



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

REDACTOR Y EDITOR DE REVISTA
TECNOLÓGICA

REPORTE DE TRABAJO PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

GABRIEL NAGORE CÁZARES

TUTOR

DR. MARCOS LEY KOO

2007





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

I. Importancia de la Física en la divulgación de la ciencia y la tecnología.

II. Introducción: descripción de la revista *Boletín IIE*

III. Labor realizada (apéndices A, B, C y D)

IV. Descripción de algunos artículos y números especiales

Telecomunicación por fibras ópticas

Geoquímica e ingeniería en la caracterización de yacimientos geotérmicos

Materiales metálicos en generadores de vapor de centrales termoeléctricas

Centros de control de energía para el despacho de energía eléctrica

Torneo de operadores del Cenace

Número especial sobre centrales termoeléctricas

Número especial sobre el futuro del sector eléctrico

Número especial sobre la historia del Instituto de Investigaciones Eléctricas

VI. Conclusión: fortalecer la divulgación tecnológica como un área laboral de la Física

VII. Anexos

A. Artículos, entrevistas, editoriales, número especiales

*B. Artículo para la revista *Ciencia y Desarrollo**

C. Constancias como instructor de cursos para redactar artículos técnicos

*D. Artículo para la revista *¿Cómo ves?**

Productos derivados del ejercicio de la profesión:

- *Artículos y entrevistas de divulgación tecnológica en la revista Boletín IIE*
- *Editoriales de la revista Boletín IIE*
- *Números especiales de la revista Boletín IIE*
- *Formación de redactores técnicos para la revista Boletín IIE*
- *Artículo para la revista Ciencia y Desarrollo*
- *Artículo para la revista ¿Cómo ves?*
- *Cursos a investigadores del IIE y a estudiantes del IPN acerca de cómo preparar y presentar un artículo técnico*

Resumen

El objetivo de este informe es presentar la experiencia de 17 años en divulgación de temas tecnológicos en la revista *Boletín IIE*, órgano de difusión oficial del Instituto de Investigaciones Eléctricas, la cual se fundamentó en los estudios parciales de la carrera de Física que realicé en la Facultad de Ciencia de la UNAM. Esta actividad profesional (1981 a 1998) implicó la redacción de artículos y reportajes de divulgación tecnológica; la participación en 106 números bimestrales ininterrumpidos; la elaboración de 86 editoriales, la orientación de la publicación y la selección de temas como editor de la misma; la edición de números de aniversario, la formación y supervisión de recursos humanos en divulgación tecnológica, la impartición de cursos a los investigadores para la elaboración de artículos técnicos, así como la orientación de la política de difusión del Instituto. Se discute acerca de cómo la formación académica adquirida contribuyó en mi actividad profesional. Se concluye que la formación académica lograda durante la realización de los estudios parciales que realicé (dos terceras partes de los créditos) constituyeron la base para desempeñarme en este campo laboral de la carrera de Física y acerca de la conveniencia de fortalecer la formación académica en divulgación científica y tecnológica en la Facultad de Ciencias.

I. Importancia de la Física en la divulgación de la ciencia y la tecnología

El científico se maravilla al poder describir la naturaleza a través de modelos matemáticos que parten de la teoría o de la experimentación. El lego, en cambio, se maravilla de las estrellas, de la armonía de la naturaleza y de la oportunidad que tiene el científico para describirla y predecirla. Sin embargo, muchas veces desea conocer más, pero no comprende el lenguaje del científico.

Por su parte, el científico se ve impotente en ocasiones al no poder comunicarse con el público en general y no especializado, el cual puede incluir a los responsables de tomar la decisión de aprobar o no un proyecto de investigación, que quizá sea de gran beneficio para la comunidad.

El científico también se desespera cuando los periodistas se le acercan para comunicar a los demás sus descubrimientos. Las causas son las imprecisiones o relaciones inexistentes en los hechos que éstos últimos plasman en los medios de comunicación escritos o audiovisuales.

Todo lo anterior constituye un serio problema porque es manifiesta la gran importancia de que el público en general conozca el estado actual de la ciencia y la tecnología, sus logros, sus limitaciones y sobre todo sus posibles repercusiones sociales, con el fin de que cualquier ciudadano pueda emitir una opinión sobre asuntos que a la larga influirán directamente en su vida.¹

Por ello es necesario que el científico y el ciudadano en general se acerquen. El puente es la divulgación de la ciencia y la tecnología hecha por especialistas que puedan comprender el idioma del científico y cuenten con herramientas que permitan hacerlo en forma atractiva.

No existe una especialización formal en las universidades en este aspecto. Apenas se empiezan a ver esfuerzos y en ellos mucho tienen que ver las facultades de ciencias. No obstante, la carrera de Física con áreas como la óptica, la termodinámica, la cuántica, por mencionar algunas, además de producir investigadores y docentes, es un excelente preámbulo para formar especialistas en el campo de la divulgación científica y tecnológica, en campos tan diversos como los de la biología, la medicina y la astronomía, que además de importantes son algunos de los más populares entre la población en general.

La labor de la divulgación de la ciencia y la tecnología también es importante porque es una forma de acercar a las instituciones de investigación públicas con la sociedad, que es a fin de cuentas de donde provienen los fondos que sustentan a los proyectos.

II. Introducción: descripción la revista *Boletín IIE*

La revista *Boletín IIE* es el órgano de difusión oficial del Instituto de Investigaciones Eléctricas, centro de innovación y desarrollo tecnológico cuya creación en 1975 respondió a la necesidad de desarrollo tecnológico nacional en diversas áreas de la generación, transmisión, distribución y uso de la energía eléctrica. El número 1 de *Boletín IIE* apareció en julio de 1977, un año y medio después de la creación del IIE en diciembre de 1975 y la revista se ha publicado ininterrumpida durante 30 años, mensualmente los primeros cuatro años, bimestralmente los siguientes 21, y trimestralmente desde hace cinco años. Su tiraje promedio ha sido de 3000 ejemplares y actualmente es de 1500. El público al que se dirige son los profesionales y técnicos de la industria eléctrica, así como profesores y estudiantes de instituciones de educación superior; se distribuye en todo México, principalmente a personal técnico

de la Comisión Federal de Electricidad y de Luz y Fuerza del Centro. También cuenta con suscriptores que laboran en empresa eléctricas del continente americano y de algunos otros países europeos y asiáticos.

La estructura de la revista incluía hasta 1998: (1) editorial, donde se comentaba acerca de los aspectos relevantes del tema de portada; (2) tema de portada, sección en la que se presentaba un artículo de divulgación, así como entrevistas con los usuarios o participantes en el tema; (3) aplicaciones tecnológicas, donde se destacaba el campo de aplicación de alguna tecnología particular; (4) tendencias tecnológicas, en el cual se abordaban tecnologías futuras, y (5) artículos técnicos, en los que se presentaban temas dirigidos a los especialistas. Estos últimos tres tipos de artículos eran escritos por investigadores del Instituto.

Todos los artículos eran aprobados para publicación por el Comité Editorial de la revista, integrado por el director del IIE y los directores de las cuatro divisiones técnicas: Fuentes de Energía, Sistemas de Potencia, Equipos Eléctricos y Estudios de Ingeniería. Al final del año se elaboraba una reseña por temas y autores. La revista se publica en Internet desde 1996.

III. Labor realizada (anexos A, B, C y D)

Redactor de Boletín IIE

A mediados de 1981 ingresé al Instituto de Investigaciones Eléctricas como redactor técnico de *Boletín IIE*. Durante los primeros tres años realicé entrevistas y reportajes de divulgación con el fin de dar a conocer los resultados del Instituto en un lenguaje dirigido a público no experto. Los siguientes fueron los temas tecnológicos en los que participé como redactor:

Materiales empleados en la industria eléctrica,

Lodos y cementos utilizados en la perforación de pozos geotérmicos,

Fabricación nacional de aisladores eléctricos,

Telecomunicación por fibras ópticas,

Transformadores de distribución de núcleo de acero amorfo.

Equipos electrónicos industriales,

Estudios experimentales para nuevos diseños de torres de transmisión de energía eléctrica,

Geoquímica e ingeniería en la caracterización de yacimientos geotérmicos,

Materiales metálicos en generadores de vapor de centrales termoeléctricas,

Mapa de vientos de la República mexicana,

Asimilación de tecnología para diseñar turbinas hidráulicas,

Centros de control de energía para el despacho de energía eléctrica,

Combustibles fósiles utilizados en la generación eléctrica,

Energía helioeléctrica,

Transferencia de tecnología de equipos electrónicos,

Asimilación de tecnología para la fabricación nacional de turbogeneradores geotérmicos,

Simuladores para adiestramiento de operadores de centrales termoeléctricas y nucleoléctricas.

Antes de que yo ingresara al IIE no se publicaban artículos de divulgación. En la elaboración de todos estos artículos de divulgación tecnológica conté con el apoyo y

supervisión de investigadores expertos en el campo del tema del artículo. Bajo este esquema fui coautor de uno de los cinco artículos de la serie que publicó el Conacyt en 1983 sobre el Instituto de Investigaciones Eléctricas en la revista Ciencia y Desarrollo: Investigación y desarrollo tecnológico en el campo de las centrales termoeléctricas (anexo B).

Editor de Boletín IIE

De septiembre de 1984 a diciembre 1998, fui el editor de *Boletín IIE*. Mis principales funciones consistían en proponer, con apoyo de investigadores y directivos, el contenido de la publicación, así como redactar el editorial y elaborar el artículo o entrevista de divulgación que se publicaba en cada número o, en su caso, supervisar la redacción del mismo. Realicé esta labor durante 14 años, lo que implicó la elaboración de más de 90 artículos y entrevistas del tema de portada por parte del grupo que colaboraba conmigo. Asimismo, como editor redacté 86 editoriales. A continuación comentaré cinco aspectos de mi función de editor en los que me apoyaron los estudios de la Facultad:

Participación en la selección y orientación de los textos de divulgación

Mi formación académica me permitió entender los objetivos generales del Instituto de Investigaciones Eléctricas y que se me asignará el encargo de editor. Asimismo, me permitió orientar las entrevistas y artículos para subrayar la importancia y beneficios de los temas tecnológicos publicados.

Apoyo a investigadores en redacción técnica y elaboración de artículos técnicos

Otra actividad importante en la que formación académica fue un sólido soporte corresponde al apoyo a investigadores en la elaboración de los artículos, en aspectos relativos a la redacción de los mismos, lo cual abarcaba la gran gama de temas implicados en la generación, transmisión, distribución y uso de la energía eléctrica. Esta labor implicó la realización de talleres para investigadores jóvenes del Instituto acerca de cómo elaborar artículos técnicos. En ellos se trabajaba en la forma adecuada de presentar resúmenes, de elaborar la introducción, de presentar la metodología, de presentar los resultados, de plantear la discusión, de elaborar las conclusiones, los agradecimientos y las referencias. Igualmente di pláticas sobre el tema a estudiantes de ingeniería eléctrica del Instituto Politécnico Nacional (anexo C).

Decisiones editoriales en temas científicos

Durante los catorce años que fui editor, me apoyaba con los autores de los artículos en relación con dudas que se presentaban tanto en cuanto a forma como en relación con el contenido. Sin embargo, en muchas ocasiones, durante los cierres de edición, había que tomar decisiones editoriales, como acortar una frase o resolver una duda de último minuto. La formación académica que recibí fue el fundamento para poder tomar decisiones editoriales en diversos temas técnicos.

Coordinación de redactores

Los conocimientos generales sobre mecánica, termodinámica, física general, electricidad, circuitos eléctricos, electrónica y matemáticas me permitieron asesorar y supervisar a redactores de la revista que no tenían ningún estudio relacionado con la ciencia o la tecnología.

Responsable de la difusión tecnológica institucional

A partir de 1992, fui nombrado jefe del Departamento de Difusión Tecnológica del IIE, puesto que desempeñé hasta 1998. Durante esos años fui el responsable de la política de difusión de la institución, lo cual se me facilitó en gran medida por la experiencia que había adquirido al respecto, en lo cual los estudios en la Facultad, como ya he mencionado, me allanaron considerablemente el camino para poder coordinar y supervisar la elaboración de diversas publicaciones oficiales del IIE: Informe Anual, Informe de Labores, audiovisual institucional, página institucional en Internet, folletos promocionales, exposiciones, relación con prensa, radio y televisión.

IV. Descripción de algunos trabajos realizados (anexo A)

A manera de ejemplo, se comenta brevemente acerca de algunos de los artículos que elaboré y algunos de los números especiales que coordine e idee, junto con las materias que me sirvieron de base para poder llevarlos a cabo.

