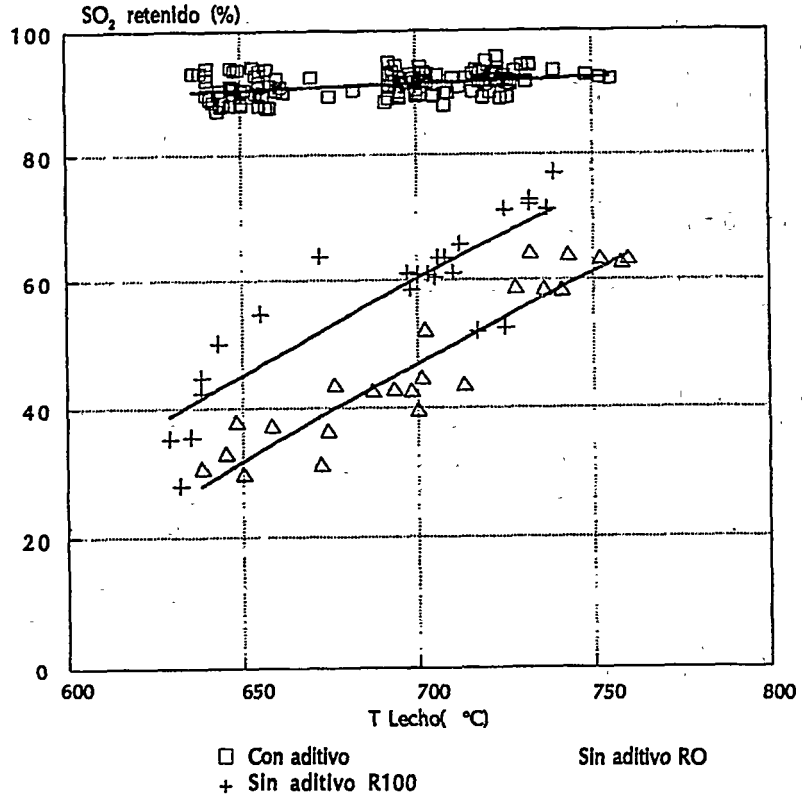
Las dos curvas correspondientes a las pruebas sin aditivo muestran una fuerte disminución en el nivel de emisiones de SO_2 a medida que aumenta la temperatura del lecho.

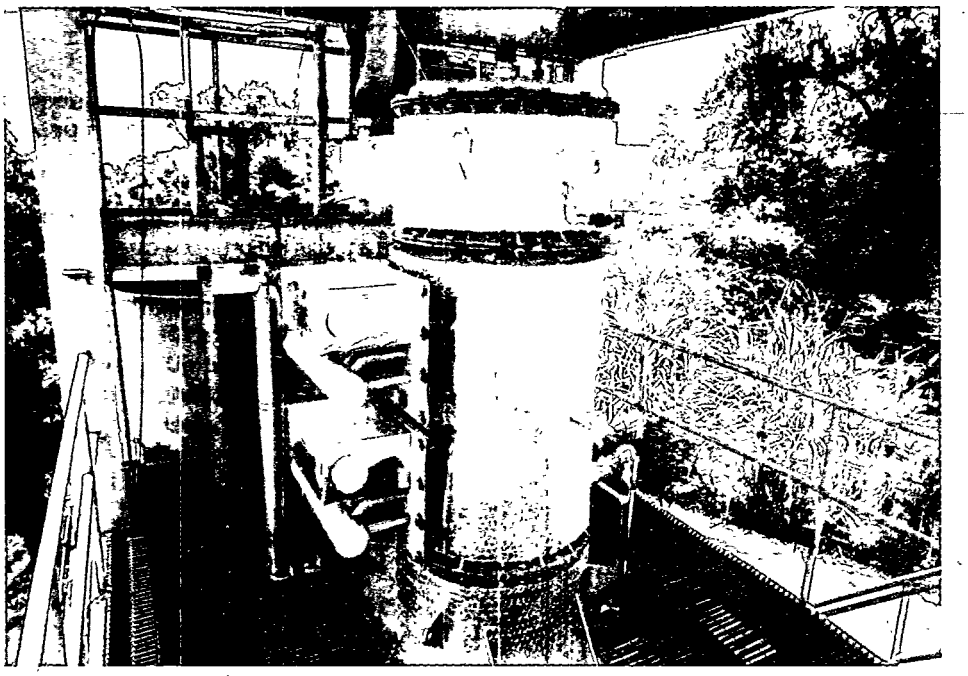
La curva inferior, por último, corresponde a todas las pruebas que se realizaron con aditivo, tanto con carbón A como con B, con y sin recirculación. En este caso la concentración de SO_2 en los gases es del orden de 60 ppm, con una leve tendencia a disminuir cuando aumenta la temperatura del lecho.

En la figura 7 se presentan los valores calculados de la fracción de SO_2 retenida por el lecho.

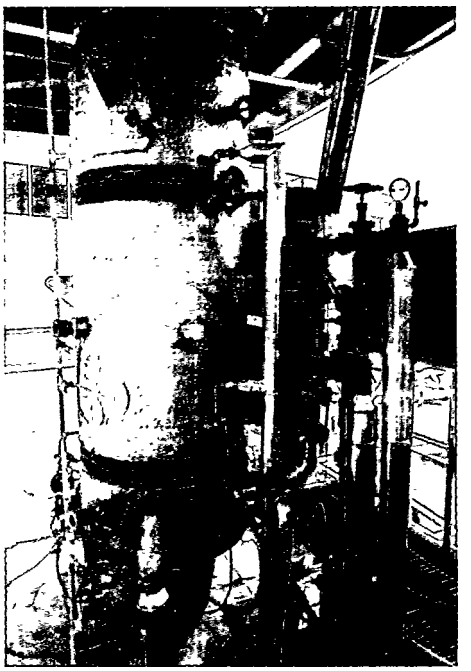
Para las pruebas con aditivo, el lecho retuvo más del 90% del total de SO_2, mientras que la retención de SO_2 por la propia ceniza del carbón resultó importante, especialmente con recirculación, incrementándose con la temperatura del lecho.

FIGURA 7
Absorción de bióxido de azufre en el lecho





Módulos superiores del combustor de lecho fluidizado: intercambiador de calor de convección y salida de gases al ciclón.



Módulos de alimentación, del lecho y espaciador inferior del combustor: se aprecian las tuberías de entrada y salida de agua al intercambiador inmerso en el lecho.

Conclusiones

Las pruebas realizadas en el Combustor de Lecho Fluidizado IIE permitieron comprobar la operatividad del mismo. Se determinaron a diferentes alturas del lecho las velocidades de aire requeridas para fluidizarlo y mantenerlo en régimen burbujeante.

Los ensayos en caliente, confirmaron la eficacia de la tecnología para quemar carbón con alto contenido de ceniza y para la disminución de la emisión de óxidos de azufre. Con el carbón de Río Escondido, se obtuvieron las mejores condiciones de combustión para granulometría entre 5 y 10 mm, temperatura del lecho entre 740 y 750°C, velocidad de fluidización entre 1.5 y 2 m/s y recirculación total de cenizas arrastradas.

En las condiciones anteriores y usando mármol molido como material del lecho, las emisiones de bióxido de azufre (SO_2) fueron de alrededor de 60 ppm, lo que corresponde a una absorción en el lecho de más del 90 por ciento.

Trabajo futuro

Como se ha mencionado, el propósito del Combustor de Lecho Fluidizado IIE es ensayar el quemado de combustibles mexicanos con esta tecnología, definiendo tanto la factibilidad como las condiciones de operación adecuadas y sus ventajas.

Los combustibles a ensayar forman una larga lista que incluye combustóleo, fondos IMPEX, residuos de lavado de carbón, desechos urbanos e industriales, médula de bagazo de caña, mixtos de lavado de carbón, etcétera.

En el futuro inmediato se realizarán ensayos con *pelets* derivados de basura, para luego iniciar las pruebas con combustóleo.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto "Estudio experimental de combustión en lecho fluidizado" bajo contrato con la Coordinación de Proyectos Termoeléctricos de la CFE. Se agradece a dicha Coordinación el apoyo brindado, así como la autorización para la publicación de los resultados. En la realización de las pruebas y el procesamiento de los datos participaron los ingenieros Oscar Macedo T., Mario Villarreal C., Gerardo Torres T., Raúl Benítez C. y Raúl Camargo C., así como el señor Gregorio Perez F., a quienes el autor queda profundamente agradecido.

Referencias

Geldart, D., (editor) (1986), *Gas Fluidization Technology*, John Wiley & Sons, N. Y.

Herrera C., P. Ruíz, M. Vázquez y J. Milán (1990), *Ingeniería básica y de detalle del combustor de lecho fluidizado atmosférico*, Informe IIE 44081, enero.

Kunii, D y O. Levenspiel (1977), *Fluidization Engineering*, Robert Krieger Pub. Co., N. Y.

Milán, J. y C. Herrera (1988), *Diseño preliminar de un combustor experimental de lecho fluidizado atmosférico para investigación y desarrollo*, Informe IIE 44060, septiembre.

Milán J., O. Macedo y M. Villarreal (1991), *Montaje y puesta en marcha del combustor de lecho fluidizado IIE*, Informe IIE 44124, mayo.

Milán J., O. Macedo, C. Villarreal y G. Torres (1991), *Ensayo de combustión en lecho fluidizado con carbón de Río Escondido*, Informe IIE 44125, julio.

mx9800212

Aspectos básicos de la recarga de agua al reservorio de Cerro Prieto

Sergio Mercado

- *Durante la explotación del campo geotérmico de Cerro Prieto se han percibido cambios físicos y químicos en los fluidos hidrotermales descargados por los pozos.*
- *Se recomienda la reinyección de fluidos geotérmicos de desecho en caliente para recargar térmica e hidráulicamente una zona de la parte oriental del campo de Cerro Prieto.*

Resumen

El campo geotérmico de Cerro Prieto, situado a 30 km al sur de la ciudad de Mexicali, Baja California, cuenta actualmente, después de 18 años en explotación, con 620 MW de capacidad instalada en plantas geotermoeléctricas que, operando con vapor endógeno, aprovechan la energía del subsuelo mediante pozos profundos de los que se extraen alrededor de 80 millones de metros cúbicos por año de una mezcla de agua-vapor de elevada entalpia.

Durante la explotación se han percibido cambios físicos y químicos en los fluidos hidrotermales descargados por los pozos, lo que indica, entre otras cosas, una recarga elevada de agua localizada hacia el poniente del campo y una recarga baja en una zona de la parte oriental. Por ello se recomienda la reinyección de salmuera geotérmica caliente de desecho (previamente tratada para eliminar el exceso de sílice) para recargar térmica e hidráulicamente el reservorio en esa parte del campo.

Acuífero semi-confinado. Salinidad

El acuífero que actualmente se explota en Cerro Prieto es de carácter semiconfinado, es decir, no está totalmente abierto a los acuíferos circundantes, ya que según la correlación geoquímica con el medio ambiente subterráneo y el tipo de agua existente en dicho acuífero, está última se encuentra estancada y su circulación es restringida. Debido a esto

FIGURA 1
Diferencia elevada de salinidad al comparar el acuífero de Cerro Prieto (10 000 ppm Cl) y los acuíferos del Valle de Mexicali (380 ppm Cl), los cuales contienen agua procedente del Río Colorado.

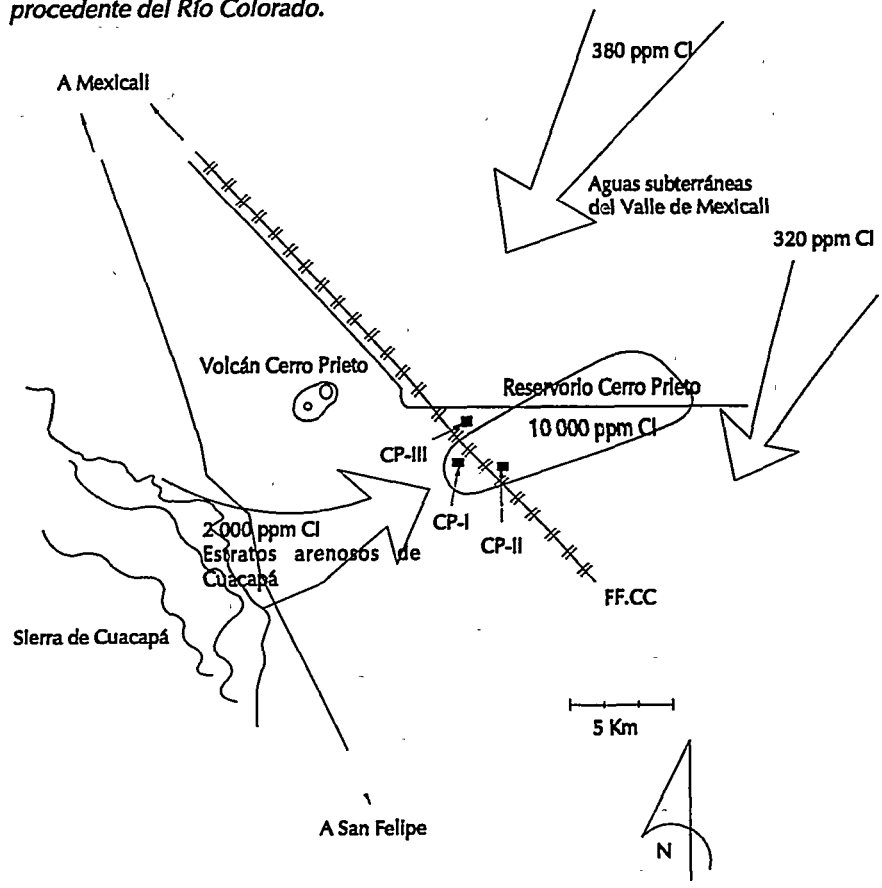
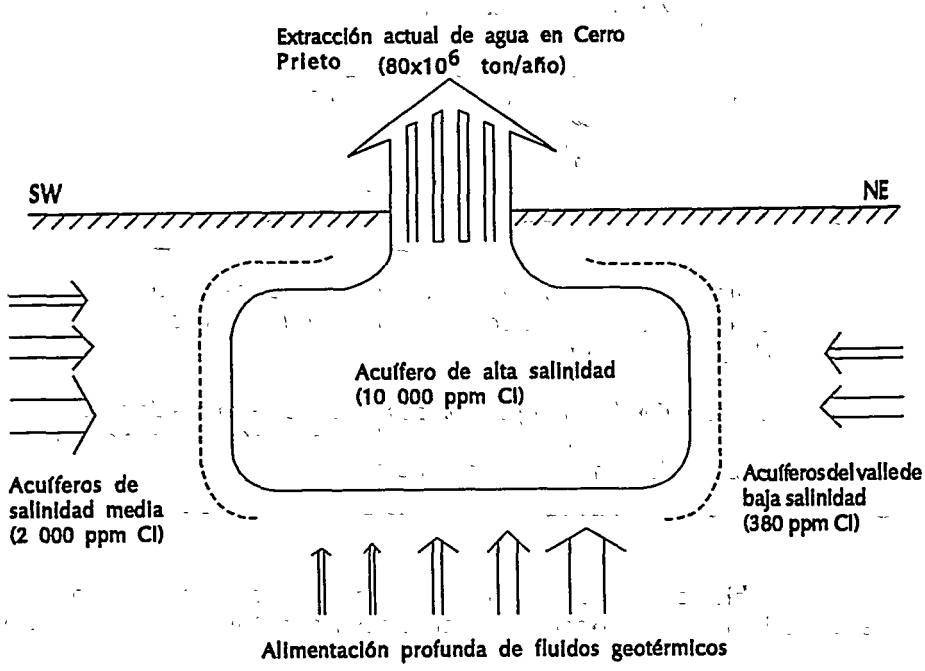


FIGURA 2
Corte idealizado del reservorio de Cerro Prieto, mostrándose la extracción de agua de alta salinidad y la recarga, así como la alimentación profunda de fluidos geotérmicos.



y a la alteración hidrotermal, dicho acuífero tiene una elevada salinidad al compararla con la de los acuíferos que lo circundan. Como ejemplo, en la figura 1 se muestra el contenido del cloruro de los acuíferos típicos del Valle de Mexicali localizados al norte y al este del campo y que se originan en escurrimientos subterráneos de agua provenientes del Río Colorado, en los cuales se cuantifican 380 ppm de cloruros (Makadishi *et al.*, 1982). Al comparar estos valores con el contenido de cloruros del acuífero de Cerro Prieto, que es del orden de 10,000 ppm de Cl (Mercado, 1966), resultan bastante diferentes y ello indica cierto confinamiento, quizás por autosello, al presentarse la acción hidrotermal en el subsuelo.