Telecomunicación por fibras ópticas

En este texto se describe el fenómeno de la reflexión total interna que permite la transmisión de grandes cantidades de información, así como los elementos de transmisión y recepción de un enlace electroóptico, y las ventajas de este medio en instalaciones eléctricas debidas a su inmunidad total a la interferencia electromagnética. Igualmente se describen los principales problemas tecnológicos que enfrentarían los investigadores para diseñar e implantar un enlace experimental por fibras ópticas. En este texto aproveché en particular las clases que tomé en las

materias de “Calor, ondas y fluidos” y “Electricidad y magnetismo”.

Geoquímica e ingeniería en la caracterización de yacimientos geotérmicos

Este artículo, además de mencionar qué es y cómo se explota un campo geotérmico, muestra la manera en que varias disciplinas científicas como la geoquímica, la geofísica y la ingeniería de yacimientos se conjuntan para desarrollar proyectos interdisciplinarios con los que se estudian fenómenos naturales y se obtienen beneficios como la generación eléctrica. Considero que para poder realizar este texto fueron de gran utilidad los conceptos de calor y mecánica de fluidos [“Calor, ondas y fluidos” y “Física teórica II” (termodinámica)] y geofísica (“Física Moderna II”) aprendidos en la Facultad.

Materiales metálicos en generadores de vapor de centrales termoeléctricas

Este artículo aborda un difícil problema tecnológico: el deterioro de los materiales metálicos que se usan en las centrales termoeléctricas, originado principalmente por las condiciones de los combustibles nacionales (alto contenido de compuestos que producen corrosión) y las extremas condiciones de esfuerzos y temperatura a las que se someten dichos materiales. Igualmente en este caso los conceptos de los cursos de “Calor, ondas y fluidos”, “Física Teórica II” (termodinámica) y “Física Moderna I” (radiación y física atómica) me permitieron abordar este tema.

Centros de control para el despacho de energía eléctrica

Este texto es un reportaje donde se describen los programas matemáticos que permiten el plan de operación más económico y confiable del sistema eléctrico mexicano para

satisfacer la demanda de energía eléctrica. Para ello es necesario determinar cuál es la mejor combinación de generación termoeléctrica, hidroeléctrica o nucleoelectrica (Laguna Verde) que satisfaga, momento a momento, la demanda, en función de las características de la red eléctrica nacional. Para preparar este reportaje creo que fueron básicos los conceptos que se enseñan los cuatro cursos de Cálculo Integral y Diferencial, así como en las materias de Electrónica y Circuitos Eléctricos.

Torneo de operadores del Cenace

Los conceptos sobre circuitos eléctricos y electrónica, junto con el oficio que adquirí durante mis primeros años en la redacción de textos de divulgación tecnológica, pude combinarlos para asesorar a colaboradores que no contaban con formación técnica sino más bien periodística, en reportajes como el de un torneo de operadores del Centro Nacional de Control de Energía. En este concurso, técnicos en el manejo de grandes redes de generación y transmisión de energía eléctrica compiten para ver quién resulta más hábil para atender las contingencias de operación de este complejo sistema.

Número especial de aniversario sobre centrales termoeléctricas

En este número especial la mayoría de las materias a las que asistí en la facultad me permitieron planear el contenido con la finalidad de dar a conocer la riqueza y complejidad de los desafíos tecnológicos inmersos en la operación de las plantas termoeléctricas con las que se generan dos terceras partes de la electricidad en México. El número incluye aspectos como la combustión de combustibles con

componentes nocivos, diagnóstico y puesta a punto del proceso de combustión, corrosión de materiales y prevención de fallas, contaminación ambiental, reparación de turbomaquinaria, diseño de sistemas de automatización y control, adiestramiento de operadores por medio de simuladores,

Número especial de aniversario sobre el futuro de la tecnología en la generación, transmisión, distribución y uso de la energía eléctrica

Este número se publicó en 1995 con motivo del 20 aniversario del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Lo orienté hacia el futuro de la generación, transmisión, distribución y uso de la energía eléctrica en México. Destaca el reportaje que realicé acerca de los sistemas eléctricos del futuro, donde se mencionan los principales retos en temas como la generación, las fuentes no convencionales de energía, la operación de las centrales del futuro, la distribución y el ahorro de energía. También se incluye la opinión de los fabricantes de equipos eléctricos, así como la de instituciones de educación superior.

Número especial sobre la historia del Instituto de Investigaciones Eléctricas

En este proyecto, el último que realicé para el Instituto de Investigaciones Eléctricas, se me pidió idear y escribir una monografía especial para conmemorar el 25 aniversario de su creación. En esta edición se informa entre líneas acerca de cómo el Instituto pasó de ser una institución que respondía a necesidades de desarrollo de tecnología nacional a una que sobrevive ahora a través de la venta de servicios por no invertirse suficiente en nuevos desarrollos.

VI. Conclusión: la divulgación tecnológica, un área laboral de la física

La actividad profesional descrita en los párrafos anteriores la llevé a cabo cuando contaba con dos terceras partes de los créditos de la carrera de Física. La asistencia a clases y el trabajo para tareas y preparación de exámenes que realicé en la Facultad para aprobar esos créditos resultaron suficientes para que fuera capaz de redactar textos sobre aspectos tecnológicos, realizar entrevistas con funcionarios del sector eléctrico, apoyar a investigadores en la elaboración de artículos técnicos y coordinar la orientación de las actividades de difusión del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Para hacerlo tuve que alternar con licenciados, maestros en ciencias y doctores en ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica, química y física, entre las principales especialidades. Mi labor la realicé en los años en que el Instituto desarrolló la mayor parte de sus productos tecnológicos. Ese aspecto junto con los años que me mantuve como editor constituye, en mi opinión, una prueba de que el trabajo era de buena calidad, así como lo fue la formación académica que recibí en la Facultad.

Sin embargo, los resultados hubieran sido mejores si hubiera tenido la totalidad de los créditos y, sobre todo, si hubiera tenido claro que me estaba desempeñado en un área laboral de la física. En la Facultad no había información en el ambiente que avalara lo anterior. La idea general que percibí cuando estudié es que los únicos caminos son la investigación y la docencia.

Los estudios de Física abren un fructífero campo en la divulgación científica y tecnológica. No pensaba lo mismo cuando realicé la primera parte de mis estudios. A finales de 1998 tuve que dejar el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Esa coyuntura me llevó a pensar en regresar a la Facultad de Ciencias y terminar la tercera

parte de los créditos que me faltaba. Me lo impedía la creencia de que me había equivocado de carrera y que por eso no me había dedicado a la investigación o la docencia. Sin embargo, tomé la decisión de terminar y de septiembre de 2001 a enero de 2005 cubrí el total de los créditos de la carrera.

Considero importante señalar lo anterior porque al terminar los créditos me di cuenta que no me había equivocado de carrera: si bien no fue ni es mi camino adentrarme en sus inmensas áreas de investigación teórica y experimental, así como de docencia, la física me enamoró a través de la sorpresa, admiración y fascinación que me causan sus fundamentos y aplicaciones y que me llevan a escribir sobre temas relacionados con ella, como el artículo que realicé para la revista *¿Cómo ves?* sobre la información que nos mandan las estrellas a través de su luz (anexo D).

Una vez titulado, ampliaré mis labores en la divulgación de temas de ciencia y tecnología, sobre todo en aquellos campos estrechamente relacionados con la Física, como es el caso de la biología y la medicina. Éstos tienen amplias repercusiones en la sociedad y al concluir la licenciatura considero que cuento con los elementos suficientes para dar a conocer al público en general cuestiones de importancia para su vida futura.

Por último, quisiera señalar que a pesar de que se empiezan a realizar esfuerzos en algunas áreas de la UNAM para darle más importancia a la divulgación científica y tecnológica, considero que la promoción en la Facultad de Ciencias de una visión distinta acerca de la importancia no sólo de ese campo de trabajo, sino de una formación académica sólida en el mismo, contribuiría al avance científico en el país, al promover el estudio de carreras científicas e informar a la sociedad de sus beneficios.

Referencias

1. Hernández Balazar JR. El valor social de la ciencia. El Faro, Universidad Nacional Autónoma de México. 2006, año 5, núm. 62

Anexo A



Sumario

Vol. 7, Núm. 4

julio/agosto de 1983

COMITE EDITORIAL

Guillermo Fernández de la Garza
Pablo Mulás del Pozo
Víctor Gerez Greiser
Eduardo Hernández Gorívar
Eduardo Lobatón González
Francisco J. Plata Olvera
Fernando A. Kohrs Aldape
Héctor Lira Valenzuela

Editor
Luis Enrique Rodeiro

Colaboradores
Mayavel Saborío
Lucía González
Gabriel Nagore

Fotografía
Sergio Ortega
Antonio Requejo

Distribución
Antonio Martínez
Adolfo Rojas
Miguel Ángel Reynoso

Agradecemos la colaboración de:

- Comisión Federal de Electricidad
- Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A.
- Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (CANAME)
- Colegio de Ingenieros Mecánicos Electricistas, A.C. (CIME)

Interior, Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos
Tel. 438-11 ext. 2224 y 2237
Télex 017 3380 INIEME

Leibnitz 14, 3er. piso
Col. Anzures
Del. M. Hidalgo
11590, México, D.F.
Tel. 531-1036

BOLETIN IIE. Es una publicación bimestral. Su distribución es gratuita dentro de la República Mexicana. Aparece la última semana de cada bimestre. Editada por la División de Adiestramiento y Comunicación del Instituto de Investigaciones Eléctricas. El material de este boletín sólo podrá ser reproducido, parcial o totalmente, con la autorización escrita del IIE. Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores. Certificado de licitud de contenido 1044 y certificado de licitud de título 1077. Correspondencia de segunda clase, registro DGC-Núm. 002 0583, características 31932 1412.

Composición tipográfica, formación e impresión
Grupo Edición, S.A. de C.V.
Moras 543-bis, Col. Del Valle,
C.P. 03100, México, D.F.

PROYECTOS ESPECIALES

Desarrollo de tecnología en aisladores para una industria nacional

Fabricación nacional de aisladores sintéticos

1. *La participación del IIE/* Artículo preparado por el Departamento de Difusión/ pp. 128-133.

Dentro de su programa de apoyo a la fabricación nacional, el IIE, a solicitud y en colaboración con Industrial de Aislantes Eléctricos (Indael) y con el apoyo del Programa de Riesgo Compartido del Conacyt, concluyó recientemente el desarrollo de aisladores sintéticos tipo suspensión para líneas de distribución de 25 kilovolts.

2. *La opinión de la empresa/* entrevista con el ingeniero Alfonso Sansores/ pp. 134-139.

El entrevistado describe los antecedentes y las actividades de INDAEL y el grado de desarrollo de los aisladores sintéticos, sus ventajas, su fabricación nacional y su mercado nacional e internacional.

Contextos/ El IIE y la industria de manufacturas eléctricas/ pp. 129-138.
Síntesis de los servicios que el IIE ofrece a la industria.

ARTICULOS TECNICOS

Blindaje efectivo contra descargas atmosféricas/ José Lino Bonilla Sánchez/ pp. 149-154.

Se presentan diversas gráficas y programas digitales basados en el análisis de la geometría del blindaje efectivo y se analiza la existencia de una zona efectiva para la colocación del blindaje. Dichas herramientas son útiles en la verificación, el diseño y la optimación de un blindaje efectivo.

FORO DE COLABORADORES

La interconexión eléctrica centroamericana: Un paso concreto hacia la de México y Colombia/ Alfonso M. S. Silva/ pp.155-160.

En este número se ofrece la segunda y última parte del artículo. En esta ocasión, se analizan algunas características y se estiman algunos parámetros típicos de sistema de base hidroeléctrica de la interconexión centroamericana. Además, se enuncia la energía almacenada, la generación promedio de energía hidroeléctrica y la elección entre ambas. Asimismo, se estudia la factibilidad de extenderla a México y Colombia.

ACTIVIDADES DEL IIE

Sistema de información geotérmica/ Ignacio Sarmina Díaz/ pp. 161-166.

El SIGEO es un sistema computarizado que permite captar, procesar y reproducir la información técnica de tipo digital que genera la Subgerencia de Estudios Geotérmicos, de la CFE.

SECCION ESPECIAL

Boletín IIE/ Informativo/ pp. 145, 146, 147 y 148.