Migración de acuíferos circundantes

Aunque se trate de un acuífero semiconfinado, al extraerse en forma intensiva el agua del reservorio de Cerro Prieto, donde después de 18 años de explotación comercial (1973-1990) se ha acumulado una extracción de agua cercana a los 850 millones de metros cúbicos y se extraen actualmente alrededor de 80 millones de metros cúbicos por año, se provoca una conificación en el área y, por tanto, una migración de los acuíferos circundantes en mayor o menor grado, dependiendo de la comunicación existente en los diversos frentes del reservorio. Dichos acuíferos son los responsables de mantener en equilibrio el sistema, apoyados indudablemente por una alimentación profunda de fluidos geotérmicos de alta temperatura (Fig. 2).

Recarga intensa de agua por la parte poniente del campo

Varios autores (Grant *et al.*, 1984, Truesdell *et al.*, 1990 y Mercado, 1975 y 1990) ya han señalado y comprobado la migración de agua por la parte poniente del campo. Específicamente se ha detectado que los acuíferos de la parte suroeste del campo son los que más aportan, es decir, es el sitio por donde más fácilmente entra agua de alimentación al acuífero de Cerro Prieto (Truesdell *et al.*, 1990, Mercado, 1975).

Inclusive, desde los inicios de la explotación, cuando sólo se tenían unos cuantos pozos descargando fluidos geotérmicos, se detectó una entrada de agua en esa zona (Mercado, 1975), lo cual hace suponer que dicha alimentación existía desde antes de iniciar la explotación del campo. Esto era posible, debido a los movimientos de convección natural existentes al tratarse de un reservorio geotérmico.

Dicha entrada de agua o zona de alimentación se fue haciendo más notoria a medida que transcurrían los años. Después de 18 años de explotación, esa área del campo presenta evidentes cambios físicos y químicos. Esto se ha podido comprobar mediante cálculos geoquímicos, al utilizar los geotermómetros de SiO_2 y NaKCa e inclusive con comparaciones simples de los contenidos salinos del fluido que han extraido y extraen los pozos productores en esa área del campo, apreciándose una disminución de los elementos o compuestos químicos por dilución. A manera de ejemplo se expone en el cuadro 1 la disminución del contenido de cloruros en agua separada a la presión atmosférica de algunos pozos, así como la variación del índice Na/K que indica una disminución de la temperatura.

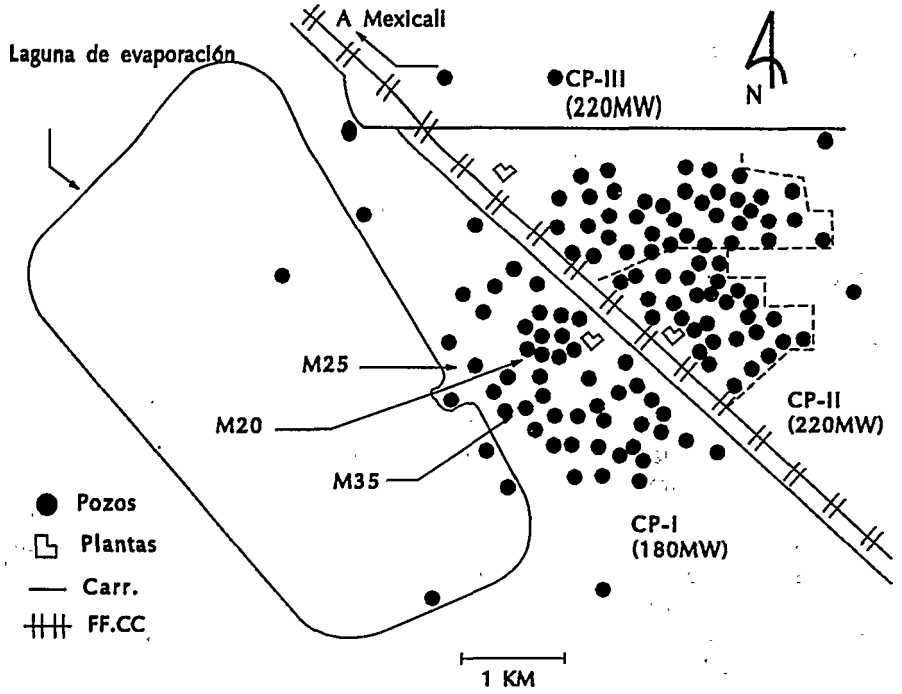
Como referencia, en dicha área del campo están ubicados los pozos que proveen de vapor a la central CP-I de 180 MW de capacidad (Fig. 3), cuya operación se inició en 1973 con 75 megawatts.

Desde los primeros años de explotación de esta área, también se han venido observando cambios en las características físicas de los pozos, dependiendo de su ubicación: Los situados en las márgenes del campo, presentaron declinación rápida de su producción, incluyendo abatimiento de entalpia e incrustación en estratos productores. Los demás, aunque presentaron aumento de entalpia, han tenido siempre una declinación en

CUADRO 1
Variación del contenido de cloruros e índice de Na/K en pozos del área poniente de Cerro Prieto

		Cloruros (ppm)		Indice Na/k	
Pozo Nº	Año	1973	1989	1973	1989
M 20		13150	10320	6.6	11.0
M 25		15700	7820	7.0	0.7
M 35		16800	6100	6.2	11.5

FIGURA 3
Localización de pozos de Cerro Prieto.

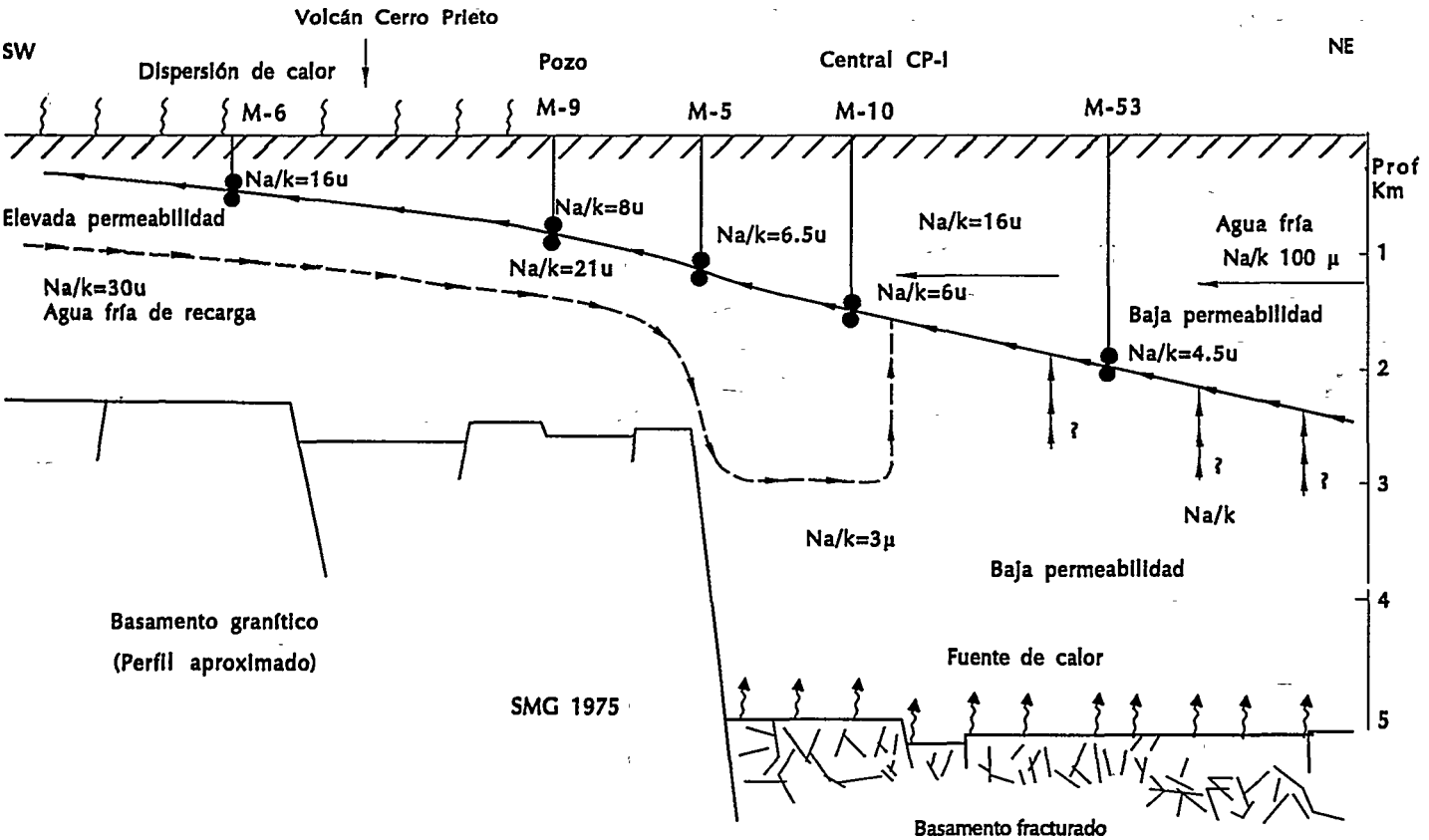


su producción y, en general, en todos disminuyó su presión de fondo y continúa decayendo.

Es importante recordar, que en la parte suroeste del campo se había detectado una corriente de agua de alimentación de baja temperatura (con base, principalmente, en los índices químicos Na/k de los fluidos extraídos por los primeros pozos de explotación), la cual se expuso en un modelo geoquímico del área conocida entonces (Fig. 4). Dicha corriente de agua de alimentación, al incrementarse la extracción con un número mayor de pozos y al paso de los años, alcanzó los estratos de los pozos situados en la parte media del área de CP-I (Fig. 5).

A manera de ejemplo, el contenido de cloruros en agua separada del pozo M5 disminuyó de 16 470 ppm Cl en 1968 a 14 400 en 1980. Esto fue provocado, indudablemente, por agua de menor salinidad y temperatura, proveniente de los acuíferos situados al poniente del campo.

FIGURA 4
Modelo geoquímico de Cerro Prieto (Mercado, 1975). Se indican las entradas de agua originales, antes de efectuarse extracción intensa.



La razón principal de que exista una gran movilidad de agua de baja salinidad hacia los pozos en dicha área del campo, es que el subsuelo tiene elevada permeabilidad, lo que se debe a que los estratos en los límites del campo, están conformados en un alto porcentaje por arenas saturadas de agua provenientes de los abanicos de la Sierra de Cuacapá que se encuentra a escasos kilómetros al poniente del campo de Cerro Prieto.

Recarga de agua en la parte media y oriente del campo

En la parte media del campo, también se detectó una alimentación de agua al reservorio (Figs. 4 y 5); sin embargo, ocurre en estratos relativamente poco profundos y es de bajo caudal debido a que hay escasos estratos arenosos, a un gran espesor de arcilla y a la baja permeabilidad de la formación circundante a los estratos productores.

Algo similar ocurre en la parte noreste del campo, en pozos que alimentan a la central CP-III de 220 MW, donde se tiene baja permeabilidad primaria en los estratos circundantes, causada principalmente por la existencia de elevados porcentajes de lutitas. En la descarga del 42% de los pozos de la zona se ha notado un fuerte aumento de la relación vapor/agua (De León, 1988).

Aunque en la figura 5 sólo se expone un corte simplificado suroeste-noreste, se evidencia el fuerte desequilibrio que existe entre la alimentación de agua al reservorio por el poniente del campo y la que ocurre por el oriente.

Es indudable que el reservorio recibirá recarga de agua radialmente en mayor o menor grado, según la permeabilidad de los estratos que circundan al reservorio y, principalmente, de la que existe en la profundidad de los estratos productores.

En la zona poniente la explotación se realiza en estratos de profundidad media (1 000 m), con alta permeabilidad y con alimentación suficiente de agua de recarga; sin embargo, ésta va disminuyendo gradualmente hacia el este del campo, debido, entre otras causas, a que en esa parte la explotación se efectúa en estratos mucho más profundos (3 000 m o más) (Fig. 6). Estos estratos presentan una menor permeabilidad primaria y están prácticamente aislados, verticalmente, por estratos compactos de lutitas y areniscas cementadas, así como por el mayor espesor de arcillas en los estratos subyacentes. No obstante, en algunos casos existe elevada permeabilidad secundaria por fracturamientos en el área a través de los cuales se da la migración de los fluidos hidrotermales que alimentan los pozos.

En la figura 7 se trata de exponer cualitativamente la intensidad de la alimentación o recarga de agua de los acuíferos circundantes a los estratos productores, apreciándose el fuerte desequilibrio entre la parte poniente en comparación con la parte oriente del campo. Se requiere de un estudio geohidrológico en detalle para definir qué zonas, en particular alrededor del campo, pueden presentar problemas futuros de recarga de agua.

Reinyección de salmuera geotérmica

Para lograr un mejor equilibrio de la recarga de agua al acuífero, se pueden

FIGURA 5
Modelo simplificado de la recarga natural actual de agua al reservorio de Cerro Prieto.

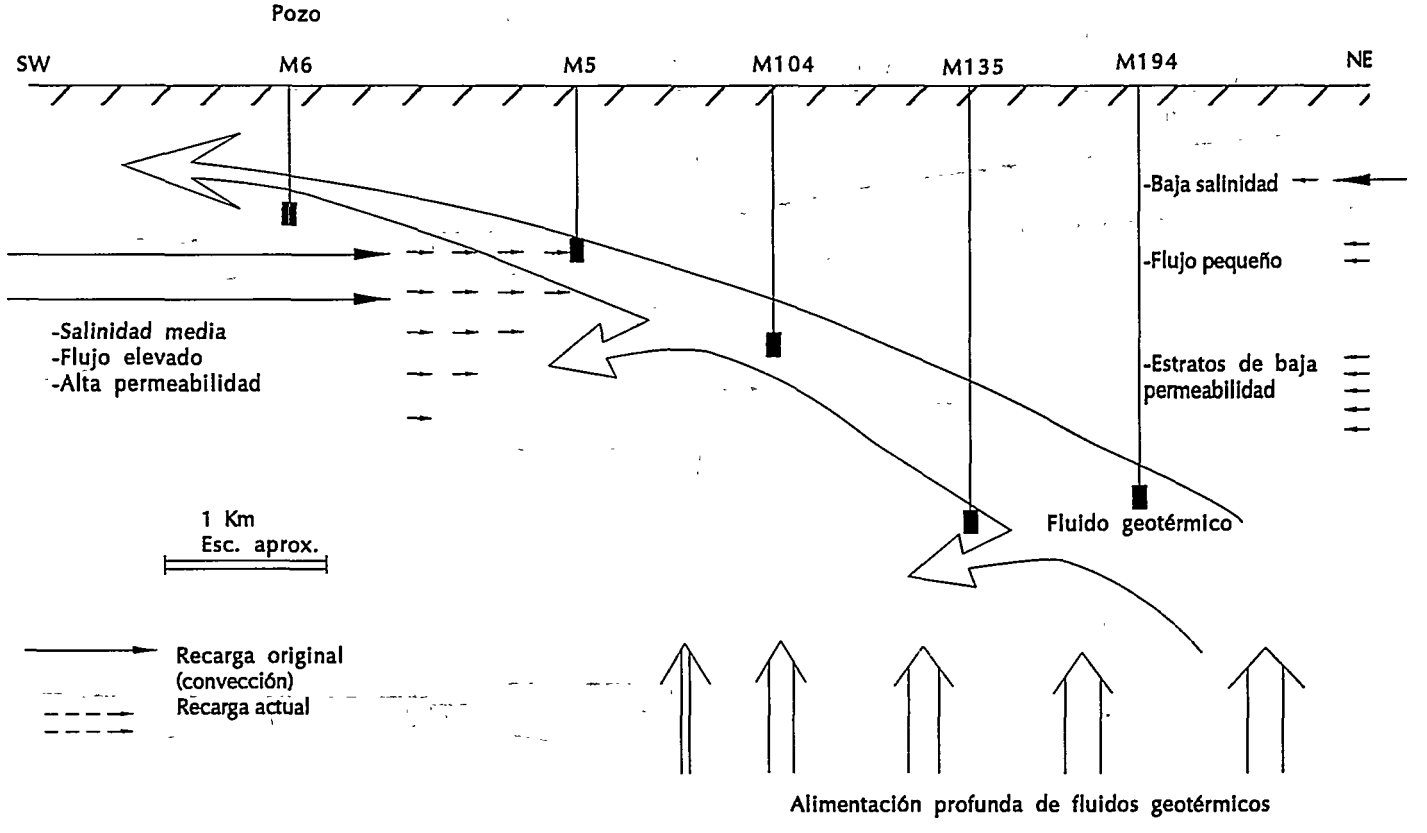


FIGURA 6
Detalle del reservorio de Cerro Prieto, delimitado por la isoterma de 300°C que es donde los fluidos geotérmicos tienen salinidad elevada (~10 000 ppm Cl). Se observa también la diferencia de profundidad de los estratos productores entre el SW y NE del campo.

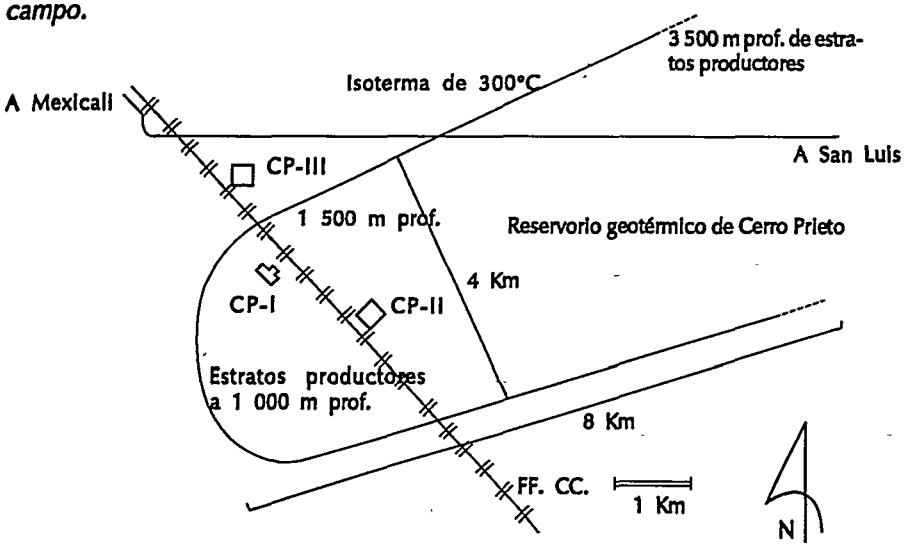
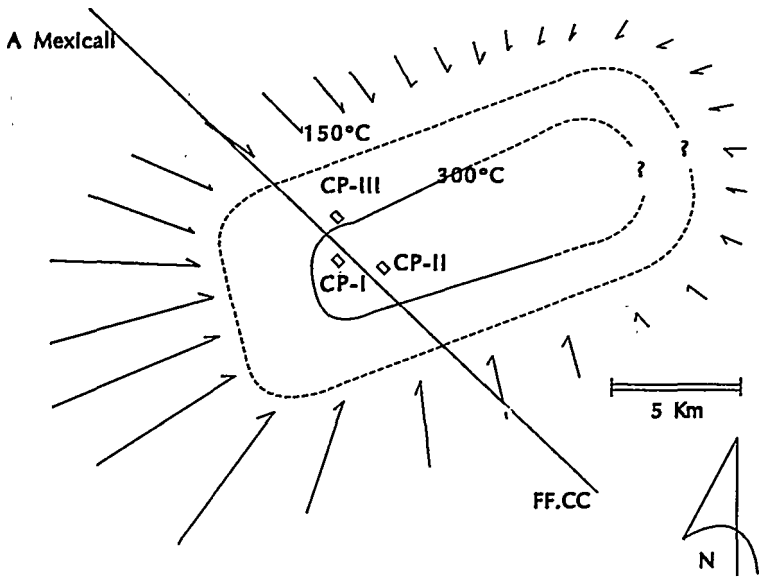


FIGURA 7
Recarga de agua al reservorio de Cerro Prieto por acuíferos circundantes (la longitud de las flechas indica cualitativamente la intensidad).



reinyectar fluidos geotérmicos de desecho o agua fría.

Al tenerse exceso de agua de recarga en la zona poniente, no se requiere de inyección, aunque en la parte oriente ésta siempre será positiva. Dicha inyección de agua tendrá que efectuarse a profundidades y distancias estratégicas, similares a las de los estratos productores que no los afecten térmicamente .

Para favorecer esto último es conveniente reinyectar, de preferencia, fluidos geotérmicos de desecho en caliente, previo tratamiento para eliminar la sílice en exceso y evitar la incrustración y taponamiento de los estratos receptores.

Al respecto ya se tiene evaluada la técnica para eliminar en caliente el exceso de sílice de la salmuera geotérmica de desecho de Cerro Prieto, de la que resulta una temperatura de 94°C (Hurtado *et al.*, 1981).

Al reinyectar, desde una distancia estratégica, agua a 94°C en los estratos situados en la periferia del campo que tengan temperaturas similares, se atenúa e incluso se puede eliminar el choque térmico que podría provocar el uso de agua fría que afectaría la producción. Por otro lado se recargaría térmica e hidráulicamente el reservorio.

Conclusión

La alimentación o recarga natural de agua al reservorio de Cerro Prieto ocurre en forma favorable hacia el poniente del campo, ya que se conserva una producción de agua-vapor razonable para mantener en operación por largo tiempo la central CP-I de 180 megawatts.

En la parte oriente del campo, principalmente en la zona que abastece la central CP-III de 220 MW, la recarga natural de agua aparentemente no es suficiente, por lo que conviene efectuar reinyección de fluidos geotérmicos de desecho en caliente, con lo cual se alargaría la vida del reservorio al recargarse térmica e hidráulicamente.

Referencias

De León VJ. (1988). *Presencia de dos fases en el yacimiento del campo de Cerro Prieto.* Geotermia, *Rev. Méx. Geoenergía*, vol. 4, No. 1.

Grant, M.A., Truesdell, A.H., Mañon, M.A. (1984). *Production Induced Boiling and cold-water entry in the Cerro Prieto Geotermal Reservoir. Geothermics* 13.1.

Hurtado, R., Mercado, S. *et al* (1981), *Tratamiento de la salmuera de Cerro Prieto para reinyección. Resultados de las pruebas de planta piloto,* 3er. simp. sobre Cerro Prieto. CFE-DOE. San Fco.

Makadishi, RS., Truesdell, A.H. et al (1982), *Geochemical Evolution of Mexicali groundwater,* Cuarto simposio sobre el campo de Cerro Prieto, CFE-DOE. Guadalajara, México.

Mercado, S. (1966), *Aspectos químicos del aprovechamiento de la energía geotérmica en Cerro Prieto,* 4a. reunión de Spten. Quim. de CFE México, D.F.

Mercado, S. (1975) *Migración de fluidos geotérmicos y distribución de temperaturas en el subsuelo del campo Cerro Prieto,* 2o. simposio de N.U. sobre geotermia. San Fco. USA.

Mercado, S. (1990), *Variación de los componentes químicos del agua descargada por los pozos en Cerro Prieto I,* Curso sobre Geoquímica Hidrotermal. Univ. Aut. de B.C. Mexicali.

Truesdell, A.H. and Lippman, J.J. (1990), *Interaction of Cold Water Aquifers with Exploited Reservoirs of the Cerro Prieto Geothermal System, GRC Trans,* Vol. 14, Part. 1. USA.

Perspectivas de nuevas tecnologías para los SADRE en el IIE

Carlos E. Ramírez Valenzuela

- *Es necesario establecer parámetros para medir las mejoras tecnológicas de un producto.*
- *Funcionalidad, operatividad, modularidad y fiabilidad son los parámetros de calidad propuestos para mejorar los SADRE.*

Resumen

El presente trabajo menciona la importancia de evaluar el nivel de tecnología en los productos; en particular establece que para mejorar la tecnología de los sistemas de adquisición de datos y registro de eventos (SADRE), es indispensable considerar los aspectos de costo y calidad. Por tanto, se establecen estos dos tipos de parámetros de evaluación para medir el nivel de la tecnología en un sistema. Especial atención se da a los parámetros de calidad, clasificándolos en parámetros de funcionalidad, operatividad, modularidad y fiabilidad. Para el caso particular de los SADRE, se propone llenar un cuadro con los requerimientos funcionales, operativos y de fiabilidad para una arquitectura distribuida con el fin de mejorar la tecnología respecto de un diseño previo desarrollado en el IIE, basado en una arquitectura centralizada. Finalmente, se menciona uno de los aspectos técnicos a resolver en la implantación de la arquitectura distribuida, proponiendo dos alternativas de solución.

Introducción

En el IIE se han desarrollado los SADRE para diferentes instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE): la central termoeléctrica de Tula (CTE) (Villavicencio, 1984), el simulador de adiestramiento de operadores de Ixtapantongo (Villavicencio, 1984), la central termoeléctrica de Manzanillo II (Ramírez *et al.*, 1988) y la nucleoeléctrica de Laguna Verde (Villavicencio *et al.*, 1988). Dentro de estos el de mayor relevancia es el sistema para la CTE de Manzanillo II, ya que el desarrollo está personalizado a centrales termoeléctricas normalizadas y la tecnología correspondiente fue transferida a la empresa SIMEX para su explotación, que ya ha contratado con la CFE la instalación de otros sistemas para las CTE de Tuxpan, Rosarito, Lerdo y Petacalco.

La función primordial de un SADRE es el poder concentrar la información del proceso bajo supervisión y control y desplegarla en forma oportuna, ágil y amigable al o a los operadores de la central, ya sea por petición de éstos, o de manera automática por la ocurrencia de eventos en el proceso bajo supervisión. Esto implica tener una base de datos en tiempo real (BDTR) donde la información recolectada de la planta se almacena y es consultada por los usuarios (empleando las funciones del SADRE), en forma directa o procesada. Con base en ésto, las arquitecturas (configuración de equipos y programas) de los SADRE son del tipo centralizado; esto es, se tiene una computadora central que controla todo los procesos derivados de las funciones del SADRE. En el caso del SADRE de Manzanillo II, un requerimiento importante es que el valor de la disponibilidad debe ser mayor que el 98.9% (Especificación ICA J-100, 1986), lo que se logra empleando una configuración redundan-te a nivel de computadora (Ramírez *et al.*, 1988 y Ramírez V., 1987). Otra característica de la configuración del SADRE de Manzanillo II es que la adquisición de información de campo se realiza utilizando varias unidades de adquisición (UA) conectadas a ambas computadoras por líneas de comunicación serie en un esquema de multipunto (varias UA comparten una línea), para lo cual se emplea un protocolo de comunicación entre computadora y la UA del tipo maestro-esclavo (Diamant *et al.*, 1984). Con el fin de integrar funciones de control al SADRE, el IIE desarrolla la programación para que éste pueda manejar unidades de control (UC), además de las unidades de adquisición.

Justificación

¿Por qué la necesidad de nuevas y mejores tecnologías para los SADRE? La respuesta a esta pregunta es obvia si se considera la diferencia entre hacer ingeniería, tecnología y ciencia. La ingeniería es un conocimiento, resultado de la investigación, que es público y que ha sido estandarizado (se enseña en las universidades); la ciencia consiste en incrementar el conocimiento del hombre y no está al alcance de cualquiera, pero se hace público (los investigadores hacen ciencia y publican sus resultados); la tecnología, además de integrar la ingeniería y la ciencia para la producción de un bien o servicio, considera otro elemento fundamental que es el mercado donde se va a vender el producto, con sus implicaciones de competencia en calidad y costo, y este conocimiento es

MX9800213

Análisis modal aplicado al balanceo de rotores: dos aspectos técnicos relevantes

Jorge E. Aguirre R.
Eduardo Preciado D.