Fabricación nacional de aisladores sintéticos

1. La participación del IIE*

Introducción

Dentro de su Programa de Apoyo a la Fabricación Nacional, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, a solicitud y en colaboración con Industrial de Aislantes Eléctricos (INDAEL) y con el apoyo del Programa de Riesgo Compartido del CONACYT, concluyó recientemente el desarrollo de aisladores sintéticos tipo suspensión para líneas de distribución de 15, 25 y 34.5 kilovolts. Este proyecto permitirá a INDAEL cubrir las necesidades de este tipo de aisladores en el país y competir en los mercados internacionales con un producto de calidad y de bajo costo. Por ahora, la CLyFC ha solicitado 20.000 aisladores que instalará en líneas de distribución de 23 kV. Asimismo, INDAEL sostiene negociaciones con empresas eléctricas de Latinoamérica interesadas en adquirir el producto. El desarrollo de este aislador sintético representa el punto de partida para la fabricación nacional de aisladores sintéticos para tensiones superiores. Actualmente, prosiguiendo con el desarrollo de la línea de aisladores, INDAEL y el IIE realizan un proyecto conjunto para desarrollar aisladores sintéticos de 115 y 138 kilovolts, cuyo diseño interesó a una empresa eléctrica estadounidense que solicitó estos prototipos con el propósito de probarlos.

Funciones y características de los aisladores de líneas eléctricas

Los aisladores que se utilizan en las líneas eléctricas soportan los conductores y los separan eléctricamente de las estructuras de distribución y de transmisión. Se diseñan para que resistan los esfuerzos eléctricos que ocasionan las sobrecargas y los transitorios y para que soporten las cargas mecánicas debidas al movimiento de las líneas. El diseño debe asegurar que los aisladores conserven sus características eléctricas y mecánicas a lo largo de varios decenios de operación, aun en condiciones adversas de contaminación ambiental.

Desde hace 10 años aproximadamente, las empresas eléctricas empezaron a utilizar los aisladores sintéticos en lugar de los aisladores tradicionales de porcelana y vidrio, debido a que las características de los primeros ofrecían mayores ventajas: menor peso (2 kg en comparación con 15 kg de los aisladores tradicionales de 25 kV) y, por consiguiente, mayor facilidad de instalación; de menor precio; mayor resistencia a los daños intencionales (por ejemplo, disparos con armas de fuego). Las características de los aisladores sintéticos permiten su aplicación en líneas de distribución desde 15 kV hasta líneas de transmisión con voltajes mayores a 700 kilovolts.

cumplen la función mecánica y el elastómero, la aislante. La separación de dichas funciones es la razón por la que resultan adecuadas las características de los aisladores sintéticos. Para el mismo peso, la barra de fibra de vidrio soporta tensiones mecánicas superiores a las del acero, por lo que se obtienen diseños muy ligeros. Durante su fabricación, los componentes se ensamblan de manera que el conjunto resista apropiadamente los esfuerzos mecánicos a que estará expuesto. Si el aislador no ofrece, por ejemplo, la resistencia mecánica adecuada, sus herrajes pueden desprenderse durante la operación o puede romperse el sello entre éstos y el elastómero, dejando al descubierto la barra de poliéster con fibra de vidrio, por lo que la humedad penetra en el aislador y ataca a la barra provocando el efecto de electrólisis que da como resultado la formación de ácido en la barra. En estas condiciones la fibra de vidrio se degrada con el paso

Los aisladores sintéticos de suspensión se componen de un núcleo de fibra de vidrio cubierto con un material elastomérico en forma de faldones y de dos herrajes metálicos en los extremos (véase la Fig. 1). La barra de fibra de vidrio y los herrajes

* Informe preparado por el Departamento de Difusión, bajo la supervisión técnica de los ingenieros Javier Espinoza, jefe del proyecto, y Guillermo Rivera, jefe del Departamento de Materiales, de la División de Equipos, del IIE. Agradecemos también las opiniones del doctor Rafael Mier Maza, del INDAEL, S.A.

Enlace experimental de telecomunicaciones por fibras ópticas*

Introducción

Los avances logrados durante los dos últimos decenios en los campos de la optoelectrónica y de las fibras ópticas han convertido a estas pequeñas guías de luz en un medio de amplias posibilidades para transmitir información. Es seguro que, en el futuro, las fibras ópticas contribuirán a satisfacer, con eficiencia y economía, las crecientes necesidades de canales de telecomunicación de las empresas eléctricas. Para ello, será necesario superar varios problemas que limitan la aplicación de las fibras ópticas desde el punto de vista económico, principalmente en enlaces de telecomunicación de larga distancia.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), como parte de sus actividades tendientes a apoyar a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el área de las telecomunicaciones, diseñó un enlace experimental por fibras ópticas que actualmente se instala en la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, en Tula, Hidalgo. Los resultados que se deriven de su operación servirán, a la CFE, como punto de comparación para determinar la conveniencia de la aplicación de este tipo de sistemas de telecomunicación y le proporcionarán además, experiencias que contribuirán a definir el mejor aprovechamiento de esta nueva tecnología en el país.

Necesidad de nuevas opciones de telecomunicación

El proceso de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica incluye múltiples instalaciones interconectadas que se distribuyen en grandes áreas geográficas. Estos sistemas interconectados requieren, para su eficiente operación y administración, de extensas redes de telecomunicación que transmitan, en forma confiable, señales de voz, protección, datos, textos, etc., entre los centros de control, subestaciones, centrales generadoras, puntos de suministro y oficinas administrativas.

* Informe preparado por el Departamento de Difusión, bajo la supervisión técnica del ingeniero Javier Pineda, jefe del proyecto, y del doctor José Tovar, jefe del Departamento de Telecomunicaciones, de la División de Sistemas de Potencia, del IIE.

En México, actualmente, la CFE utiliza como medios de comunicación la telefonía pública, la radio (VHF-UHF), las líneas de alta tensión (sistema OPLAT: onda portadora por línea de alta tensión) y cables especiales (hilo piloto). Sin embargo, debido al crecimiento del sistema eléctrico nacional y a las limitaciones de estos medios de comunicación (dificultades para la asignación de frecuencias, ruido e interferencia, reducida capacidad de transmisión y la saturación del espectro de frecuencias disponible, entre otras), la CFE analiza la aplicación de nuevas opciones de telecomunicación. El objeto de dicho análisis se orienta a la búsqueda de nuevos sistemas que, junto con los medios de transmisión disponibles, le permitan integrar, en la forma más económica, sus redes de comunicación. Entre estas nuevas opciones se encuentran el uso de sistemas

de microondas, las fibras ópticas y los satélites.

Fibras ópticas

La idea de emplear la luz para transmitir información se originó en el siglo pasado. Sin embargo, no fue sino hasta 1960, con la invención del láser, cuando se le prestó mayor atención, ya que la alta frecuencia de la onda portadora (14 GHz) podría permitir la transmisión de una gran cantidad de información. Desde entonces se han logrado importantes avances en el diseño de dispositivos de transmisión, recepción y modulación de luz.

Las fibras ópticas representan el medio más adecuado para transmitir las ondas luminosas. Son delgados filamentos de material dieléctrico transparente (vidrio o

plástico) que pueden guiar y confinar la luz a través de grandes distancias. Se componen de un material interno denominado núcleo, rodeado de uno de menor índice de refracción llamado cubierta.

Debido al fenómeno de reflexión total interna, la luz se propaga a través del núcleo de la fibra óptica, (véase la Fig. 1). Los rayos que penetran por él se reflejan y refractan en la frontera que éste forma con la cubierta, como resultado de la diferencia en los índices de refracción. Al aumentar el ángulo de incidencia, el rayo refractado se aproxima a la frontera y, a partir de cierto ángulo de incidencia llamado ángulo crítico, no existe refracción y la luz se propaga sólo por el núcleo, sufriendo múltiples reflexiones.

Junto con las fibras, un transmisor y un receptor integran fundamentalmente un sistema completo de comunicación óptico. La transmisión de las señales luminosas, a través de las fibras, debe realizarse con el menor nivel de pérdidas (atenuación). El transmisor es básicamente un convertidor electro-óptico que codifica la señal de información eléctrica de entrada (en forma analógica o digital) y la acopla a la fibra óptica mediante dispositivos emisores, tales como el diodo láser de inyección o el diodo emisor de luz. El receptor detecta la señal de luz incidente y recobra la información que contiene. Consta, en general, de un dispositivo detector, un amplificador y filtros de salida.

Además de su gran capacidad de información que les permite adaptarse a la de-

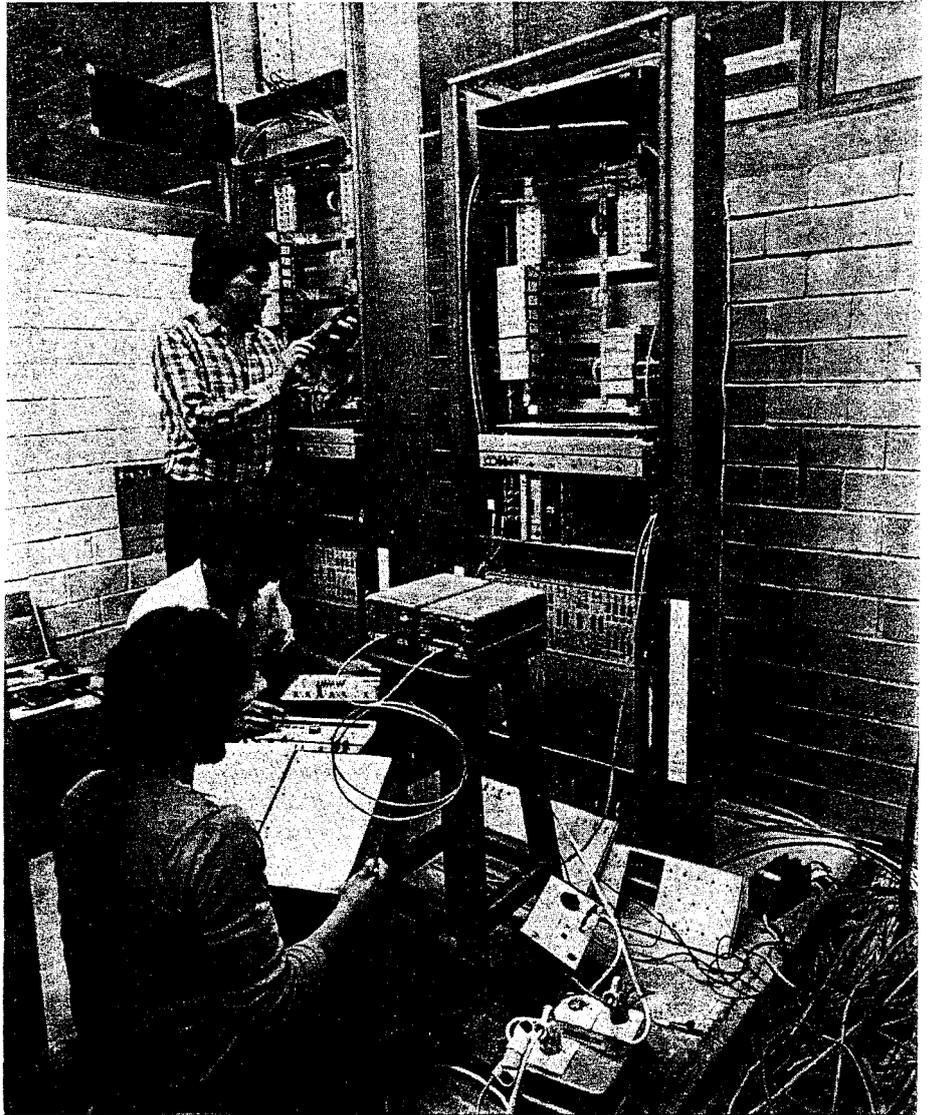
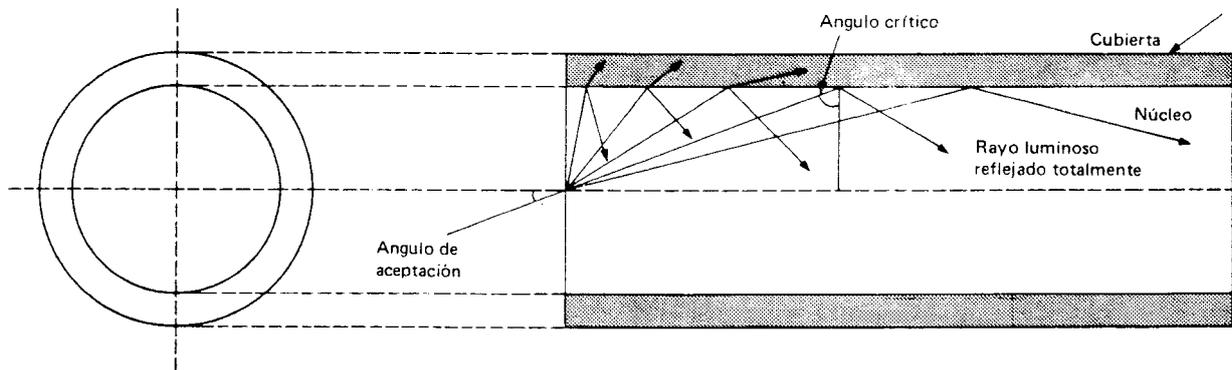


FIGURA 1



El fenómeno de reflexión total interna en una fibra óptica. La luz que incide en la frontera del núcleo y la cubierta con un ángulo mayor que el ángulo crítico θ_c , se refleja totalmente.

manda creciente de canales de comunicación, las fibras ópticas ofrecen ventajas muy importantes sobre los sistemas convencionales que utilizan conductores metálicos como medio de propagación: inmunidad total a la interferencia electromagnética, aislamiento eléctrico y peso muy reducido.