- *Es importante saber en qué casos los diagramas polares de respuesta teóricos tienen la forma circular exacta para mejorar la precisión de los ajustes.*
- *Se demuestra el origen modal de la relación inversa entre fuerzas de balance y de desplazamiento locales en un modo de vibración, y que los parámetros modales frecuencia natural y relación de amortiguamiento, no varían para un modo dado aunque cambien las coordenadas de referencia.*

Al aplicar el análisis modal al balanceo de rotores, es frecuente encontrar temas técnicos que difícilmente se desarrollan en los libros de texto, o que sólo pueden deducirse mediante un estudio profundo y complejo.

Por esta razón, un ingeniero dedicado a la práctica que desee profundizar en el tema de balanceo de rotores, difícilmente podrá comprender estos temas, a no ser que éstos sean desarrollados con la orientación específica que los relacionen con la práctica del balanceo.

En este trabajo se presentan dos de esos temas relacionados con la definición y obtención de los parámetros modales: *a)* la forma fundamental de los diagramas polares de respuesta, que puede ser circular perfecta en ciertos casos, y *b)* la relación que existe entre las formas modales de un rotor y la distribución de pesos que se deben colocar para balancear un modo dado.

Diagramas polares de respuesta de forma circular

La extracción de parámetros modales a partir de datos experimentales de la respuesta dinámica de un sistema se hace a menudo ajustando círculos a los datos de respuesta presentados en un diagrama polar.

Sin embargo no en todos los casos los diagramas polares de respuesta teóricos tienen la forma circular exacta. Es importante saber en qué casos sí tienen esa forma, para mejorar la precisión de los ajustes.

La respuesta dinámica de un sistema puede expresarse como sigue (Aguirre, 1988):

$$A_o = \frac{\Omega^N}{R} \qquad [1]$$

donde:

A_o es la amplitud de la respuesta.

Ω es el cociente de la frecuencia de vibración () del sistema entre su frecuencia natural (ω_n).

N es el exponente de Ω.

Para amortiguamiento viscoso:

$$R = \sqrt{(1-\Omega^2)^2 + (2C\Omega)^2} \qquad [2]$$

$$\tan\phi = \frac{2C\Omega}{1-\Omega^2} \qquad [3]$$

donde ϕ es el incremento del ángulo de fase del vector A_o a partir de la dirección de A_o cuando $\omega = o$.

Para amortiguamiento histerético:

$$R = \sqrt{(1-\Omega^2)^2 + \eta^2} \qquad [4]$$

$$\tan\phi = \frac{\eta}{1-\Omega^2} \qquad [5]$$

donde C y η son, respectivamente, las relaciones de amortiguamiento para cada uno de los tipos de amortiguamiento mencionados donde:

El valor del exponente N dependerá de la forma que adopte la respuesta A del sistema (Aguirre, 1988).

Dependiendo del parámetro utilizado para medir la vibración de respuesta A del sistema, la amplitud (A_o) del término A, puede expresarse como sigue:

1) Cuando la amplitud F_o de la fuerza de excitación F, es constante:

CUADRO 1

	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración
Parámetro de la amplitud (A_o)	X_o/X_e	$X_o\omega/X_e\omega_n$	$X_o\omega^2/X_e\omega^2_n$
Exponente (N)	0	1	2

donde:

X_o es la amplitud del desplazamiento X.

X_e es la deflexión estática causada por F_o.

ω es la frecuencia forzada de la vibración.

ω_n es la frecuencia natural del sistema.

2) Cuando F_o es proporcional a ω^2, (v. gr. desbalance o excitación sísmica):

CUADRO 2

	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración
Parámetro de la amplitud (A_o)	X_o/e	$X_o\omega/e\,\omega_n$	$X_o\omega^2/e\,\omega^2_n$
Exponente (N)	2	3	4

donde e es la excentricidad o la vibración del soporte del sistema, según el caso.

3) Además se obtienen funciones de respuesta forzada, al dividir la vibración entre la fuerza de la excitación (véase, por ejemplo Ewins, 1986):

CUADRO 3

	Receptancia	Mobilidad	Acelerancia
Parámetro de la amplitud (A_o)	$\frac{X_o}{F_o}$ (k)	$\frac{X_o\omega}{F_o}$ (km)	$\frac{X_o\omega^2}{F_o}$ (m)
Exponente (N)	0	1	2

donde:

k es la rigidez, y

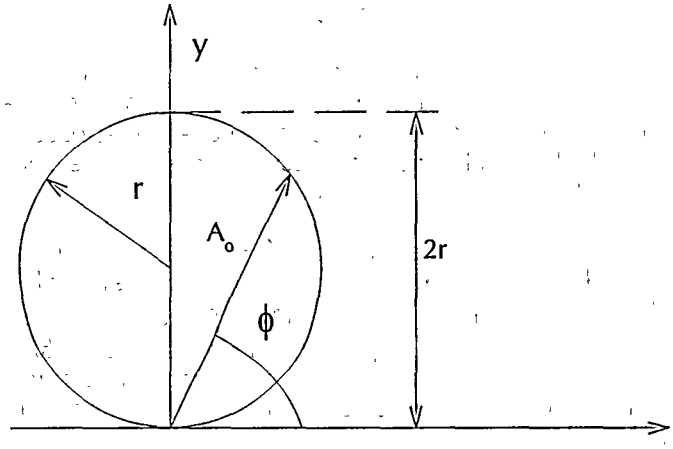
m es la masa.

Se demostrará a continuación que cuando el amortiguamiento es viscoso, sólo los casos donde N=1 tienen un diagrama polar de respuesta cuya forma es exactamente circular. También se demostrará que para el caso de amortiguamiento histerético, lo anterior se aplica cuando N=0.

Demostración:

La figura 1 muestra un diagrama polar de respuesta en coordenadas cartesianas x, y, donde el vector de respuesta A tiene amplitud A_o y fase ϕ.

FIGURA 1
Diagrama polar de respuesta en coordenadas x, y.



Si el diagrama polar es un círculo que inicia en x=0, y = 0, cuando $\Omega = 0$, y con A_o en la dirección del eje x:

$$r^2 = x^2 + (y-r)^2 \qquad [6]$$

pero:

$$x^2 + y^2 = A_o^2$$

$$\therefore\ A_o^2 = 2yr \qquad [7]$$

Por trigonometría, de la figura 1.

$$\text{sen}\,\phi = \frac{y}{A_o} = \sqrt{\frac{\tan^2\phi}{\tan^2\phi + 1}} \qquad [8]$$

Caso A) Amortiguamiento viscoso. Sustituyendo [3] en [8]:

$$\frac{y}{A_o} = \sqrt{\frac{(2C\Omega)^2}{(1-\Omega^2)^2 + (2C\Omega)^2}} \qquad [9]$$

y de la [2]

$$y = \frac{A_o}{R}(2C\Omega)$$

En la resonancia: $\Omega = 1$ y $\phi = 90°$ (A_o vertical en la Fig. 1) y de las ecuaciones [1] y [2]:

$$(A_o)_{\Omega=1} = \frac{1}{2C} = 2r \qquad [10]$$

$$\therefore\ r = \frac{1}{4C}$$

Sustituyendo [9] y [10] en [7]:

$$A_o^2 = 2\frac{A_o}{R}(2C\Omega)\frac{1}{4C}$$

$$\therefore\ A_o = \frac{\Omega}{R} \qquad [11]$$

Es decir N = 1 (véase la ecuación [1]).

Caso B) Amortiguamiento histerético. En este caso las ecuaciones [4], [5] y [8] dan:

$$y = \frac{A_o}{R}(\eta) \qquad [12]$$

y en condiciones resonantes, de [1] y [4]:

$$(A_o)_{\Omega=1} = \frac{1}{\eta} = 2r$$

$$\therefore\ r = \frac{1}{2\eta} \qquad [13]$$

Sustituyendo [12] y [13] en [7]:

$$A_o^2 = \frac{A_o}{R}(\eta)\frac{1}{2\eta}$$

$$\therefore\ A_o = \frac{1}{R} \qquad [14]$$

es decir N = 0.

Parámetros:

1) Para obtener diagramas polares de respuesta de forma circular, cuando la amplitud de la fuerza de excitación no varía con la frecuencia, en el cuadro 1 se pueden identificar los casos N = 1 y N = 0, que son:

CUADRO 4

Parámetro	Amortiguamiento	N
$X_o\omega / X_e\omega_n$	Viscoso	1
X_o / X_e	Histerético	0

2) Cuando la amplitud de la fuerza de excitación es proporcional a Ω^2 el cuadro 2 no presenta ningún caso en el que N = 1 o N = 0. Por esta razón, será necesario integrar una y dos veces la señal de desplazamiento de la respuesta, para los casos de amortiguamiento viscoso e histerético, obteniéndose N = 1 y N = 0 respectivamente. Esta integración deberá entenderse como la operación inversa a la derivación con respecto al tiempo que transforma al desplazamiento X en la velocidad $\dot{X}$. Para este caso los parámetros quedan:

CUADRO 5

Parámetro	Amortiguamiento	N
$\frac{(X_o/\omega)}{(e/\omega_n)}$	Viscoso	1
$\frac{(X_o/\omega^2)}{(e/\omega^2_n)}$	Histerético	0

3) En el caso de funciones de respuesta forzada, no importa la relación entre F_o y ω, por lo que los casos en los que se obtienen diagramas circulares son:

CUADRO 6

Parámetro	Amortiguamiento	N
Mobilidad	Viscoso	1
Receptancia	Histerético	0

Debe notarse que los parámetros con los que se obtiene un diagrama polar exactamente circular, presentan su máxima amplitud cuando $\Omega = 1$ y cuando $\phi = 90°$. Esto se aprecia claramente en las curvas para N = 1 de las figuras 2 y 3 que se reproducen de Aguirre, 1988, donde se presenta el caso de amortiguamiento viscoso únicamente.

FIGURA 2
Frecuencia normalizada a la que ocurre la máxima amplitud, en función del amortiguamiento.

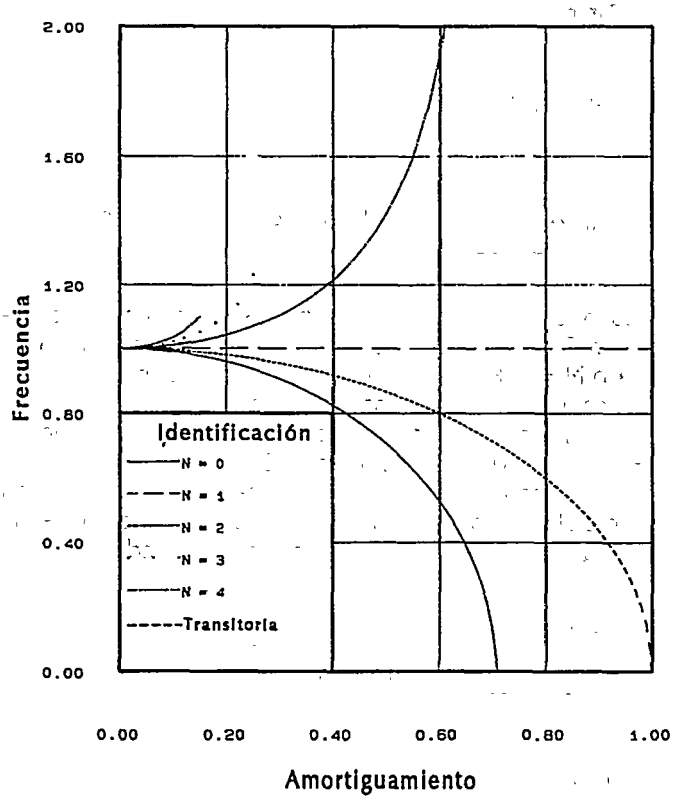
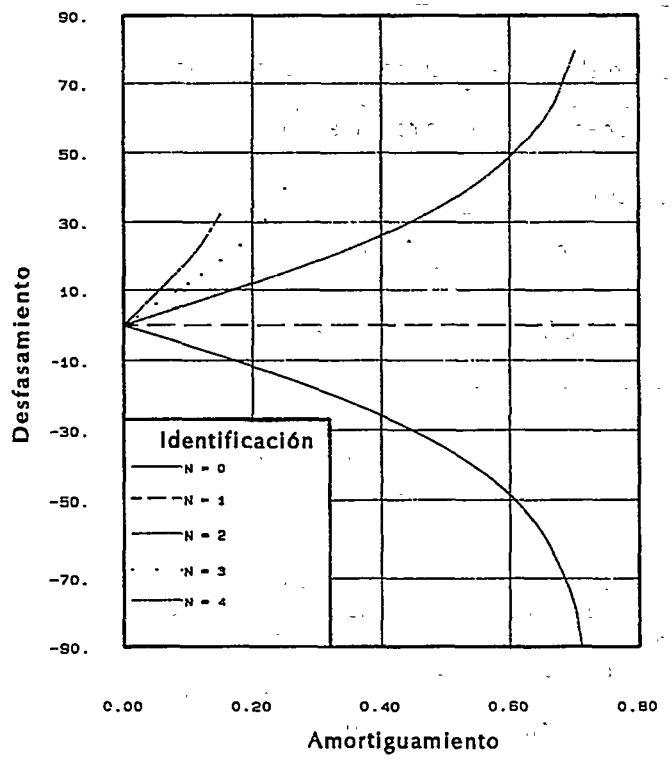


FIGURA 3
Desfasamiento correspondiente a la máxima amplitud de respuesta, con respecto a un sistema no amortiguado.



Referencias

Aguirre R. Jorge. (1988), "Algunos aspectos de la respuesta dinámica de sistemas". *Boletín IIE*, Julio/Agosto pp 181 - 187.

Ewins D. J.(1986), «Modal testing: Theory and Practice», Research Studies Press. Great Britain.

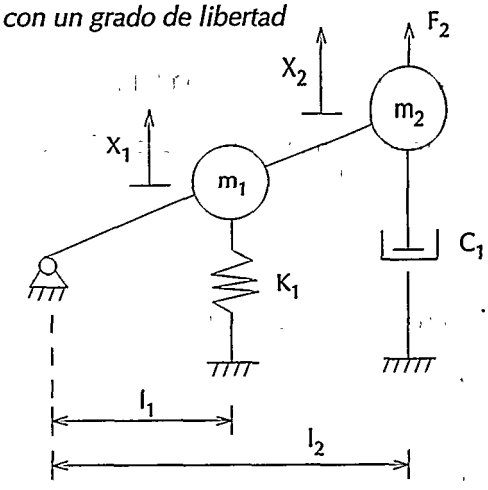
Algunos aspectos relativos a los parámetros modales

Para aplicar el análisis modal al balanceo de rotores (balanceo modal) es necesario introducir algunos términos como la sensibilidad modal, además de la frecuencia natural (ω_n) y la relación de amortiguamiento (C/C_c), que dependen de parámetros modales como la masa (M), la rigidez (K) y el amortiguamiento (C).

Se pretende demostrar: *a)* el origen modal de la relación inversa entre fuerzas de balance y desplazamiento locales en un modo de vibración y *b)* que los parámetros modales ω_n y $2\ C/C_c$, no varían para un modo dado aunque cambien las coordenadas de referencia.