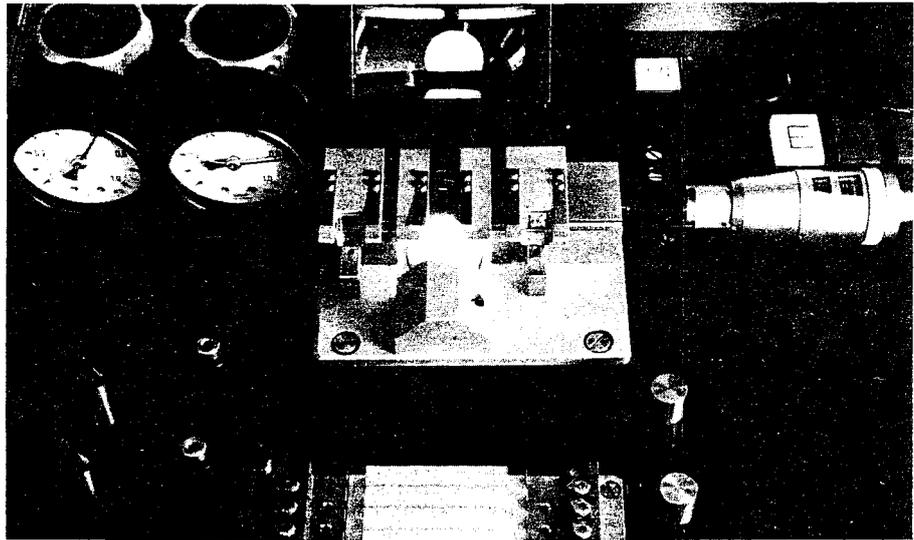
Debido a las condiciones adversas que se presentan en las estaciones eléctricas (campos electromagnéticos intensos, sobrevoltajes, congestionamiento de los ductos trinchera, etc.), los sistemas que utilizan cables ópticos empiezan a tener gran aceptación en el manejo de señales de comunicación y control dentro de dichas estaciones. Asimismo, es un hecho que se emplearán para enlazar subestaciones, plantas generadoras, centros de control y oficinas.

Sin embargo, debido a que las pérdidas por atenuación exigen el empleo de repetidores para regenerar las señales luminosas, por ahora los sistemas de comunicación ópticos no son competitivos económicamente en enlaces de larga distancia (más de 60 km). Su aplicación futura dependerá de la relación entre el costo, la distancia y la capacidad de transmisión, así como de los avances en la óptica integrada. Además, se espera que el desarrollo de dispositivos ópticos que operen con luz de longitud de onda entre 1.3 y 1.5 micrómetros reducirá la atenuación, por lo que resultarán competitivos los enlaces con repetidores separados cada 100 kilómetros.

En enlaces de distancia menor a 60 km, no obstante, las fibras ópticas podrían utilizarse, a corto plazo, si se logra instalar el cable óptico sobre las líneas de alta tensión a un costo atractivo.

El enlace experimental

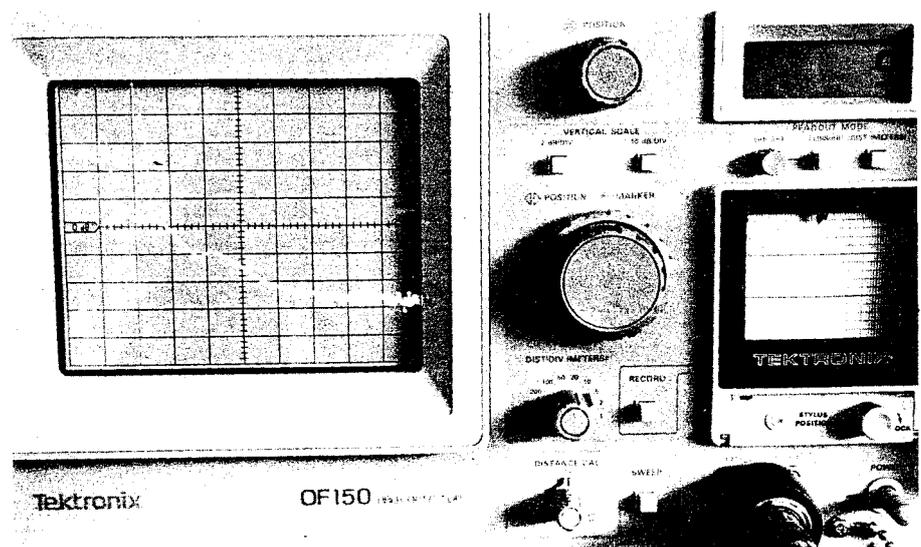
Uno de los objetivos principales de este enlace es evaluar el comportamiento del cable óptico que integrará su parte aérea. Actualmente, el enlace comunica dos puntos de la subestación de la Central Francisco Pérez Ríos a través de 500 m de instalación subterránea dentro de la misma. Para completarlo, se agregarán 1 500 m de instalación aérea sobre la línea de transmisión Tula-Textcoco de 400 kV. Por consiguiente, considerado tanto la instalación subterránea como la aérea, el recorrido de ida y vuelta del enlace será de 4 km. El



Equipo de empalme por fusión. El pequeño diámetro de las fibras ópticas (del orden de $150 \mu\text{m}$) dificulta su empalme, que debe ser preciso para evitar pérdidas en la transmisión de la señal luminosa. Este equipo logra un alineamiento con un margen de error de $\pm \mu\text{m}$ o la colocación exacta de las fibras para el empalme, se efectúa a través de la observación del sistema óptico en la parte central superior.

cable subterráneo incluye diez fibras, en tanto que el aéreo contará con seis. Para la instalación subterránea, se aprovecharon los ductos existentes en la subestación. En la instalación aérea, integrada por tres tramos de 500 m entre las torres, el cable óptico estará sometido a cargas mecánicas severas, a descargas atmosféricas y al ruido inducido por la línea de alta tensión.

El equipo terminal se encuentra instalado en el cuarto de comunicaciones de la subestación y, actualmente, se prueba mediante un circuito formado por el empalme de las diez fibras del cable subterráneo (con este arreglo de prueba, la longitud de enlace alcanza 5 km). El equipo transmisor utiliza un diodo láser que opera en la longitud de onda de $0.85 \mu\text{m}$. A pesar



Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo para medir la atenuación a todo lo largo de una fibra óptica. Mediante su empleo es posible detectar fracturas o fallas de las fibras en cualquier punto.

de que la distancia del enlace no requiera la potencia del láser, se eligió esta fuente de luz porque su empleo presenta problemas más complejos cuya solución proporcionará mayor conocimiento de la operación de los sistemas de comunicación ópticos de larga distancia. El enlace opera con una velocidad de transmisión de 34 Mbit/s para enviar 480 canales mediante modulación por impulsos codificados con un margen de error del orden de 10^{-9} (es decir, un error en mil millones de bits). La parte terminada se ha sometido a pruebas estrictas de funcionamiento con el propósito de que cumpla los requerimientos de los sistemas de comunicación convencionales empleados en los sistemas de potencia.

Instalación aérea

El éxito de un enlace aéreo de comunicación por fibras ópticas de gran longitud que utilice las líneas de alta tensión depende, en gran parte, del comportamiento del cable óptico cuando se somete a cargas mecánicas intensas. Los esfuerzos mecánicos a que se someterían las fibras ópticas en la instalación y durante el tiempo de servicio pueden incrementar los niveles de atenuación y el requerimiento de repetidores. Además, las elongaciones limitan el tiempo de servicio de las fibras, ya que con el paso del tiempo ocasionan que éstas se fracturen. Por consiguiente, es importante considerar estos aspectos para el diseño de los cables de fibras ópticas.

Por otra parte, el cable óptico debe diseñarse también para que resista y proteja las fibras contra los efectos de los sobrevoltajes y las descargas atmosféricas.

Para reducir al máximo los esfuerzos mecánicos sobre las fibras ópticas, se utilizará un cable óptico de diseño especial. Este se compone de un elemento cilíndrico con canales o ranuras helicoidales (véase la Fig. 2). Las fibras se colocan libremente sobre estas ranuras de manera que cuenten con un margen de desplazamiento. Esto, aunado al recorrido helicoidal, proporciona una mayor longitud de las fibras que las mantiene libres de esfuerzos, siendo el elemento cilíndrico el que los absorbe. Los parámetros de este diseño como la profundidad de las ranuras, el diámetro exterior del elemento cilíndrico y la longitud del paso (la longitud de una hélice completa) se definen según la

contextos

contextos

CERTAMENES NACIONALES

Premios a las mejores tesis 1983

Con el afán de promover y estimular la formación de especialistas en el campo de la ingeniería y ciencias afines y de coadyuvar al desarrollo tecnológico del país, se invitó a los alumnos y egresados de carreras profesionales a concursar, mediante la presentación de tesis, opción terminal o trabajo publicado en los niveles de licenciatura y maestría, en el Quinto certamen "Beca Alfredo Christlieb Ibarrola. Diseño y/o fabricación de equipo eléctrico", organizado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), la Sociedad Electromecánica y la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas, y el Quinto certamen sobre sistemas eléctricos de potencia, el Tercer certamen sobre generadores de vapor y el Tercer certamen sobre fenómenos de transporte, convocados por la CFE, el IIE y el Conacyt.

Recientemente, el jurado calificador de cada certamen dio a conocer los ganadores de los premios a las mejores tesis 1983. A nivel licenciatura, el premio consiste, para el primer y segundo lugares, en 55 000.00 y 28 000.00 pesos, respectivamente; una beca crédito del Conacyt para estudios de maestría en la República Mexicana hasta por dos años o beca de especialización técnica por un año y diploma. A nivel maestría, el primer y segundo lugares serán acreedores de 80 000.00 y 45 000.00 pesos, respectivamente, y de una beca crédito del Conacyt para estudios de doctorado en la República Mexicana hasta por dos años o beca de especialización técnica por un año y diploma.

La entrega de premios se efectuará durante la clausura de MEXICON 83, que se celebrará el 25 de noviembre próximo, en el Hotel Casino de la Selva, en Cuernavaca, Morelos.

A continuación, se presentan los resultados de cada certamen y un pequeño resumen de las tesis ganadoras, por considerarlas un aporte más en el campo de la ingeniería.

Beca Alfredo Christlieb Ibarrola. Diseño y/o fabricación de equipo eléctrico*

Nivel licenciatura

Primer lugar

"Simulación en computadora de un transformador de distribución para encontrar su óptimo económico de carga."

Ingeniero José Lino Perpulli Verdugo e ingeniero Leonel Monroy del Río.
Universidad Nacional Autónoma de México.

Este trabajo describe el desarrollo de un modelo matemático que representa la operación dinámica de un transformador de distribución sumergido en aceite y enfriado por

* En este certamen se declararon desiertos el primer y segundo lugares a nivel maestría.