Supongamos un sistema con un grado de libertad, como se muestra en la figura 4.

FIGURA 4
Sistema con un grado de libertad



La ecuación de equilibrio dinámico en este caso, puede escribirse:

$$m_1\ddot{x}_1+m_2\frac{l_2}{l_1}\ddot{x}_2+c_2\frac{l_2}{l_1}\dot{x}_2+k_1x_1=F_2\frac{l_2}{l_1}$$

Esto es considerando las fuerzas que actúan sobre la masa m_1. Podría escribirse otra ecuación con respecto a m_2, pero, si se desea obtener una sola expresión, ineludiblemente intervendrían las longitudes, l_1, y l_2, para obtener las fuerzas equivalentes en la masa considerada.

En este caso la "forma modal" es tal que:

$$\frac{l_2}{l_1}=\frac{x_2}{x_1}$$

Por lo que generalizando el caso con dos rigideces, dos fuerzas de excitación y dos amortiguamientos, tenemos:

$$m_1\frac{x_1}{x_1}\ddot{x}_1 + m_2\frac{x_2}{x_1}\ddot{x}_2 + c_1\frac{x_1}{x_1}\dot{x}_1 + c_2\frac{x_2}{x_1}\dot{x}_2 + k_1\frac{x_1}{x_1}x_1$$

$$+k_2\frac{x_2}{x_1}x_2 = F_1\frac{x_1}{x_1} + F_2\frac{x_2}{x_1}$$

Multiplicando el lado izquierdo de la ecuación por (X_1/X_1), agrupando y considerando sólo las amplitudes ($x=X \operatorname{sen}(\omega t)$), resulta:

$$\left[-\sum m_i\left(\frac{X_i}{X_1}\right)^2\right]X_1\omega^2 + \left[j\sum c_i\left(\frac{X_i}{X_1}\right)^2\right]X_1\omega +$$

$$\left[\sum k_i\left(\frac{X_i}{X_1}\right)^2\right]X_1 = \sum F_i\frac{X_i}{X_1}$$

Esta expresión se puede escribir:

$$-M\ \omega^2 X_r + jC\omega X_r + KX_r = F$$

donde X_r es la coordenada de referencia (en este caso X_1) y:

$M = \sum m_i\left(\frac{X_i}{X_r}\right)^2$ es la masa modal.

$C = \sum c_i\left(\frac{X_i}{X_r}\right)^2$ es el amortiguamiento modal.

$K = \sum k_i\left(\frac{X_i}{X_r}\right)^2$ es la rigidez modal.

$F = \sum F_i\frac{X_i}{X_r}$ es la fuerza modal de excitación.

Estos parámetros modales no tienen valor fijo, y cambian dependiendo de la elección de la coordenada de referencia X_r.

a) Debe notarse que la fuerza modal de excitación varía con la primera potencia de la relación (X_i/X_r) y no con la segunda potencia como todos los demás parámetros. Esto coincide con el concepto de sensibilidad modal utilizado en balanceo de rotores, que establece la relación entre pesos de desbalance equivalentes, en función de las amplitudes locales de la vibración modal, es decir:

$$F_1X_1 = F_2X_2 = \ldots = F_nX_n$$

es una serie de efectos iguales. Así, para obtener el mismo efecto de balance en un modo dado de un rotor desbalanceado, habrá que colocar más masa donde la vibración sea pequeña que en donde la vibración sea mayor. Las masas o fuerza de balance irán en proporción inversa a las magnitudes de la vibración local.

Si se desea calcular el efecto en un modo producido por una serie de fuerzas de balance, F_i, aplicadas en varios puntos con vibración, X_i, el efecto total estará dado por:

$$\sum F_iX_i = X_r\sum F_i\frac{X_i}{X_r} = X_rF$$

Por último, supongamos que se desea distribuir un peso de balance P colocado en el plano Núm. 1 de un rotor con vibración modal asimétrica. El rotor tiene dos planos (Núm.1 y Núm. 2) con vibraciones (X_1 y X_2 respectivamente). Los pesos (p_1 y p_2) distribuidos para obtener el mismo efecto del peso P, deberán cumplir con:

$$PX_1 = p_1X_1 + p_2X_2$$

b) Es importante notar también que las relaciones entre dos de los tres parámetros modales, K, M y C son independientes de la selección de la coordenada de referencia y tienen por lo tanto un valor fijo. Quizás los dos ejemplos más importantes son:

La frecuencia natural:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\frac{\sum k_i\left(\frac{X_i}{X_r}\right)^2}{\sum m_i\left(\frac{X_i}{X_i}\right)^2}} = \sqrt{\frac{\sum k_iX_i^2}{\sum m_iX_i^2}}$$

y la relación de amortiguamiento:

$$2\frac{C}{C_c} = \frac{2C}{2M\omega_n} = \frac{\sum c_i\left(\frac{X_i}{X_r}\right)^2}{\omega_n\sum m_i\left(\frac{X_i}{X_r}\right)^2} = \frac{\sum c_iX_i^2}{\omega_n\sum m_iX_i^2}$$

o su equivalente, η, para amortiguamiento histerético; todas ellas independientes de X_r y por tanto, con valores fijos para el modo considerado.

Nuevas tendencias en el diseño de sistemas de transmisión de energía eléctrica*

- *Para la década de los noventa se prevé un auge cada vez más importante en todos los niveles de los sistemas de transmisión de energía eléctrica.*
- *La coordinación de especialidad para el diseño de sistemas de transmisión, del Departamento de Transmisión y Distribución del IIE, ha definido para 1992 el proyecto denominado Tendencias en el diseño de líneas de transmisión.*

Una de las actividades de la coordinación de especialidad para el diseño de sistemas de transmisión y distribución, del Departamento de Transmisión y Distribución, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), es realizar revisiones bibliográficas periódicas para conocer las tendencias de investigación y desarrollo tecnológico en estas áreas; asimismo, en reuniones con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se ha determinado la necesidad de profundizar en las diversas alternativas que existen en el mundo para el diseño de líneas de transmisión.

Con base en estas consideraciones, se encuentra en elaboración un documento que defina el estado de avance en lo que se refiere a sistemas de transmisión, el cual servirá para consolidar futuros proyectos en esta área.

El documento elaborado por esta coordinación de especialidad considera como puntos principales –dentro de las tendencias en el área de transmisión para la década de los noventa– un auge cada vez más importante en el uso de las computadoras en todos los niveles del sistema, convirtiéndose en parte integral de la operación de las empresas eléctricas.

En otros países, los sistemas de transmisión se evaluarán de acuerdo con su capacidad de transporte, debido al creciente interés del concepto de "acceso abierto" para productores particulares de potencia. Las empresas eléctricas consideran la posibilidad de ofrecer sus sistemas de transmisión como medios de transporte para acomodar cualquier potencia; si un sistema es robusto y tiene la capacidad de manejar cargas extras, entonces se convierte en un fuente de ingresos extras.

Retos para la década de los noventa

Los expertos en transmisión en el mundo consideran que en la presente década las áreas más importantes a abordar serán las siguientes:

- La consideración de los aspectos ambientales será importante en esta década debido al debate sobre los efectos biológicos de los campos magnéticos y eléctricos.
- Para mantener la confiabilidad de la red y el acceso abierto a los sistemas de transmisión, se requerirán intercambios mayores de información; se debe resolver el problema de la capacidad de conducción dinámica de las líneas de transmisión antes de sobrecargarlas.
- La construcción de nuevas líneas de transmisión deberá considerar aspectos estéticos y evitar posibles daños a la salud.
- El problema de la calidad y confiabilidad del servicio será cada vez más importante al aparecer dispositivos digitales altamente sensibles en casas y oficinas.
- El uso de fibras ópticas para la protección y el control de los sistemas de transmisión.
- Reducción de pérdidas a todo lo largo de la red de transmisión.
- Aplicación de la tecnología electrónica de potencia en el control de voltaje y flujo de potencia.
- El monitoreo en tiempo real incrementará la posibilidad de carga del equipo de transmisión.
- Localización de fallas en tiempo real para descubrir causas y limitar efectos de salidas de servicio manteniendo niveles de confiabilidad.

Una red mundial interconectada

En la actualidad se maneja un proyecto denominado Global Energy Network International (GENI) que plantea la posibilidad de que todos los sistemas eléctricos del mundo estén interconectados.

En este sentido, en los últimos veinte años se han establecido interconexiones importantes en la Unión Soviética, Europa, Escandinavia y México y, actualmente, se habla de una posible interconexión

* Artículo elaborado por la licenciada Ma. Alejandra Elvira Sandoval, investigadora del Departamento de Difusión Tecnológica, con la supervisión del doctor Héctor Sarmiento Uruchurtu, coordinador de la especialidad para el diseño de sistemas de transmisión y distribución, del Departamento de Transmisión y Distribución.

FIGURA 4
Comparación RECORD-GE

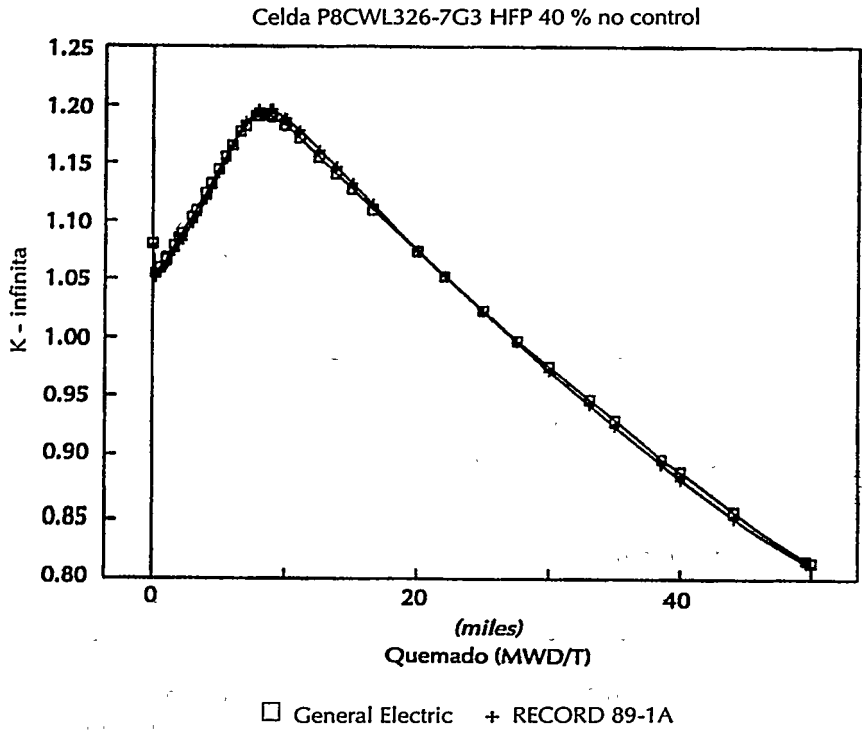
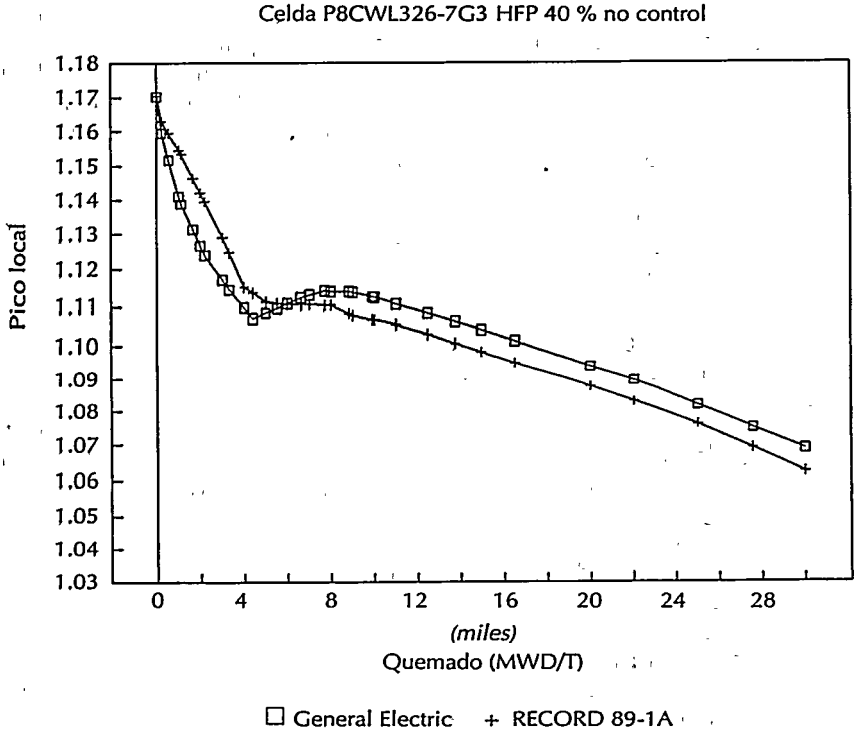


FIGURA 5
Comparación RECORD-GE



combustible del segundo ciclo de operación de la CLV y la metodología utilizada son adecuados.

Conclusiones

La generación de bibliotecas de datos nucleares representa la primera etapa de los análisis de administración de combustible. Constituye la base para análisis posteriores, tanto estáticos como dinámicos tendientes a incrementar la seguridad de las centrales nucleares, así como optimizar económicamente la utilización del combustible.

Los resultados obtenidos durante la generación de las bibliotecas de datos nucleares para el combustible tipo GE9B del segundo ciclo de operación de la CLV, son satisfactorios al compararse con los informados por el proveedor del combustible, ya que se siguen las mismas tendencias y órdenes de magnitud, validando la metodología utilizada en el DEN. Estudios posteriores (François, Martín del Campo y Esquivel, 1991) que utilizaron estas bibliotecas de datos con el simulador estático PRESTO, demostraron que las bibliotecas fueron creados correctamente.

Referencias

François J.L., C. Martín del Campo y J.L. Esquivel (1991), *Estudio sobre el impacto de la utilización de combustible tipo GE9B de mayor enriquecimiento en el ciclo tres de operación de la CLV, unidad 1.* Informe Técnico IIE/13/2953/P-4, julio.

Morimoto, L.Y. (1991), *Fuel Bundle Design Report.* GE9B-P8CWB303-7GZ-80M-150-T. y EDB Núm. 1915 y 1916. General Electric Company. Propietary information. Class III, january.

Sauar, T.O. (1982), *User Manual for POLGEN FMS.* Scandpower A/S, october.

Skardhamar, T. y J.P. Halbritter (1989). *User Manual for RECORD FMS, volume II.* Scandpower A/S, december.

Stamm'ler, R.J.J. y S. Borresen (1986), *User Manual for ECLIPSE FMS, volume II.* Scandpower A/S, august.