FIGURA 2

Cable óptico con elemento cilíndrico ranurado para diez fibras

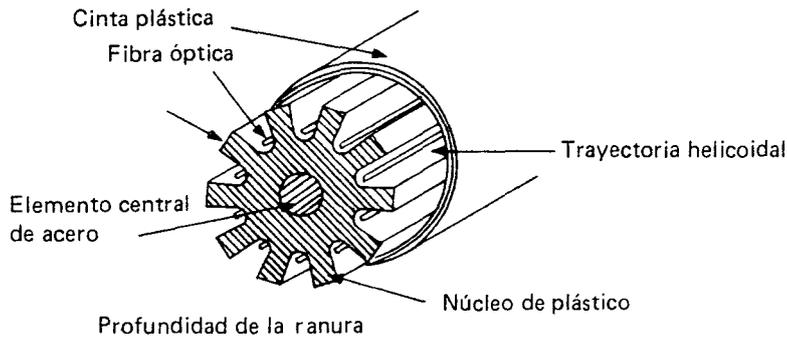
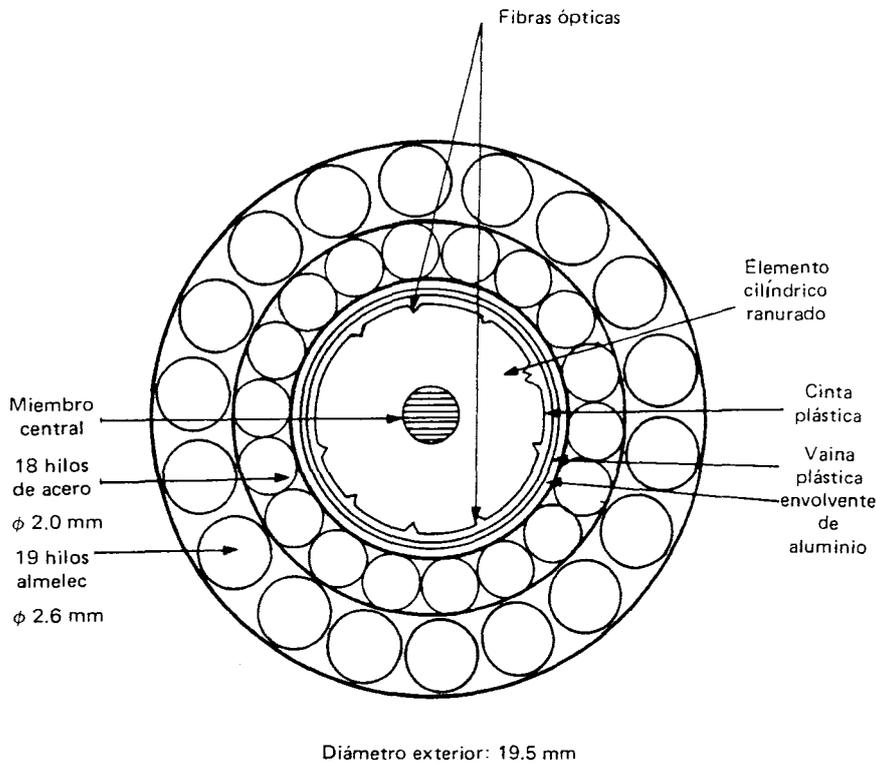


FIGURA 3

Cable de fibra óptica con protección similar a un hilo de guarda convencional



aplicación, de manera que las fibras se sometan lo menos posible a los esfuerzos mecánicos. El cable cuenta además con cubiertas externas que lo protegen contra la humedad, la temperatura y otros agentes externos.

En el enlace aéreo de la línea Tula- Texcoco, el cable óptico se tenderá dentro del hilo de guarda, cuya función básica es proteger las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas. El hilo de guarda contará con dos capas de alambres trenzados en sentido opuesto (véase la Fig. 3) para proteger eléctricamente al cable óptico contra los sobrevoltajes y las descargas atmosféricas. La capa interior consta de 18 alambres de acero y la exterior, de 19 alambres de almelec (aleación de acero y aluminio). Se espera con este diseño que el cable óptico se someta a esfuerzos mecánicos que no superen los niveles permisibles y que las pérdidas por la atenuación sean mínimas. El enlace aéreo quedará instalado a principios de 1984 y se supervisará durante un año. En este tiempo, se medirán los cambios en las pérdidas dependientes de las variaciones de temperatura, las cargas de viento y los efectos de las fallas en la línea.

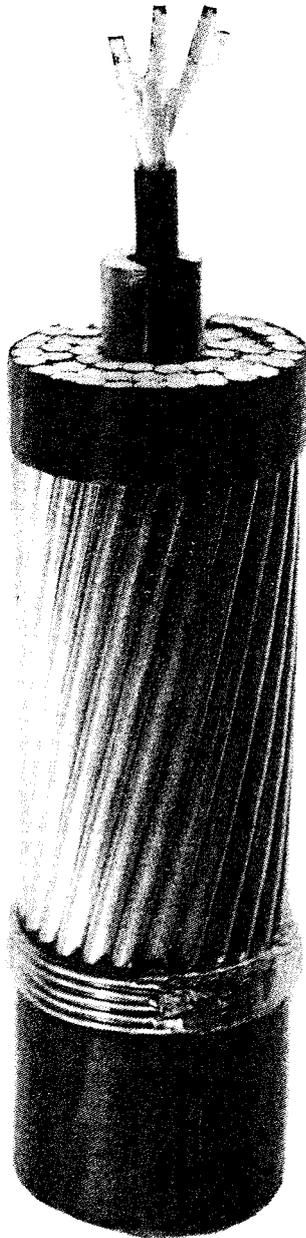
La distancia que cubre el enlace no hace necesario utilizar repetidores. Sin embargo, la investigación se orienta al análisis de enlaces de comunicación entre subestaciones eléctricas localizadas generalmente a más de 40 km de distancia, se instalará un repetidor al final del enlace para estudiar varios esquemas de monitoreo y alimentación eléctrica.

En el desarrollo del proyecto, se han diseñado y adquirido varios equipos ópticos de medición. Se cuenta con equipo para medir niveles de atenuación, potencia óptica, ancho de banda y con equipo de reflectometría. Asimismo, se dispone de un equipo para empalmar las fibras por el método de fusión.

Expectativas

De la evaluación del enlace se obtendrá un marco de comparación preciso que determine, entre los sistemas de comunicación ópticos y de microondas, cuál es el más económico para distancias comprendidas entre 30 y 60 kilómetros, ya que en la actualidad no se cuenta con un medio

exacto de comparación. Se establecerán también modelos estadísticos para precisar el tiempo de servicio que puede esperarse de un enlace aéreo y se logrará un amplio conocimiento tecnológico sobre las fibras ópticas.



Como parte de las actividades, se trabaja en el diseño de equipos terminales y repetidores más adecuados para los sistemas de potencia (menor número de cana-

contextos

→ agua. Dicho modelo se introduce a una computadora digital para analizar el comportamiento del transformador bajo diferentes condiciones y determinar sus costos y carga promedio óptimos. Para ello, se escogió el análisis no lineal que permite al modelo tener validez en una amplia gama de operación.

El modelo matemático planteado consiste en una serie de aseveraciones expresadas en términos lógicos que representan las propiedades esenciales del transformador; éstas se expresan en símbolos y se manipulan según lo requieran las operaciones definidas por una estructura matemática formal.

Segundo lugar

"Simulación de las condiciones ambientales durante las pruebas de equipo eléctrico en una cámara presurizada."

Ingeniero Roberto Liñán García. Universidad Autónoma de Coahuila.

El comportamiento eléctrico de los aislamientos externos se modifica al aumentar la altitud y reducirse la presión atmosférica. La rigidez dieléctrica del aire decrece con el incremento de la altitud y aumenta en función de la reducción de la temperatura. La disminución de la rigidez dieléctrica del aire y las variaciones de humedad traen, como consecuencia, un decremento en los valores de tensión de flameo en los aislamientos. Debido a ello, los parámetros importantes son la humedad absoluta (g/m^3) y la densidad relativa del aire (RAD).

Las especificaciones nacionales e internacionales determinan los factores de corrección por densidad relativa del aire y humedad absoluta, usando un arreglo geométrico de electrodos de campo uniforme (esfera-esfera). En la cámara presurizada con ambiente simulado, se efectuaron las pruebas de flameo simulando descargas atmosféricas a los diferentes tipos de aislamientos externos; se encontró que el factor de corrección por densidad relativa del aire está en función de la configuración del campo eléctrico y de la polaridad del voltaje aplicado, debido a que

contextos

Asimismo, la información sobre el comportamiento del equipo en operación se obtiene a través de la simulación. Los autores, para realizar la simulación, seleccionaron las variables decisivas en la vida útil del transformador, tales como carga, pérdida (cobre y hierro), temperatura ambiente, envejecimiento del aislamiento, tipo de zona de carga, calentamiento y costos.

Los resultados del programa para la operación óptima —con un costo mínimo de un transformador de distribución trifásico, tipo OA— indican que el transformador debe montarse una vez, esperar a que transcurran los 30 años de vida útil para desecharlo y no causarle envejecimiento.

su construcción presenta una distribución de campo divergente. Por tanto, en el caso de los aislamientos externos, los factores de corrección por densidad relativa del aire y por humedad absoluta obtenidos en la cámara presurizada difieren de los sugeridos en las especificaciones.

Por estas razones, es necesario incorporar algunos factores de corrección para la reducción de la RAD y las variaciones de la humedad absoluta para cada tipo de aislamiento externo en dichas especificaciones.

En la tesis, se determinan las variables que influyen en cada tipo de aislamiento, lo que ayudará a optimar su diseño. Algunos de sus beneficios serían la reducción o incremento de las distancias entre partes vivas y tierra en las torres de transmisión; la predicción del comportamiento eléctrico de dispositivos eléctricos en una subestación; las modificaciones al diseño geométrico de aisladores, boquillas, etc. para determinar un límite seguro de altitud y la reducción o incremento general de cualquier distancia crítica en los dispositivos eléctricos. Δ

Enlaces de telecomunicación ópticos en otros países

En el mundo, existen pocos enlaces de telecomunicación experimentales por fibras ópticas en los que el cable óptico se encuentra sobre una línea de transmisión.

La Central Electricity Generating Board (CEGB), de Inglaterra, instaló, en 1981, un enlace óptico que se extiende 21 km en una línea de transmisión de 400 kV. Como hilo de guarda se utiliza un conductor de calibre y peso equivalente diseñado para contener al cable óptico. El sistema de transmisión opera en la longitud de $1.3 \mu\text{m}$ y transporta 480 canales de voz a una velocidad de 34 Mbits/s. A la mitad de la ruta se encuentra un repetidor en una torre de transmisión para simular un enlace de larga distancia. Este sistema es el más adelantado de los existentes y, hasta la fecha, no se ha informado de ningún problema en su operación.

La empresa British International Cable Corporation (BICC) diseñó tres tipos de cable óptico aéreo similares al empleado por la CEGB. Las empresas eléctricas Manitoba Hydro, de Canadá, y Pennsylvania Power and Light Co., de Estados Unidos, prueban en la actualidad enlaces experimentales de telecomunicación con cables ópticos diseñados por la BICC, de acuerdo con los requerimientos de instalación de dichas empresas.

En Japón se instaló, en 1981, un enlace de 1 300 m de longitud que opera en $1.3 \mu\text{m}$. El hilo de guarda se sustituyó, en este caso, por otro conductor que cumple la misma función y cuyo diseño permite introducir y extraer las fibras después de haberlo tendido. Esto facilita el remplazo de las fibras en caso de falla. El objetivo fundamental de este enlace es evaluar el comportamiento del cable óptico, en conjunto, y el de las fibras al introducirse o extraerse.

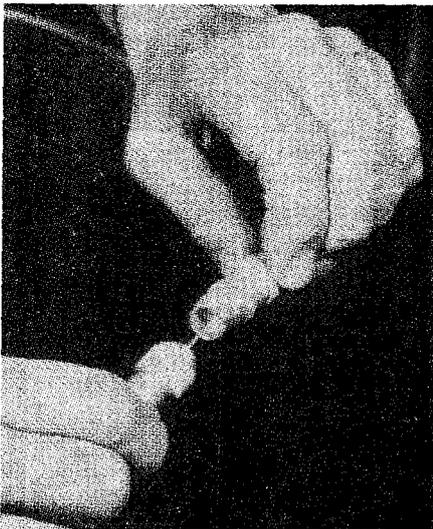
La empresa Electricité de France (EDF) instalará un enlace aéreo que incluirá el mismo tipo de cable que se utilizará en México, es decir, con un elemento central ranurado (en casi todos los demás diseños de cable óptico, las fibras se colocan libremente dentro de un delgado tubo extruido que se extiende alrededor de un elemento central metálico). En este enlace sólo se medirán las características de las fibras y no se evaluará el equipo de transmisión y recepción. El enlace, en una primera fase de investigación, se extenderá 500 m sobre una línea de 500 kV instalada en una región montañosa, en la que el cable se someterá a temperaturas extremas durante el invierno. En la segunda fase se planea que cubra una distancia de 10 kilómetros.

En Suiza se instaló, durante 1982, un enlace de 3.3 km sobre una línea de 50 kV. El cable óptico consta de un elemento central dieléctrico sobre el cual se extienden las fibras ópticas protegidas por una cubierta extruida. Las fibras se cubren con cinta plástica para mantenerlas fijas sobre el elemento central. Este cable sustituye a uno coaxial de telecomunicaciones utilizado dentro del hilo de guarda de la línea.

Un enlace de 1.8 km de longitud sobre una línea de 110 kV comunica, desde 1981, dos subestaciones eléctricas alemanas. El cable aéreo funciona como un conductor de tierra adicional. Sin embargo, no se considera como un cable de la línea de transmisión sino como uno de telecomunicaciones. El equipo de transmisión cuenta con 12 canales que operan a 64 kbits/s en la longitud de onda de $0.85 \mu\text{m}$.

En 1980, se instaló, en Austria, un enlace de telecomunicaciones que utiliza un cable óptico totalmente dieléctrico sobre una línea de 110 kV. En este caso, el cable no se encuentra dentro del hilo de guarda sino unido a él. El sistema comunica dos subestaciones separadas por una distancia de 6 km y cuenta con 14 canales de voz y 14 canales de datos de baja velocidad.

les y mayor distancia entre repetidores). Uno de los problemas importantes que deberán resolverse en este caso será el monitoreo de los repetidores que se alimentan con baterías. Asimismo, se planea diseñar y construir un equipo de medición confiable que, en una sola unidad, permita evaluar todos los parámetros de interés en un enlace de telecomunicación por fibras ópticas, debido a que en la actualidad no existen equipos comerciales de esas características. Dicho equipo servirá de interfaz entre los equipos electrónicos que generan y recuperan la información y los equipos ópticos que la transmiten. Con esto se pretende disponer de una herramienta que facilite tanto las tareas de investigación como las de manufactura.



El conocimiento de la tecnología de fabricación de cables ópticos será otro de los beneficios que se obtendrán del proyecto. Con esa base, existe la posibilidad de transferir a una industria nacional la tecnología de manufactura. La importancia de la fabricación nacional radica en el hecho de que el cable óptico representa cerca de 60% del mercado potencial de los sistemas de fibras ópticas. Asimismo, el empleo de cable óptico nacional podría motivar la normalización de los conectores que se utilizan, lo cual facilitaría las tareas de instalación, reparación y mantenimiento. Las fibras ópticas en el futuro representarán uno de los medios de transmisión de información más importantes en todas las áreas de la telecomunicación y tendrán un importante impacto tecnológico en el ámbito de los sistemas de potencia.

contextos

contextos

Sistemas eléctricos de potencia

Nivel licenciatura

Primer lugar

"Sistema supervisorio para arranque de turbinas en centrales termoeléctricas."
Ingeniero Ramón Francisco Montellano García.
Instituto Tecnológico de La Laguna.

A lo largo de su estudio, el autor desarrolla las especificaciones, el diseño y la implantación de un sistema de supervisión para el arranque de turbinas de centrales termoeléctricas. El sistema se emplea con facilidad y resulta de gran utilidad debido a que su diseño considera las necesidades del usuario y permite seguimientos más confiables del arranque de turbina.

El sistema supervisorio es básicamente una guía de información, desarrollado de acuerdo con principios tales como la secuencia de rodado de la turbina estructurada en fases que se dividieron en pasos elementales y la utilización de técnicas de programación estructurada para definir el contexto del *software* empleado, y la interfase con el operador se basa en principios ergonómicos como número de imágenes, ubicación de la

información, alcance de la interacción, etcétera.

El contenido del trabajo se dividió en la secuencia de arranque, la supervisión computarizada del arranque y la implantación del sistema. El sistema desarrollado se probó y evaluó totalmente en un simulador de centrales termoeléctricas, obteniéndose resultados satisfactorios, al grado que se ha sugerido incluir otras operaciones. Las ventajas de utilizarlo son obtener información completa en una imagen (página/pantalla); evitar cálculos manuales; lograr valores de precisión definida y no aleatoria y tiempos de respuesta que permitan un seguimiento en "tiempo real" de la evolución del proceso; evitar la consulta del manual de operación, en caso de olvido en la secuencia, y garantizar seguimientos confiables durante las etapas de aceleración.

Primer lugar

"Kosmos 1: Simulador digital interactivo para la determinación del estado de operación —quasi— estático de redes de potencia prácticas a través de técnicas numéricas modernas."

Ingeniero J. Aurelio Medina Ríos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El presente trabajo de tesis se basa en el desarrollo e implantación de un simulador interactivo que incorpora como rutina de cálculo los algoritmos de flujo de potencia más utilizados. Los algoritmos incorporan métodos numéricos como las técnicas de dispersidad y lógica poderosa, que permiten resolver sistemas prácticos de gran escala con requerimientos mínimos de computadora y memoria.

El simulador Kosmos 1 está provisto de protecciones contra acciones incorrectas cometidas por el usuario ya sea por error

o en forma intencionada, y de una sección de información o ayuda al operador, que puede llenarse en el instante previo a iniciar el proceso de entrada o modificación interactiva de datos.

En su esquema de trabajo, el autor analiza la formulación generalizada del problema de flujos de potencia, haciendo una clasificación de las variables y tipos de nodos. Asimismo, describe las técnicas iterativas más eficaces en la solución de sistemas de ecuaciones no-lineales. Posteriormente, presenta los algoritmos de mayor relevancia y

Desarrollo de transformadores de distribución con núcleo de acero amorfo*

Las excelentes características magnéticas del acero amorfo, descubierto en forma accidental en 1960, podrían en unos cuantos años revolucionar la industria mundial de los transformadores. Los resultados de pruebas que han obtenido los fabricantes de transformadores, en Estados Unidos y en Japón, indican que entre 1985 y 1986 se dispondrá de transformadores de distribución comerciales, cuyas pérdidas de energía serán cuatro o cinco veces menores que las de las unidades existentes, fabricadas con núcleos de acero al silicio de grano orientado. En varios países industrializados se realizan grandes esfuerzos económicos y tecnológicos para desarrollar transformadores con núcleos de acero amorfo, tanto en lo que se refiere al proceso de manufactura de los núcleos como en lo relativo al mejoramiento de las características del material amorfo con el que se formen.

Con base en los resultados experimentales de estos fabricantes de transformadores de núcleo amorfo, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) decidió estudiar la factibilidad de emplear este nuevo material como un sustituto del acero al silicio que se emplea en México. Para ello se adquirió un núcleo de acero amorfo y se fabricó un transformador de 10 kVA. Los resultados de prueba obtenidos confirman que las pérdidas en el núcleo de este material son extremadamente bajas, comparadas con las del acero al silicio. Por tal motivo, en el Departamento de Materiales, se efectúan actividades adicionales para desarrollar diseños de núcleos de transformadores y técnicas de manufactura que aprovechen las propiedades de este nuevo tipo de material.

Este artículo presenta un breve panorama de la aplicación de las aleaciones amorfas, como materiales magnéticos suaves, en núcleos de transformadores de distribución.

Aleaciones amorfas

La primera síntesis de una aleación amorfa o vidrio metálico, como en ocasiones se le llama, ocurrió en 1960. Los científicos estadounidenses Klement, Willens y Duwez¹ descubrieron accidentalmente que una aleación líquida de oro y silicio, al sobrefriarse rápidamente a la temperatura del nitrógeno líquido, podría convertirse en un sólido amorfo; es decir, que se agruparan sus cristales sin ningún orden

establecido. Sin embargo, transcurrieron doce años más de investigaciones, para que Chen y Polk² produjeran acero amorfo, cuya forma resultara útil y ofreciera una ductibilidad adecuada.

La nueva aleación se desarrolló en el Departamento de Materiales, del centro de investigación de la empresa estadounidense Allied Corporation, y las primeras aplicaciones consideradas se centraron en las propiedades mecánicas y de resistencia de este nuevo grupo de materiales. Entre los usos que se darían a esta aleación estaban las manufacturas de cuerdas para llantas, de hojas de rasurar y de líneas acústicas, así como de materiales resistentes a la corrosión. Sus aplicaciones magnéticas no se consideraron seriamente sino hasta 1974, después de que las pruebas

medidas efectuadas en la Universidad de Pensylvania revelaron las excelentes propiedades magnéticas de una aleación amorfa desarrollada por Allied Corp.³ En la actualidad, estas propiedades magnéticas en los núcleos de transformadores —por ahora, en los de distribución— ocupan el interés principal y aparecen como las de mayor potencial económico.

A partir de esa fecha, la empresa Allied Corp. ha invertido cerca de 70 millones de dólares en el desarrollo de metales amorfos para aplicaciones magnéticas y electrónicas y ha generado 200 patentes internacionales. Es la única empresa que proporciona, en forma comercial, metales amorfos fuera del Japón; 90% de los transformadores prototipo de metal amorfo construidos en todo el mundo incluyen

* Informe preparado por el Departamento de Difusión, bajo la supervisión técnica del ingeniero Guillermo Rivera —jefe—, del físico Ricardo Garza Meléndez —investigador— y de los doctores Subrata Dey y Sukumar Chattopadhyay —investigadores— del Departamento de Materiales, de la División de Equipos, del IIE.

Estudios sobre lodos y cementos utilizados en la construcción de pozos geotérmicos*

Resumen

La perforación y la terminación de pozos geotérmicos tienen una particular importancia en el óptimo aprovechamiento de los campos geotérmicos. Los lodos y cementos utilizados en dichas actividades deben formularse para evitar diversos problemas que retrasan la construcción y que pueden afectar la vida útil de los pozos. Este artículo analiza las funciones de los lodos y los cementos, los problemas que se presentan cuando se formulan incorrectamente, así como los resultados de investigación que el IIE ha logrado para contribuir a su solución.

México cuenta con un potencial geotérmico significativo. Hoy en día, además de Cerro Prieto, se conocen más de 400 zonas con manifestaciones geotérmicas entre las que destacan Los Azufres, en Michoacán, Los Humeros, en Puebla, y La Primavera, en Jalisco. Con base en las observaciones realizadas en estas zonas y los estudios para determinar el potencial geotérmico de Cerro Prieto, la CFE espera contar a finales de siglo con una capacidad geotérmica instalada de por lo menos 2 000 MW. Para ello, serán necesarios alrededor de 300 pozos cuya construcción —a pesar de su semejanza con la de los pozos petroleros— presenta problemas en los fluidos de perforación y en los cementos que se utilizan, ocasionados por las elevadas temperaturas (en algunos casos de hasta 350°C).

Los fluidos de perforación, cuyas características son alteradas por la temperatura, ocasionan problemas que retrasan la construcción, incrementando considerablemente el costo de la misma debido a la renta o la inversión en los equipos de perforación. Actualmente, una hora de perforación cuesta alrededor de 40 000

pesos. Asimismo, de la estabilidad térmica del cemento depende la vida útil del pozo geotérmico.

Tanto los fluidos de perforación como los cementos deben formularse con aditivos de acuerdo con las características de la zona de perforación, que en campos distintos pueden variar significativamente de un punto a otro.

Con el propósito de garantizar una construcción rápida y la mayor vida útil de los pozos geotérmicos, la CFE solicitó al IIE el estudio de los problemas relativos a los fluidos de perforación y a los cementos utilizados. Los resultados de éstos permitieron identificar varios problemas de naturaleza físico-química que repercuten sobre las propiedades de los lodos y cementos y apoyan a la CFE en la cementación de algunos pozos, actividad que anteriormente realizaban compañías extranjeras.

Fluidos de perforación

Los fluidos de perforación se emplean para lubricar y enfriar la barrena, sacar los recortes de perforación y mantenerlos suspendidos cuando las operaciones de construcción se detienen, así como para prevenir el derrumbe de la formación. Los más utilizados son los lodos base bentonita que son una mezcla de arcillas suspendi-

das en agua. Pueden emplearse también aire, gas o espuma como fluidos de perforación, pero resultan más costosos por la inversión del equipo que se requiere y además, en algunas formaciones no pueden utilizarse.

Los lodos se inyectan a través de la tubería de perforación y de la barrena y emergen por el espacio anular exterior. En la superficie se separan las partículas de recorte arrastradas y se reacondiciona el lodo para mantener las propiedades reológicas (viscosidad y punto de cedencia) deseadas. De estas propiedades depende la velocidad del lodo y la capacidad del mismo para acarrear los recortes. Antes de reinyectar el lodo se hace pasar por una torre de enfriamiento para disminuir su temperatura, evitar que pierda agua y mantener estables sus propiedades.