MY 9800214

Optimación del diseño de recargas de combustible para la Central Laguna Verde

Carlos Cristóbal Cortés Campos
*José Luis Montes Tadeo**

- *Se describe un ejemplo en el que se utilizó la optimación del diseño de recargas para el análisis del reactor tipo BWR de la unidad 1 de la Central Laguna Verde.*
- *Con este procedimiento es posible analizar diversos esquemas de recarga, en principio con modelos simples y, a medida que el número de alternativas se reduce, se utilizan modelos más complejos.*

Resumen

Se describe en términos generales el procedimiento que se sigue para realizar la optimación del diseño de recargas, y se muestra un ejemplo en el que se utilizó dicho procedimiento para el análisis del reactor tipo BWR de la unidad 1, de la Central Laguna Verde (CLV).

Introducción

La optimación del diseño de recargas es una parte del conjunto de actividades que se engloban dentro de la administración de combustible para una central nuclear, en la cual se trata de satisfacer un doble objetivo: minimizar los costos asociados en la generación de energía para cada ciclo del combustible sin comprometer la seguridad de la planta nuclear.

Para satisfacer el objetivo anterior, el grupo de optimación del diseño de recargas realiza la planeación de los ciclos de combustible a largo plazo, la cual se conoce como análisis de multiciclos y en el que se considera la energía que debe suministrar la planta nuclear de acuerdo con un plan de utilización de la energía (PUE) establecido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

La optimación en la administración de combustible se realiza, a menudo, usando parámetros de funcionamiento del núcleo que representen los costos del combustible indirectamente, por ejemplo: maximizar el factor de multiplicación efectiva (K_{eff}) al final de cada ciclo de operación o alargando la longitud del ciclo de operación se tiene una mejor utilización del combustible disminuyendo, por consiguiente, la cantidad de combustible requerida y esto repercute en una disminución del costo total del ciclo.

Asimismo, se involucran una gran cantidad de variables, tales como: el enriquecimiento[1] del combustible, la cantidad de combustible a ser reemplazada en cada ciclo de operación (fracción de recarga), la longitud deseada de operación para cada ciclo y la colocación del combustible dentro del núcleo (patrón de recarga), entre otras. Actualmente, en el mundo existe una tendencia para desarrollar estrategias de administración de combustible que permitan alcanzar un mayor quemado del mismo y ciclos de operación más largos, en las cuales los incentivos principales son una mejor utilización del combustible; una reducción en los costos del ciclo de combustible y una disminución en la cantidad del combustible utilizado.

Con objeto de llevar a cabo el trabajo de optimación se requiere interactuar con otros grupos relacionados con el diseño de recargas; en principio, para realizar los análisis de multiciclos con los códigos del sistema de administración de combustible (FMS, por sus siglas en inglés), se necesita la biblioteca de datos nucleares del combustible, proporcionada por el grupo de banco de datos nucleares; en caso de contar con información directa de la operación de la planta de un ciclo anterior a los que se están analizando es conveniente utilizar la información facilitada por el grupo de seguimiento del núcleo del reactor; igualmente, la información que se genera con los análisis realizados en la optimación, sirve como base para efectuar análisis del comportamiento de la recarga propuesta y para verificar en la planta nuclear que los límites de seguridad establecidos no sean violados, por lo cual se realizan diferentes estudios tanto desde el punto de vista estático

* Gerencia de Sistemas Nucleares (ININ).

[1] Concentración de U-235 en el combustible, dado en porcentaje de peso.

como del dinámico para el licenciamiento de la recarga.

Metodología

La complejidad del análisis por el número de variables involucradas, las diversas estrategias de administración, las restricciones técnicas, económicas y de licenciamiento, entre otros aspectos impuestos a la operación de una planta nucleoeléctrica, dificultan el llegar a una solución global en la optimación del diseño de recargas, por lo tanto es necesario abordar el problema por fases o multiniveles.

La tarea principal del grupo de optimación del diseño de recargas es la planeación de los ciclos de combustible a largo plazo (análisis de multiciclos), en función de la energía que debe suministrar la planta nuclear de acuerdo con el PUE instituido por la Comisión Federal de Electricidad.

En la primera fase de la optimación del diseño de recargas se realizan cálculos sencillos, incluso manuales, con modelos simplificados del reactor para determinar, en función de las longitudes de los ciclos esperados y con la demanda futura de energía para un número determinado de años, el enriquecimiento y la cantidad de combustible necesarios como una primera solución en la administración de combustible en la que no se toman en cuenta las restricciones impuestas a la operación de la planta.

En la segunda fase, se utilizan los esquemas que se obtienen en la primera para realizar estudios de investigación con el fin de obtener los diferentes servicios de los ciclos de combustible y las limitaciones para los diseños de las recargas (Cortés, 1991). Los códigos del FMS son utilizados como herramienta en la administración de combustible para el reactor tipo BWR de la CLV ya que permiten un enfoque sistemático para el empleo óptimo del combustible en el núcleo del reactor.

Los códigos del FMS usados por este grupo son FALC, FCS-II, HAULOAD y PRESTO. Con ellos se simula el funcionamiento del reactor a diferentes niveles de complejidad, cada uno de estos programas realiza funciones específicas y se aplican en conjunto para obtener soluciones en el diseño de recargas (The Fuel Management System, 1990).

El código FALC (FMS Program Applications, 1991) es un programa que utiliza un método lineal para la distribución óptima del combustible dentro del núcleo del reactor y para la optimación del ciclo de combustible. En este procedimiento, FALC se utiliza para describir el comportamiento del reactor a través de varios ciclos de operación y está diseñado para obtener respuestas rápidas y una buena comparación de diferentes opciones de los ciclos de combustible en función de los costos de operación; de esta forma, muchas opciones pueden compararse antes de analizar cualquier alternativa.

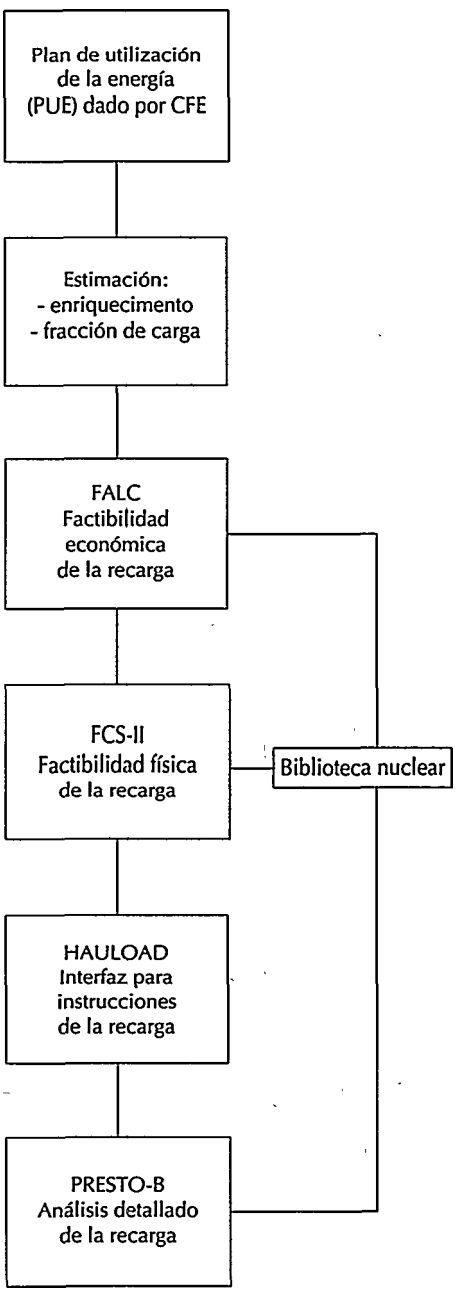
El código FCS-II (FMS Program Applications, 1991) es un simulador del reactor en una dimensión y está diseñado para realizar estudios de factibilidad en ciclos de operación de reactores de BWR; se utiliza para examinar una gran cantidad de esquemas de carga de combustible que cumplan los requerimientos de la longitud del ciclo deseada y los límites de distribución de potencia, también permite determinar los costos asociados al ciclo del combustible para cada opción analizada.

Después de seleccionar las opciones de administración que cumplan con las demandas impuestas en el código FCS-II, se utiliza el programa HAULOAD (Fuel Cycles and Loading Patterns Using FMS Codes, 1990), el cual sirve como interfaz para dar las instrucciones de recarga al código PRESTO de las opciones seleccionadas por FCS-II.

En la última fase, PRESTO (FMS Program Applications, 1991) permite realizar un análisis completo del reactor en tres dimensiones para las opciones más atractivas del ciclo de operación. Por medio de este análisis se demuestra cual de las propuestas es factible con respecto a las distribuciones de potencia, control, límites de seguridad y capacidad para sostener la operación total del reactor del ciclo de operación.

En la figura 1 se presenta un esquema del procedimiento de optimación de recargas utilizando el sistema de administración de combustible.

FIGURA 1
Representación esquemática del proceso de diseño de recargas utilizando los códigos del FMS



CUADRO 1
Información por lotes de combustible para cada ciclo

Ciclo de carga	Núm. de ensambles	Tipo de combustible	Enriquecedor (% U-235)	Quemado (MWD/MT)
1	68	1	0.711	4 554
1	96	2	1.759	18 686
1	280	3	2.190	22 762
2	48	4	2.784	32 662
2	44	5	3.014	36 184
3	68	4	2.784	33 538
3	32	5	3.014	36 547
4	48	4	2.784	34 807
4	32	5	3.014	37 041
5	52	4	2.784	35 076
5	24	5	3.014	34 525
6	8	4	2.784	35 289
6	64	5	3.014	36 941
7	16	4	2.784	34 684
7	60	5	3.014	36 640
8	16	4	2.784	35 072
8	60	5	3.014	36 568

Resultados

A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron de un análisis (Montes y Cortés, en prensa) utilizando los códigos de optimación del sistema de administración de combustible.

En el cuadro 1, se expone el quemado promedio de los grupos de ensambles de combustible al ser descargados del núcleo del reactor, donde el quemado de descarga para los ciclos en equilibrio[2] es de aproximadamente 36 200 MWD MT. En la figura 2, se ilustra el comportamiento del factor de multiplicación (K_{inf} y K_{eff}) al final de cada uno de los ciclos analizados, como se observa en esta gráfica, los primeros seis ciclos, son ciclos de transición, en los cuales varía el comportamiento del factor de multiplicación y, a partir del ciclo 7 en adelante, se tienen ciclos en equilibrio. La figura 3 muestra el comportamiento de la densidad de potencia radial y de la distribución del factor de multiplicación en función del radio del núcleo del reactor al final del ciclo 2 y, en el cuadro 2, se muestra la distribución del com-

[2] Los parámetros de operación (fracción de recarga, enriquecimiento y exposición de descarga) permanecen constantes.

FIGURA 2
Factor de multiplicación (K_{inf}, K_{eff}) al final de cada ciclo de operación

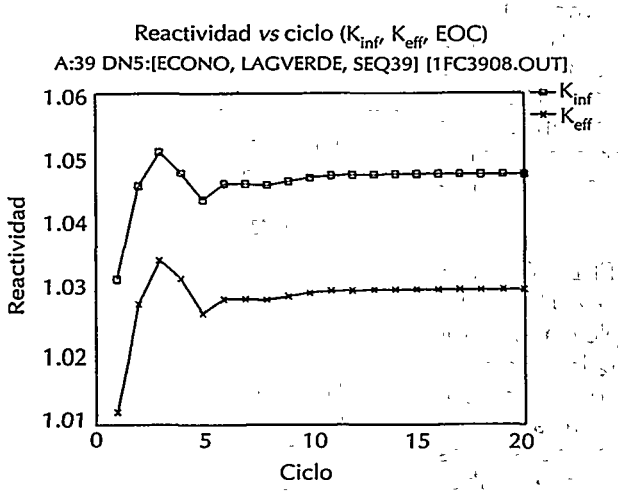
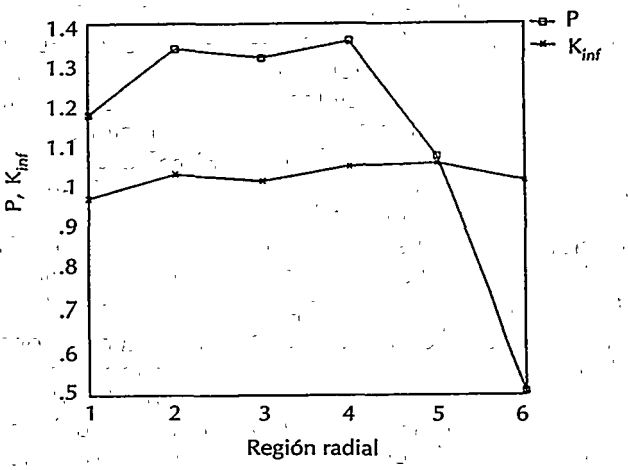


FIGURA 3
Distribución de potencia radial y factores de multiplicación al final del ciclo 2



CUADRO 2
Configuración de la recarga para el ciclo 2

	23)	25)	27)	29)	31)	33)	35)	35)	39)	41)	43)
22)	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	2
20)	3	2	3	4	3	3	3	5	3	3	2
18)	4	3	4	3	4	3	5	3	5	3	2
16)	3	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2
14)	3	3	4	3	3	3	5	3	3	3	2
12)	3	3	3	4	3	4	3	5	3	3	2
10)	4	3	5	3	5	3	5	3	3	3	2
8)	3	5	3	3	3	5	3	3	3	2	
6)	3	3	5	3	3	3	3	3	2		
4)	3	3	3	3	3	3	3	2			
2)	2	2	2	2	2	2	2				

Tipo de combustible	*Núm. de ensambles*	*Ciclo de carga*
2 GE5 P8CIB176-4GZ	72	1
3 GE5 P8CIB219-4GZ	280	1
4 GE9B P8CWB280-7GZ	48	2
5 GE9B P8CWB303-7GZ	44	2

bustible para la recarga del segundo ciclo analizado.

Conclusiones

En principio, este procedimiento de optimación permite analizar diversos esquemas de recarga con modelos simples y, a medida que el número de opciones se reduce, se utilizan modelos más complejos. La respuesta final representa la solución óptima para un esquema de operación del reactor que cumpla con las restricciones de operación del mismo.

Referencias

Cortés C. C. (1991), *Aplicación del MRL en la Administración de Combustible para un Reactor Tipo BWR*, (tesis de licenciatura), IPN, junio.

FMS Program Applications (1991), Scandpower. *Curso de entrenamiento*, april.

Fuel Cycles and Loading Patterns Using FMS Codes (1990), Scandpower. *Curso de entrenamiento*, october.

The Fuel Management System (1990), Scandpower. *Curso de entrenamiento*, april.

Hirschmann H. A., *Nuclear Power Plant Performance Objectives for the 1990's*, IAEA-CN-48/14, p.p. 131-147.

Montes T. J. y Cortés C., *Análisis de 20 ciclos de operación de la CLV con información de GE utilizando los códigos del FMS*, (en prensa).

Stier D. P. y Kavanagh D. L., *Fuel Bundle Design Report*, NEDE-21823, class III, GE Cia. Proprietary, Nuclear Energy Engineering Division, San Jose, California, USA, march 1978.