El tiempo óptimo de perforación de un pozo geotérmico de 2 500 m es de 2 a 3 meses. Entre los principales problemas debidos a la inestabilidad de los lodos que retrasan la perforación se tienen la deshidratación por la elevada temperatura, la inestabilidad de las paredes del pozo, la contaminación del lodo con cemento y las pérdidas de circulación.

La deshidratación es la precipitación de las arcillas suspendidas en el lodo por efecto de la temperatura. El lodo se torna

* Informe elaborado por el Departamento de Difusión, con la supervisión de los ingenieros Sergio Mercado y Guillermo Barroso, jefe del Departamento de Geotermia y responsable del Laboratorio de Lodos y Cementos, respectivamente.

Equipos electrónicos industriales desarrollados en el IIE

A la par de la consolidación de la tecnología relativa al diseño y la construcción de equipos de control supervisorio basados en microprocesadores (véase *Boletín IIE*, vol. 5, núm. 8), y aprovechando la infraestructura y experiencias generadas a través del desarrollo de dicha tecnología, el IIE ha abordado otras áreas de la electrónica industrial. Como resultado se han diseñado y construido cerca de 30 equipos que actualmente se encuentran instalados en campo. El objeto de cada uno de estos proyectos ha sido contribuir a satisfacer las necesidades de equipos no fabricados en el país. Entre los equipos desarrollados en el Departamento de Electrónica, de la División de Equipos del IIE, sobresalen —por la importancia de su aplicación dentro del sector eléctrico— el regulador electrónico de tensión alterna (RETA), el digitalizador de señales DPG-100, el controlador programable de secuencias (CPS) y el equipo automático de pruebas para subsistemas electrónicos (EAP). El primero es un ejemplo del desarrollo de una tecnología para fabricar, a nivel industrial, un equipo en el país. Los tres restantes representan equipos concebidos para apoyar a la manufactura en aspectos de prueba y control de calidad.

Regulador electrónico de tensión alterna RETA

Este equipo se desarrolló bajo contrato con la empresa mexicana Reguladores Automáticos, S.A., dedicada principalmente a la fabricación de transformadores y capacitores. Su aplicación se centra en la regulación de la alimentación eléctrica para equipos electrónicos de control automático, computadoras y equipos electrónicos médicos.

Como se sabe, la función de los reguladores de tensión alterna consiste en contrarrestar las variaciones de tensión de la línea de alimentación eléctrica. De tal modo, los reguladores alimentan al equipo

* Informe preparado por el Departamento de Difusión, bajo la supervisión técnica del ingeniero Alejandro Guarda, jefe del Departamento de Electrónica, de la División de Equipos, del IIE.

eléctrico o electrónico con una tensión cuya forma y valor se encuentran dentro de cierto margen adecuado de variación. El regulador debe acondicionar las reducciones y elevaciones sostenidas de tensión y las variaciones de mayor magnitud como en el caso de los transitorios. En situaciones extremas, el regulador debe interrumpir la alimentación eléctrica. La regulación en algunos equipos es indispensable, en virtud de que el valor de su tensión nominal o las variaciones de tensión que pueden tolerar no corresponden al valor nominal de la línea de alimentación ni a las variaciones de la misma. Por ejemplo, muchos equipos electrónicos profesionales operan en voltajes de 115 V y sólo aceptan variaciones de 5% en tanto que el voltaje de línea es de 127 V y sus varia-

ciones, consideradas aceptables, son de 10 a 15 por ciento.

El RETA consta de una fuente de tensión variable alimentada con un autotransformador que produce 12 valores de voltaje diferentes. Un circuito de control integrado por dispositivos electrónicos de estado sólido detecta las variaciones de tensión en la carga y selecciona los valores adecuados de voltaje del autotransformador que al combinarse suplan la diferencia o resten el exceso.

Una característica importante del RETA es que no distorsiona la forma de onda de la tensión que alimenta. Esto sucede en el caso de los reguladores ferromagnéticos que se conectan a equipos

Estudios experimentales de torres de transmisión*

Año con año, se construyen cientos de torres de transmisión para satisfacer las nuevas demandas de energía eléctrica. Los estudios experimentales en modelos a escala reducida contribuirán a lograr diseños más económicos y más confiables de estas complejas estructuras.

Por todo el territorio nacional, las torres de transmisión se suceden para soportar las líneas eléctricas y los hilos de guarda que las protegen contra las descargas atmosféricas. La distancia que separa los centros de generación de los de consumo requiere de un número considerable de estructuras de soporte para poder efectuar el enlace. Sólo a modo de ejemplo puede decirse que para construir la línea de transmisión Chicoasén-Topilejo de 230 kV, que alimenta a la ciudad de México desde el complejo hidroeléctrico Chicoasén-Malpaso, se erigieron 1 000 torres cuyos conductores se extienden por 725 km. En los próximos cinco años, en México deberán construirse miles de torres de transmisión que soportarán alrededor de 15 000 km de líneas eléctricas; la inversión correspondiente sólo a las torres será del orden de decenas de millones de pesos.

Asimismo, la topografía de la República Mexicana es un factor que incrementa el costo de construcción de las líneas de transmisión, principalmente por los problemas relativos al transporte de mate-

riales. Algunas de las torres del sistema eléctrico mexicano son, en el mundo, las que a mayor altura se erigen sobre el nivel del mar.

Ante estas perspectivas, es imperativo llevar a cabo una obra de infraestructura, como lo es la construcción de las torres de transmisión, con los mayores niveles de economía y confiabilidad. El IIE, a través de su Departamento de Ingeniería Civil, de la División de Estudios de Ingeniería, ha colaborado con la Gerencia de Proyectos de Transmisión y Transformación (GPTT), de la CFE, en la optimización de las estructuras de soporte para las líneas de transmisión, desarrollando herramientas computarizadas de análisis y diseño estructural (véase *Boletín IIE*, v. 5, n. 7, julio de 1981). Como complemento y parte imprescindible de este tipo de investigaciones, el Departamento de Ingeniería Civil instaló un Laboratorio de Modelos Estructurales que ya ha producido sus primeros frutos de investigación experimental en torno a torres de transmisión. Con este laboratorio será posible, en el futuro, estudiar —en modelos a escala reducida— el comportamiento de las estructuras utilizadas en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, por ejemplo, cimenta-

ciones de turbogenerador, torres de enfriamiento, contenedores nucleares, etc. Estos estudios proporcionarán el desarrollo de técnicas de análisis y diseño propias que produzcan estructuras más seguras al menor costo.

Estudios experimentales en modelos a escala reducida

Al diseñar una torre de transmisión, se pretende obtener la configuración de la misma que, al mínimo costo y de acuerdo con las condiciones del sitio de instalación, cumpla su función de soporte y resista, durante varios años, todas las cargas mecánicas a las que se someterá (el peso propio de la torre, el de los conductores e hilos de guarda, el efecto del viento, etc.) Por la complejidad propia de las torres de transmisión, se han propuesto diferentes modelos matemáticos de análisis estructural. A través de ellos, se determinan los esfuerzos y las deformaciones que experimentan los miembros, según las características de la torre y las condiciones de carga supuestas. Estos modelos matemáticos se formulan con base en hipótesis relativas al comportamiento de las estructuras y, en consecuencia, deben verificarse experimentalmente para conocer el grado de aproximación con el que reproducen el

* Informe preparado por el Departamento de Difusión, bajo la supervisión técnica del doctor Oscar Hernández Basilio, investigador del Departamento de Ingeniería Civil, de la División de Estudios de Ingeniería.

La geoquímica y la ingeniería en la caracterización de yacimientos geotérmicos*

La integración de diversas disciplinas científicas hace posible desentrañar características de la corteza terrestre, así como conocer y predecir algunos de los procesos que ahí ocurren. Su aplicación en la geotermia contribuye a determinar con un mayor grado de exactitud la capacidad de las centrales eléctricas que aprovecharán parte del calor interior de la Tierra.

Introducción

El desarrollo de un campo geotérmico requiere varios años de estudio antes de que empiecen a funcionar sus primeras unidades geotermoeléctricas. En ese lapso, geólogos, geoquímicos, geofísicos e ingenieros de yacimientos utilizan sus mejores herramientas para investigar el yacimiento. Su objetivo fundamental es determinar la rentabilidad del campo mediante la estimación del contenido de calor o energía disponible, así como conocer el porcentaje que de ésta podría recuperarse y de la velocidad con que puede recuperarse dicha fracción.

Para determinar la fracción de energía recuperable deben perforarse cierto número de pozos. De los fluidos que éstos producen se obtienen datos que permiten determinar parámetros fisicoquímicos de la parte del yacimiento de donde provienen. La integración de la información obtenida de todos los pozos y de otras evidencias recogidas del campo, a través de estudios geológicos, geoquímicos, geo-

físicos y de la ingeniería de yacimientos, permiten estimar las reservas recuperables y, por tanto, la capacidad geotermoeléctrica que será posible instalar. Sólo de este modo se evita subestimar o sobrestimar la capacidad de generación eléctrica instalada que un campo geotérmico determinado puede proporcionar.

Todas estas actividades para caracterizar al yacimiento requieren de una inversión considerable, principalmente las relativas a la perforación. Una forma de contrarrestar el costo de estas inversiones es aprovechar los fluidos de los pozos perforados para producir electricidad, a pesar de que aún se trata de la etapa de estudio, instalando pequeños equipos portátiles a boca de pozo. Este es el caso del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, todavía en etapa de desarrollo inicial y donde la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con cinco unidades de 5 MW a boca de pozo. Estos 25 MW de capacidad provisional de generación eléctrica de Los Azufres, junto con los 180 MW de la central Cerro Prieto, integran los 205 MW geotérmicos, con los que cuenta actualmente la CFE. En los próximos meses empezará a operar la central geotermoeléctrica Cerro Prieto II, con la que la capacidad geotérmica instalada en México ascenderá a 425 megawatts.

El estudio de las características del yacimiento no se realiza sólo para establecer la capacidad de la central geotermoeléctrica sino con el propósito de establecer las estrategias de explotación más adecuadas para lograr un óptimo aprovechamiento del campo geotérmico.

Con objeto de colaborar con la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, de la CFE, en el desarrollo y aprovechamiento de los campos geotérmicos del país, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) realiza estudios relativos a la integración de técnicas geoquímicas, mineralógicas e isotópicas de ingeniería de yacimientos geotérmicos, así como en torno a la petrogénesis de productos magmáticos y a las fuentes de calor o cámaras magmáticas. A partir de estas actividades —en las que concurren diversas especialidades científicas—, se ha logrado una gran cantidad de resultados de utilidad práctica para desentrañar las características de interés de los yacimientos geotérmicos.

¿Qué es un yacimiento geotérmico?

La mayor parte de los yacimientos geotérmicos están formados por rocas calientes saturadas de fluido. Generalmente, la fuente de calor responsable de las elevadas temperaturas del fluido (del orden

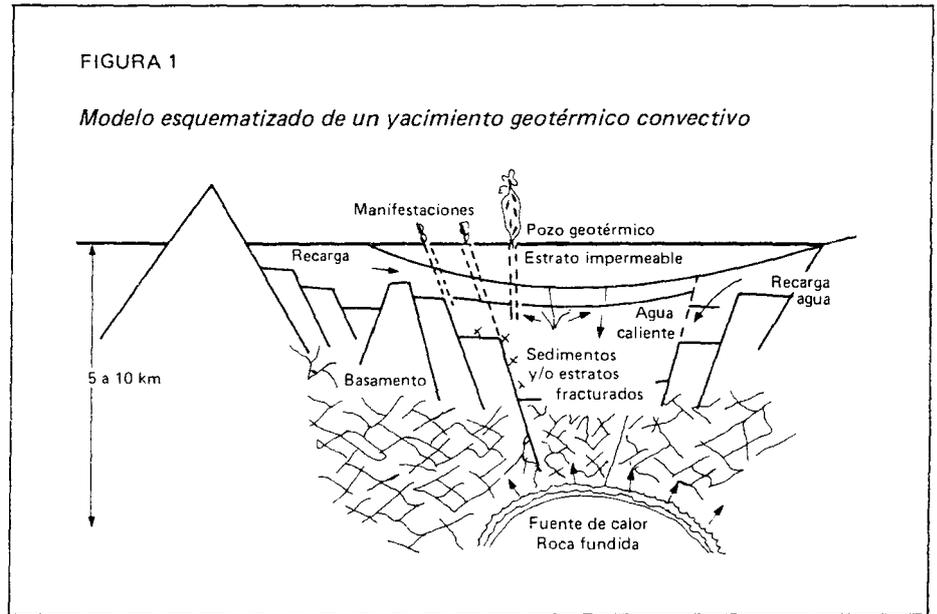
* Informe preparado por el Departamento de Difusión, bajo la supervisión técnica del doctor David Nieva, jefe del Departamento de Geotermia, de la División de Fuentes de Energía, y de los doctores Surendra P. Verma y Eduardo Iglesias, investigadores del mismo departamento.

de entre 200 y 370 grados Celsius en los yacimientos de alta entalpía) es un cuerpo de magma intrusivo que ha ascendido por las fracturas de la corteza terrestre a aproximadamente 10 km o menos de la superficie. Este fenómeno es una consecuencia de las condiciones geológicas creadas por la tectónica de placas y los mecanismos de transferencia de calor en las profundidades de la Tierra.