MX9800215

Simulación del núcleo del reactor de la CLV en estado estacionario y ejemplo de aplicación en el análisis de alternativas de recarga del ciclo 3

Héctor Ocampo Mansilla
Juan Luis François Lacouture
Jesús Blanco Lara
Carlos Cortés Campos
Jesús Esquivias Montoya
José Luis Esquivel Torres
Cecilia Martín del Campo
M. José Luis Montes Tadeo *
Luciano Sánchez Herrera **
*Carlos Torres A.***

- *La simulación estática se utiliza para evaluar el quemado del combustible nuclear.*
- *Se presentan los resultados de los cálculos de análisis para la evaluación de alternativas de recarga, para el ciclo 3 de la Central Laguna Verde.*

Resumen

Se presentan los resultados de un estudio solicitado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para analizar el ciclo 3, de la unidad 1 de la Central Laguna Verde (CLV), y determinar el impacto del efecto de quemado llevado a cabo con las pruebas de arranque y por la operación de los ciclos 1 y 2 con base en la técnica de alargamiento del ciclo conocida como *coastdown*[1]. Los cálculos se realizaron con el paquete de códigos FMS para la administración de combustible, usando el código PRESTO-B que analiza el reactor en forma detallada en tres dimensiones y en estado estacionario. Se analizaron en el estudio los esquemas de fracción de recarga propuesta por la General Electric (GE) con el efecto de alargamiento del ciclo. Del valor inicial de diseño de 100 ensambles para el ciclo 3, la GE propone aumentar dicha fracción de 112 a 120 ensambles. Esto impacta en el costo de la segunda recarga, y el propósito de esta investigación es analizar opciones con combustible de mayor enriquecimiento en U-235 para minimizar el número de ensambles en dicha recarga. Los análisis realizados muestran que los diseños propuestos por GE no cumplen con la energía requerida propuesta para el ciclo, aun usando en la recarga únicamente combustibles de 3.03% de enriquecimiento. Se propone, asimismo, enriquecer hasta 3.25% el combustible para cumplir con la demanda de energía con un mínimo de ensambles.

Introducción

La operación segura de una central nucleoeléctrica involucra diferentes actividades y análisis que continuamente deben realizarse tanto para el ciclo de quemado en turno como para los ciclos inmediatos y futuros. Una de dichas actividades es la administración de combustible y abarca actividades fuera del núcleo y dentro del mismo. En esta última es donde se analiza el comportamiento de las barras de uranio para generar la energía requerida (por el proceso de fisión nuclear) en forma óptima y segura. Estos análisis dentro del núcleo se realizan por medio de códigos computacionales digitales que permiten detallar un modelo representativo del reactor nuclear. La CFE adquirió para este propósito el paquete FMS que incluye códigos de generación de bibliotecas de datos nucleares, de análisis en estado estacionario, en estado dinámico (transitorios) y para optimación de recargas de combustible. En particular, los códigos del grupo de análisis estáticos permiten evaluar en el núcleo, por ejemplo, el quemado del combustible radial y axial, los límites operacionales y la potencia térmica axial y radial, de manera que se pueden analizar estrategias de patrones de barra de control y diseños tanto de

[1] Es la reducción natural de potencia del reactor, debido al agotamiento del combustible.

* Gerencia de Sistemas Nucleares (ININ).
** Departamento de Gestión de Combustible (CFE).

CUADRO 1
Plan de utilización de energía para la unidad 1 de la CLV

Ciclo Nº	Fechas			Energía (MWD)				Días de operación		
	Inicio	Inicio	Fin de operación	Diseño	Real Nominal	*Coastdown*	Total	Nominal	*Coastdown*	Total
1	88 11 05	91 07 05	91 08 31	818939	796 544	89 979	886 523	972	57	1 029
2	91 11 01	92 06 30	92 08 15	501310	429 975	77 100	507 075	242	46	288
3	92 10 14	92 08 16	93 08 31	493331	543 615	27 082	570 697	306	15	321

carga de combustible como de combustibles más adecuados para el reactor. El Departamento de Energía Nuclear del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) trabaja en el uso del FMS[2] y en particular con el simulador tridimensional PRESTO-B, que contiene modelos integrados neutrónicos y termohidráulicos para un reactor BWR, en estudios que permitan verificar la operación segura y óptima de una central nucleoeléctrica como la de Laguna Verde.

La unidad 1 de la CLV está en la fase de terminación del ciclo 1 de operación. El desempeño de este ciclo ha sido bastante adecuado ya que el combustible fue quemado más allá de lo planeado, y porque las pruebas de puesta en operación quemaron combustible, disminuyendo la longitud del ciclo 1. Para cumplir con las fechas de recarga y mantenimiento planeadas, el reactor tiene que ser operado con alguna de las técnicas de alargamiento de ciclo tales como las llamadas *coastdown* o endurecimiento del espectro para quemar otros isótopos además del U-235 (Graves Jr., 1979) y (BWR Spectral Shift, 1981).

Estas maniobras impactan en la operación de los ciclos subsecuentes, ya que el combustible fresco de la primera recarga (ciclo 2) al estar ya definido y el combustible remanente de la primera, más quemado que el planeado, hacen que la energía disponible no sea la esperada. Esto implica que también se tendrá que realizar el alargamiento del ciclo 2 para cumplir asimismo, con las fechas programadas. En el cuadro 1 (Comisión Federal de Electricidad, 1991), se muestra el plan de utilización de energía de la unidad 1 de la CLV. El análisis del ciclo 3 (segunda recarga) es el objetivo del estudio presentado en este informe. El estudio analiza la factibilidad del plan de recarga propuesto por la GE para los ciclos 2 y 3.

[2] Fuel Management System: paquete de códigos de computadora digital de la compañía Scanpower, Inc.

El grupo interinstitucional para la administración de combustible (CFE/IIE/ININ), formado por el Departamento de Gestión de Combustible (DGC) y la Jefatura de Análisis Nucleares (JANYA) de Ingeniería/Soporte Técnico, de la CFE; el Departamento de Energía Nuclear (DEN), del IIE y por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) bajo el Programa Global de Administración de Combustible y Análisis de Transitorios, establecieron un grupo de actividades para analizar este problema, el cual consiste en:

1. Cálculos de simulación estática en los tres primeros ciclos de operación de la CLV, empleando información de diseño de la GE y de operación.

2. Cálculos de análisis para la implantación, al principio del ciclo 3, de opciones de recarga, empleando un diseño más enriquecido que el combustible GE9B-P8CWB303.

El grupo CFE/IIE/ININ cuenta con el paquete de códigos para la administración de combustible llamado FMS, herramienta utilizada en el análisis que se describe. Los códigos fundamentales para el análisis son:

a) ECLIPSE (Stamm'ler y Borresen, 1986) y RECORD (Skardhamar, Halbritter y Borrensen, 1989) para la generación de constantes nucleares del reactor; con los cuales se generaron éstas para los ciclos 1, 2 y 3 con los tipos de combustible que la GE propone (GE5 y GE9B). Se obtuvieron, también, datos nucleares para un esquema de combustible tipo GE9B-P8CWB303 de mayor enriqueci-miento (3.25 % de U-235).

b) PRESTO (Borresen y Mober, 1987), MD-2 (Fantoft y Haugen, 1986) y MD-1 (Finnvik y Fladmark, 1987) para el análisis en estado estacionario y tridimensional del comportamiento del reactor.

c) FCS-II (Saver, Wennemo y Reyes, 1985) para la optimación de las recargas con cálculos en estado estacionario.

Con los códigos PRESTO y FCS-II se crearon archivos básicos para los ciclos 1, 2 y 3 con las condiciones de frontera necesaria en cada caso. Se analizaron esquemas de cálculo para el *coastdown* y, finalmente, se examinaron en el ciclo 3, las fracciones de recarga propuestas por la GE y el impacto de mayor enriquecimiento.

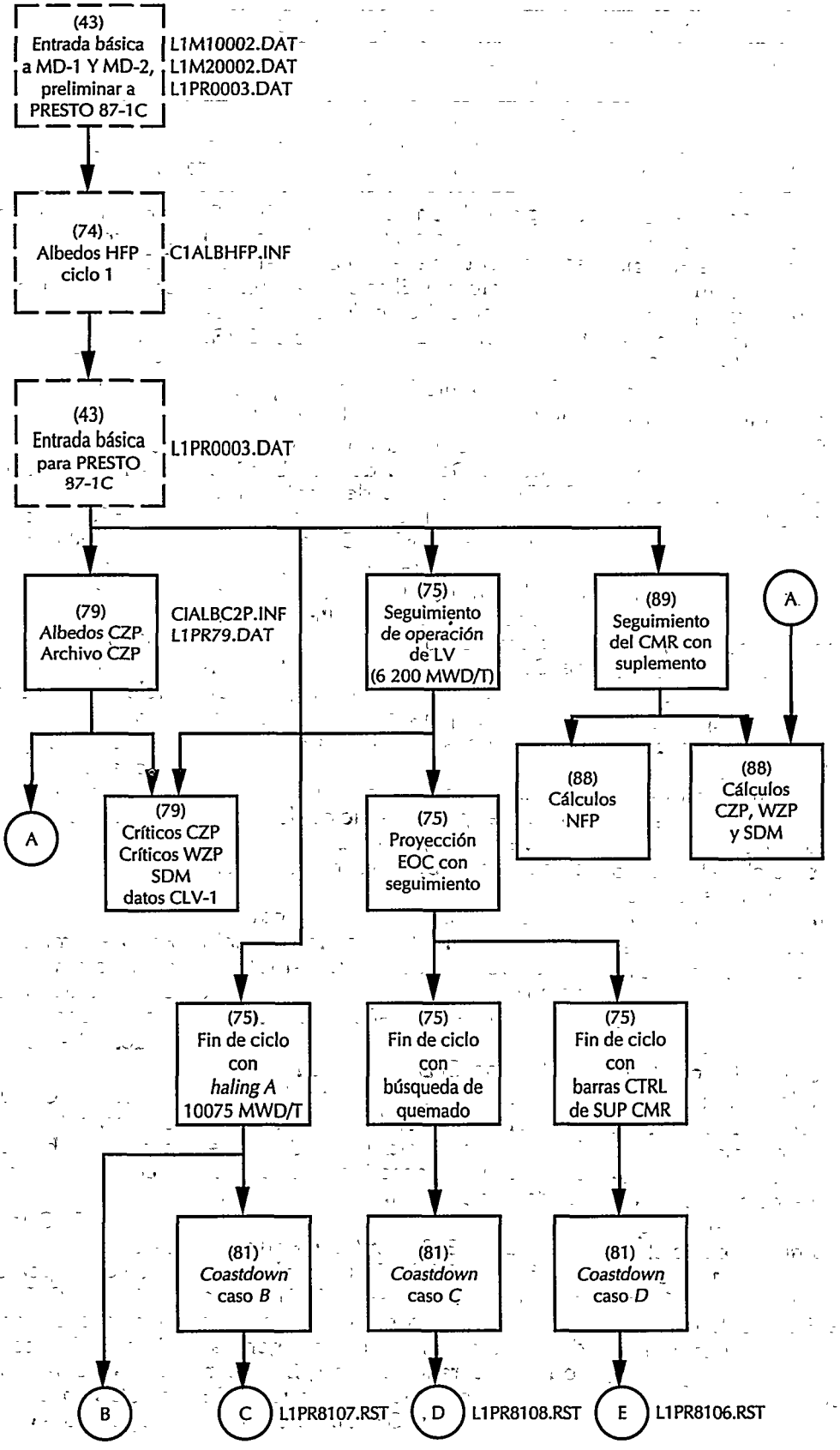
Metodología

Para determinar el estado del reactor, al principio del ciclo 3, se utilizaron cuatro esquemas de cálculo que se indican como casos *A*, *B*, *C* y *D*. Estos se describen brevemente:

Caso *A*: Cálculos en el ciclo 1 y 2 con *coastdown* y datos de diseño de cada ciclo, buscando cumplir con las fechas presentadas en el cuadro 1.

Caso *B*: Cálculos que consideran datos del quemado real en el seguimiento de operación del ciclo 1 hasta 6 200 MWD/T, y posteriormente, calcular la reactividad para llegar al fin del ciclo (EOC-1) con las condiciones más reales de la central. Se calcula el *coastdown* para cumplir las fechas programadas (véase el cuadro 1).

FIGURA 1
Actividades en el ciclo 1



CUADRO 2
Resultados del análisis de los ciclos 1 y 2 para el impacto en el ciclo 3

Ciclo	*Caso*	*Cálculo*	*MWD/T acumulada*	*MWD/T incremental*	*Pot (%)*	*Depp **	*Días reales*
1	*A*	HLG EOC	9 758.7	0.	100	410.4	
1	*B*	SEG+HLG	9 961.6	0.	100	478.4	
1	*C*	SEG+PB #	10 076	0.	100	483.2	
1	*A*	CDWN	10 921	1 162.3	74.6	47.8	57
1	*B*	CDWN	11 099	1 137.4	74.3	48.8	57
1	*C*	CDWN	11 266	1 189.5	73.5	47.3	57
2	*A*	HLG	15 012	5 345.3	100	224.1	
2	*B*	HLG	15 068	5 250.6	100	220.2	
2	*C*	HLG	15 114	5 158	100	216.3	
2	*A*	CDWN	15 978	966.3	82.1	40.5	46.3
2	*B*	CDWN	16 043.1	975.1	82.1	40.9	46.7
2	*C*	CDWN	16 093.4	979.4	82.1	41.1	47

Seguimiento con B/CNTRL C-1 * Dias efectivos/plena potencia

Caso *C*: Cálculos considerando el caso B en el seguimiento, asimismo, llegar al EOC-1 siguiendo los patrones de barra del suplemento del informe de manejo de combustible (RMC) C-1, proporcionado por la GE (Casillas, 1991).

Caso *D*: Cálculos de los ciclos 1 y 2 con datos al 100%, diseño de longitud de quemado convencional, sin considerar *coastdown*.

Los cuatro casos se plantearon para cumplir con requisitos de análisis de diferentes actividades planeadas para el ciclo 1, para verificar datos y cálculos proporcionados por la GE y tener condiciones más realistas para el ciclo 3. Con cálculos de diseño (caso D), se pudo fácilmente llegar al ciclo 3, vía una evaluación idealizada de la longitud de quemado (*haling*) en los ciclos 1 y 2 y, poder entonces, explorar la factibilidad de formar combustible con mayor enriquecimiento usando datos similares al de los ensambles GE9B y elaborar cálculos con PRESTO, verificando límites térmicos y diagramas de recarga. El límite térmico fundamental es la razón de generación lineal de calor (LHGR, por sus siglas en inglés), ya que la razón de potencia crítica (CPR, por sus siglas en inglés) se evalúa con los factores correspondientes al combustible más enriquecido GE9B-P8CWB303 de la recarga 1 y no con los datos actuales que corresponden al nuevo diseño propuesto. Después de esta verificación se realizaron los cálculos en el ciclo 3, considerando los casos *A*, *B* y *C*.

El comportamiento del ciclo 1 es el esquema fundamental de análisis para definir los siguientes ciclos. La actividad más relevante es entonces, simular con PRESTO la continuación de la operación real del reactor para tener un modelo más realista del quemado del combustible, su potencia, etc. El seguimiento se realizó hasta el quemado de 6 200 MWD/T (31 de enero de 1991), por ser ésta la fecha más actualizada de los informes de la computadora de proceso de la CLV que el grupo CFE/IIE/ININ posee. Desde ese punto, se realizó una proyección hasta el fin de ciclo (quemando hasta 9 961.0 MWD/T). A continuación, se simula el *coastdown* buscando cumplir las condiciones presentadas en el cuadro 1.

El análisis del ciclo 2, se realizó usando cálculos con *coastdown* del ciclo 1, así como con condiciones de diseño del mismo. El cálculo del fin del ciclo 2, se efectuó por medio de un *haling*, posteriormente, se evalúa el *coastdown* (véase el cuadro 1).

Para el ciclo 3 se consideró la energía requerida presentada en el cuadro 1 (543 615 MWD). De acuerdo con ella, se estudiaron las fracciones de recarga indicadas por la GE para los enriquecimientos propuestos. Se propuso y se analizó un diseño preliminar con ensambles de mayor enriquecimiento con objeto de estudiar su impacto en las fracciones de

CUADRO 3
Análisis en el ciclo 3 con fracciones de recarga de 100 y 116 ensambles frescos

Núm. ensambles	*Caso*	*Cálculo*	*MWD/T acumulada*	*MWD/T incremental*	*Pot (%)*	*Depp **
100	*A*	HLG	17 100	5 489	100	229.5
100	*B*	HLG	17 119	5 463.6	100	228.4
100	*C*	HLG	17 137	5 446.6	100	227.7
116	*A*	HLG	16 701	5 912	100	247
116	*B*	HLG	16 734	5 886.4	100	246
116	*C*	HLG	16 764	5 877.6	100	245.6

* Dias efectivos/plena potencia

FIGURA 2
Actividades en el ciclo 2

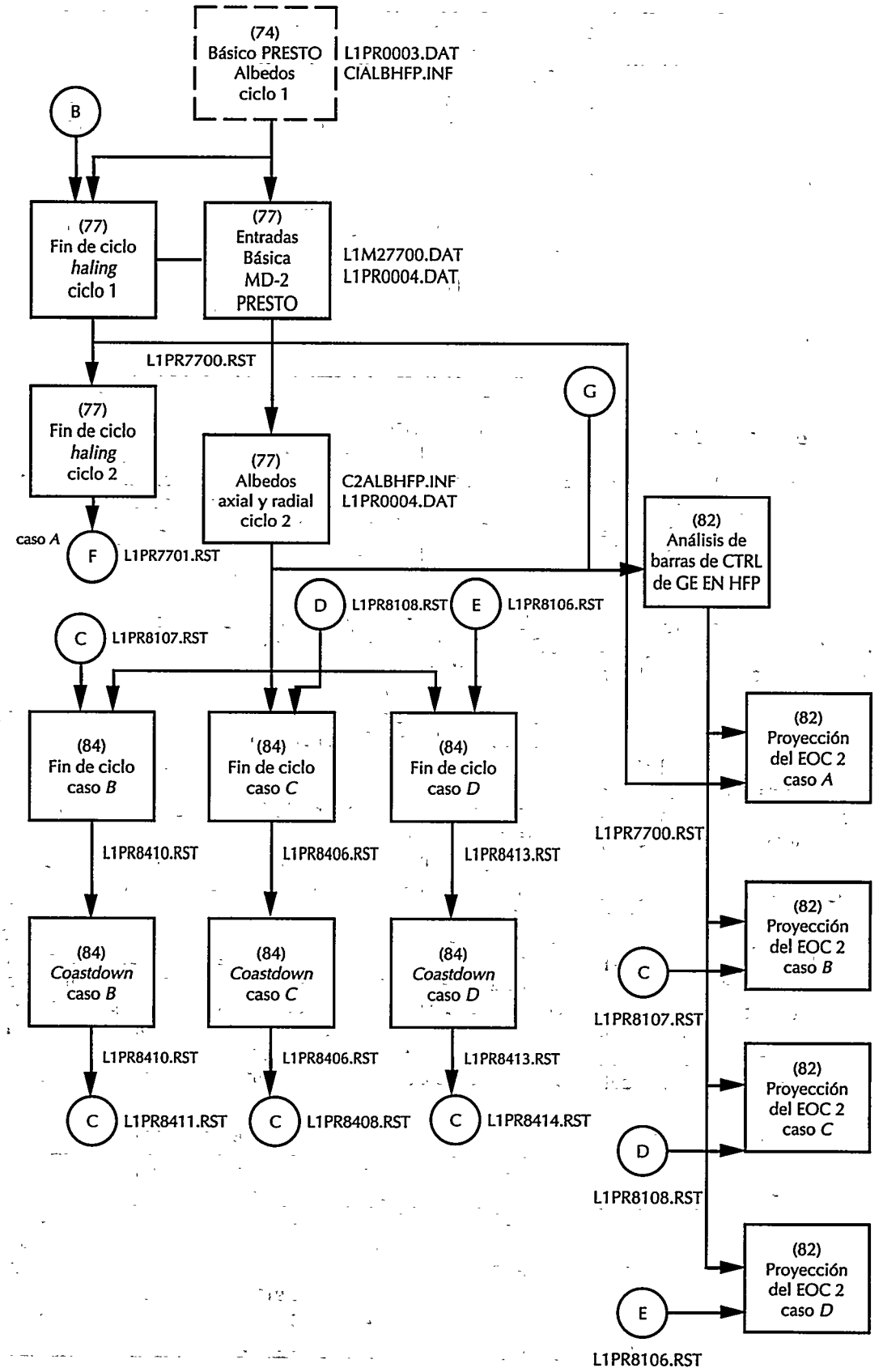
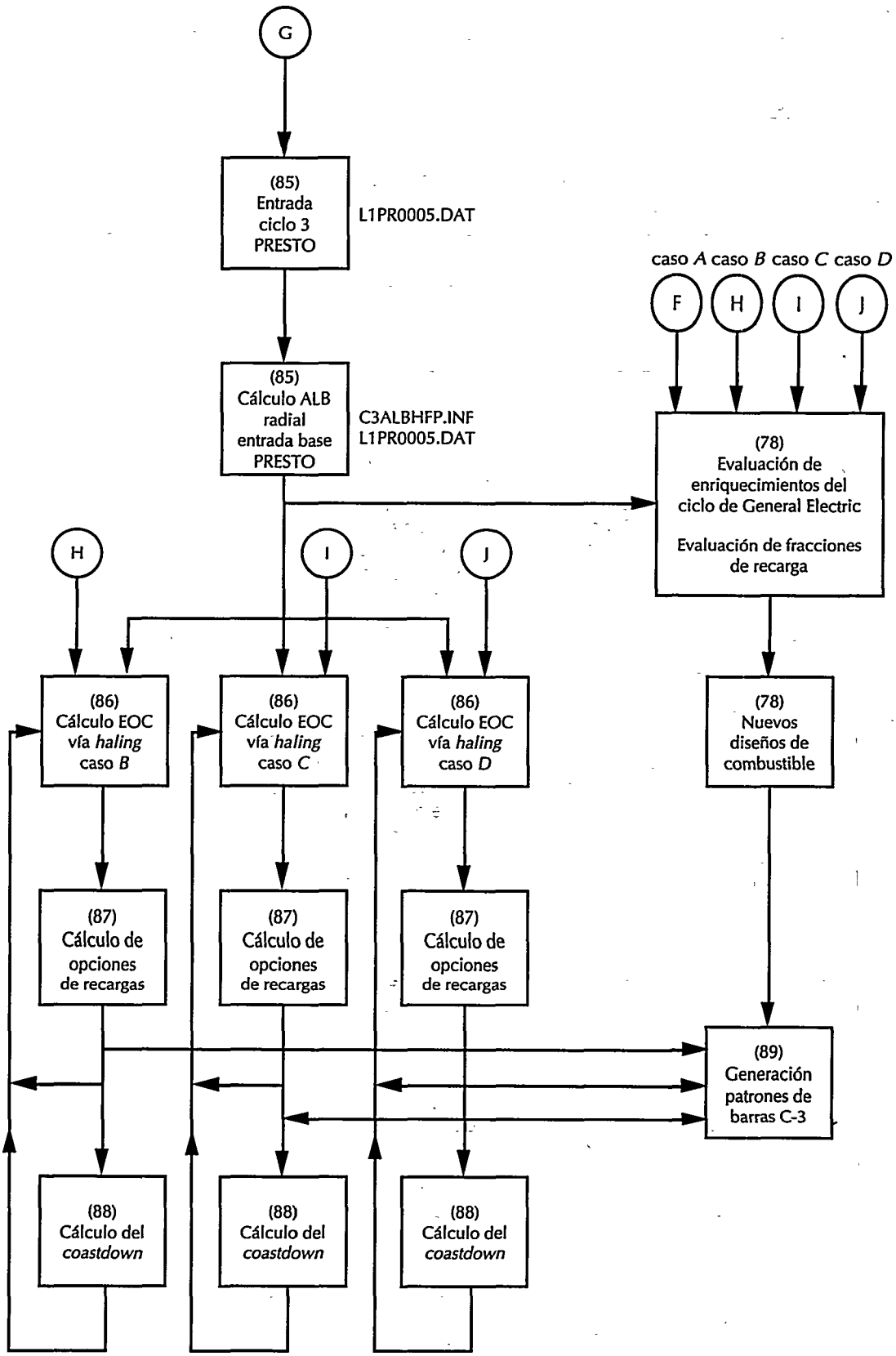


FIGURA 3
Actividades en el ciclo 3



CUADRO 4
Análisis de recarga con 116 ensambles y combustible G9B (3.03% y 2.8% U-235)

Caso	Log. Ciclo MWD/T	MLHGR (w/cm)	MCPR	MRAPLHGR
32 de 2.80%	6 385	397.8	1.57	0.583
84 de 3.03%				
116 de 3.03%	6 560	411	1.49	0.587

CUADRO 5
Análisis de recargas que satisfacen la energía real nominal con combustible de mayor enriquecimiento (3.25 y 280% U-235)

Caso	Log. Ciclo MWD/T	MLHGR (w/cm)	MCPR	MRAPLHGR
B	6 752	389.9	1.55	0.574
C	6 737	390.9	1.55	0.574
D	7 435	374.7	1.58	0.573

recarga propuestas, explorando límites de operación. En las figuras 1, 2 y 3, se presentan diagramas de interrelación y de actividades del estudio realizado.

Resultados

Los análisis efectuados muestran que:

- La longitud del ciclo 3, con 100 ensambles, no puede ser alcanzada (propuesta inicial de la GE) por el impacto de la operación del ciclo 1 y el *coastdown* en los ciclos 1 y 2, como se muestra en los cuadros 2 y 3.

- Incrementando, solamente, la fracción de recarga a 116 ensambles frescos propuestos por la GE, se estaría muy cerca a la longitud del ciclo de diseño, por los mismos efectos de operación y por el *coastdown* mencionados en el párrafo anterior. El ciclo 3 quedaría corto, es decir, de 9 a 10 días aproximadamente, lo cual implica que probablemente se tendría que aumentar el número de ensambles frescos (de 116 a 120).

- Los casos *A* y *B* no satisfacen la energía real nominal del ciclo 3 (véanse los cuadros 3 y 4).

- Al considerar combustible de mayor enriquecimiento sobre la base del diseño del G9B, se encontró en forma preliminar, que con 116 ensambles, 32 con enriquecimientos de 2.80% y 84 de 3.25%, se puede alcanzar la energía real nominal propuesta (veáse el cuadro 1). Este diseño muestra un comportamiento adecuado de límites térmicos: 390 w/cm para la máxima generación lineal de calor y un mínimo de CPR de 1.55[3], (tal como se observa en el cuadro 5).

[3] El C R P es calculado con la correlación GEXL estándar. Se estima que el valor real con la GEXL-PLUS deberá cumplir también con los límites de diseño.

Conclusiones

El análisis realizado demuestra que es posible utilizar con éxito el paquete de códigos del FMS. Estos cálculos se hicieron con información que en su gran mayoría son de diseño, tanto de la unidad como del combustible. Entonces, para que los cálculos sean más precisos, algunos cambios son recomendables. En principio, se debe tener el seguimiento de operación del ciclo 1 actualizado hasta el fin de operación, incluyendo el *coastdown* de la central. Con estos datos de planta, no de diseño, se podrán tener datos realistas para empezar el análisis del siguiente ciclo. Para el ciclo 2, se deberán actualizar los cálculos con el reporte de manejo de combustible del ciclo 2 que la GE está por entregar a la CFE. Con esta información actualizada, el diseño y análisis del ciclo 3 será más adecuado.

Asimismo, el FMS cuenta en la actualidad con la correlación GEXL estándar para el cálculo del CPR. Para los nuevos combustibles como el GE9B es necesario que se use la correlación GEXL PLUS para que el análisis del CPR sea el correcto en todas las recargas en que se use dicho combustible. Deberá encontrarse una metodología donde sea posible generar los factores R para combustibles tipo GE9B-P8CWB303, por ejemplo, y de mayor enriquecimiento para realizar diseños de combustibles. Todo esto debido a la necesidad de dar apoyo a la operación de la CLV y de proporcionar información de operación de ciclos futuros. Igualmente, es conveniente realizar actividades de análisis con nuevos combustibles buscando cumplir con los planes de operación de la Central Laguna Verde.

Referencias

Borresen, S. y L. Mober (1987), *User Manual for PRESTO-B FMS*, volume II, Scandpower A/S.

"BWR Spectral Shift" (1981), recopilado por G.C. Hopkins, General Electric Company UC-78 DRF. Núm. A00-710, april.

Casillas, J. L. (1991), *Cycle Management Report -Supplemental I*, General Electric Company 23A6544 Rev. 0, february.

Comisión Federal de Electricidad (1991), oficio núm. RFG/425/91, 31 de mayo.

Fantoft, S. y J. Haugen (1986), *User Manual for MD-2 FMS*, volume II, Scandpower A/S, november.

Finnvik, H. y G.E. Fladmark (1987), *User Manual for MD-1 FMS*, volume II, Scandpower A/S, june.

Graves Jr., H. W. (1979), *Nuclear Fuel Management*, John Wiley & Sons, New York, USA.

Sauer, T. O., S.E. Wennemo y O. Reyes (1985), *User Manual for FCS-II FMS*, volume II, Scandpower A/S.

Skardhamar, T., J.P. Halbritter y S. Borresen (1989), *User Manual for RECORD FMS*, volume II, Scandpower A/S, december.

Stamm'ler, R: J. J. y S. Borresen (1986), *User Manual for ECLIPSE FMS*, volume II, Scandpower A/S, august.