Brevemente, la tectónica de placas supone que la litósfera consta de varias placas sobre las cuales están sujetos los continentes. Estas placas flotan sobre la roca fundida que se encuentra entre el manto de la Tierra y la litósfera. La distribución de intensas manifestaciones geotérmicas describe, hasta cierto punto, las fronteras de las placas móviles y, por lo general, concuerdan con las regiones de volcanismo reciente y de formación de montañas jóvenes.

Los fluidos del yacimiento pueden ser salmuera o vapor de agua mezclado con gases de origen telúrico. Al ocupar los poros y fracturas (o grietas) de las rocas, estos fluidos geotérmicos hacen del yacimiento una especie de esponja y representan un medio para rescatar una porción mínima del calor interior del planeta. Dichos sistemas reciben el nombre de *convectivos* y pueden ser de vapor dominante o de líquido dominante (véase la Fig. 1). A este tipo de yacimientos, llamados también hidropresurizados, pertenecen los que se encuentran bajo explotación o en desarrollo en la República Mexicana (véase la Fig. 2). Al llevar el fluido geotérmico a la superficie, mediante pozos perforados a profundidades menores de 5 km, una parte del mismo se evapora instantáneamente por el cambio de presión. La energía eléctrica se genera mediante el vapor desprendido del fluido de los pozos que ocasiona el movimiento de una turbina.

Existen otros tipos de yacimientos geotérmicos, pero que no son tan comunes como los sistemas convectivos. Los *radiogénicos* se distinguen por la fuente térmica: el calor liberado por el decaimiento de elementos radioactivos muy concentrados en forma anómala en ciertos puntos de la corteza terrestre. Los yacimientos de *roca seca caliente* tienen como fuente de calor un cuerpo de magma intrusivo. Sin embargo, la roca es impermeable a los fluidos y por ello no han



logrado filtrarse. La roca está caliente y seca. El potencial de este tipo de yacimientos es considerable. En Estados Unidos y en Inglaterra se realizan experimentos que apuntan hacia la creación de yacimientos artificiales, en los que la

energía se extraería de la roca seca caliente, inyectando agua desde la superficie. Se ha demostrado la factibilidad técnica de esta idea; empero, no se cuenta aún con la tecnología para completar el cuadro que haga económica tal posibilidad.

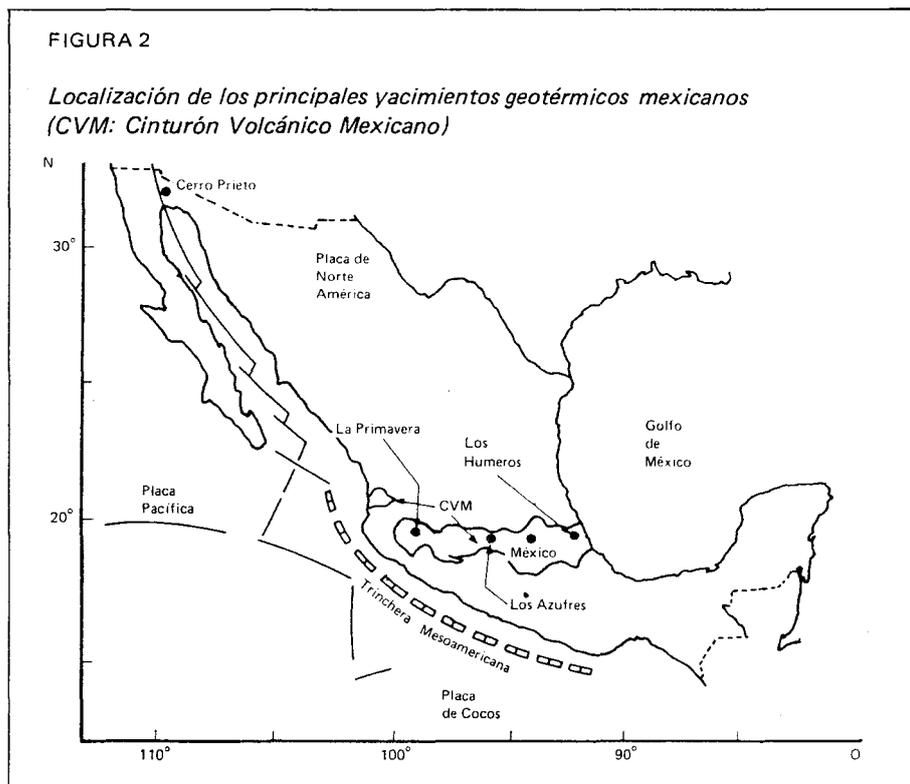
contextos

contextos

Convenio de cooperación sobre investigación en ingeniería de yacimientos entre el DIPUS y el IIE

Este convenio fue acordado con el propósito de establecer un programa permanente y activo de cooperación e intercambio científico en esta rama de la investigación geotérmica, así como para mejorar la capacidad técnica de ambas partes. El Departamento de Ingeniería Petrolera, de la Universidad de Stanford (DIPUS), centro reconocido mundialmente por sus investigaciones, estableció un programa de investigación geotérmica bajo los auspicios del Departamento de Energía (DOE: Department of Energy) de Estados Unidos. El convenio entre el DIPUS y el IIE se enmarca dentro de dicho programa.

Desde el inicio de este convenio, firmado a finales de 1980, se han realizado ocho reuniones formales donde se planteó el trabajo conjunto y se analizaron los resultados obtenidos. Para complementar dichas reuniones, se realizaron dos simposios por temas. De tal modo, en la cuarta reunión, realizada en mayo 27 de 1982, en la Universidad de Stanford, se efectuó conjuntamente la presentación de tres trabajos de los participantes del IIE en el Seminario del programa de geotermia de la Universidad de Stanford. Asimismo, las reuniones convenidas durante 1983 en Cuernavaca, Morelos, se complementaron con el Primer y Segundo simposios



Los yacimientos *geopresurizados*, cuya fuente de calor puede o no ser un cuerpo de magma intrusivo, se diferencian de los sistemas convectivos o hidropresurizados sólo en su génesis. Aquéllos son el resultado del hundimiento de sedimentos que contienen agua, provocado por procesos geológicos normales. La extensión de estos sedimentos puede alcanzar varios kilómetros de diámetro y cientos de metros de espesor. Esta "esponja" de sedimentos se sella durante el proceso por el efecto de la depositación de sales, de tal modo que el agua no puede escapar. Conforme se hunde la formación, aumenta la presión que ejerce el peso de la roca que la esponja de sedimentos sostiene. La presión puede llegar hasta más de 10 000 atmósferas, valor que sería suficiente para accionar turbinas hidráulicas en la superficie. La tecnología que posibilite la explotación económica de los yacimientos geopresurizados, en los que además existe metano, todavía está por desarrollarse.

Inicio del desarrollo del campo y determinación de su rentabilidad

Ha concluido la etapa de exploración de un campo geotérmico y principia su desa-

rollo; es decir, se ha encontrado una zona con o sin manifestaciones superficiales y se han realizado estudios geológicos, así como diversas mediciones geoquímicas y geofísicas que señalan la existencia de un yacimiento geotérmico; además, se ha perforado, al menos, un pozo geotérmico que produce fluidos de alta temperatura. ¿Cómo conocer los aspectos que determinarán la rentabilidad del campo?, es decir, ¿cómo determinar las reservas de fluido y calor *in situ* del yacimiento, así como la magnitud de la energía que puede recuperarse al explotarlo y la velocidad con que puede extraerse dicha energía?

Las reservas de fluido y calor *in situ* del yacimiento pueden conocerse básicamente determinando, por un lado, su geometría y tamaño y, por otro, su porosidad (el volumen disponible para el fluido) y la distribución de temperaturas. La productividad del yacimiento dependerá de la facilidad con que pueden moverse los fluidos a través de los poros o fracturas de la formación, o sea, de su permeabilidad.

Restan aún dos preguntas importantes relativas al modo de aprovechamiento

del yacimiento, la existencia y las características de fluidos de recarga y la estrategia de explotación.

La recarga produce fundamentalmente dos efectos sobre el yacimiento. Por una parte, contribuye a mantener la presión en el yacimiento al suplir los fluidos que se le extraen durante la explotación. Por otra, en su trayecto y durante su permanencia en la formación, extrae calor de las rocas antes de volver a la superficie a través del pozo. Se calcula que en un yacimiento geotérmico cerca de 90% del calor total se encuentra almacenado en la roca y el resto en los fluidos. De tal modo, que al extraer la totalidad de los fluidos geotérmicos sólo se recuperaría 10% del calor total. De ahí la importancia de la recarga que, en suma, determina que el yacimiento sea más atractivo desde el punto de vista económico, al permitir explotarlo durante mayor tiempo. Para esto último, es relevante tanto la magnitud de la recarga como su temperatura.

La reinyección de la salmuera geotérmica que después de utilizarse en la superficie para obtener el vapor tiene que desecharse, es en sí una recarga artificial y puede servir para ejemplificar las diversas estrategias de explotación. La temperatura de la salmuera de desecho puede ser hasta de 150°C, aproximadamente. Al reinyectarse a esta temperatura, se estará aprovechando parte de la energía rescatada de las profundidades aún contenida en dicha salmuera. De este modo, el yacimiento se recarga y recupera parte de su energía calorífica y, por tanto, tardará más tiempo en enfriarse (cuanto mayor sea la temperatura del fluido que entra en contacto con la roca del yacimiento, tanto menor será la cantidad de calor que ésta entregue).

Otra opción para aprovechar la energía contenida en la salmuera a 150°C es, si conviene desde el punto de vista económico, utilizarla para producir más vapor mediante un cambio de presión; el vapor de esta segunda etapa puede generar una cantidad adicional de energía eléctrica. La unidad de Cerro Prieto, diseñada por el IIE en colaboración con personal de la CFE, trabaja con base en este principio y produce 30 de los 180 megawatts de generación eléctrica de dicho campo.

En busca de algunas evidencias que caracterizan un yacimiento geotérmico

Geoquímica

A través de la información que brindan las técnicas geoquímicas y de la obtenida en otras líneas de investigación, se determina la distribución de temperaturas en el yacimiento, la geometría del mismo, la posible ocurrencia de mezcla de fluidos geotérmicos con aguas suprayacentes y la separación de fases en el yacimiento.

Una de las primeras actividades que se efectúan en la etapa de desarrollo de un campo geotérmico es el análisis químico de los fluidos del yacimiento. Por medio de dicho análisis, con la ayuda de técnicas geotermométricas, se consigue información relativa a las temperaturas en la profundidad.

Las técnicas geoquímicas se emplean también en la interpretación de los rasgos de alteración hidrotermal, en función de

la profundidad de los compuestos minerales de las rocas del yacimiento. A partir de ahí, se delimitan intervalos de ciertos parámetros físico-químicos (fugacidades de oxígeno, de ácido sulfhídrico, de dióxido de carbono, temperatura y presión).

Con el empleo de la técnica de isótopos estables es posible empezar a tratar de determinar el origen superficial del líquido del yacimiento. Es decir, la existencia de un cuerpo de agua en la superficie que probablemente lo siga alimentando. Este es un aspecto importante puesto que significa la probabilidad de que exista una recarga que asemeje un pistón hidráulico que empuje el fluido caliente hacia la superficie, lo cual se relaciona directamente con la longevidad del yacimiento geotérmico.

Asimismo, en la etapa de desarrollo es factible empezar a tratar de detectar, mediante métodos geoquímicos, fenómenos de mezcla de distintos fluidos del yacimiento o de alguno de éstos con fluidos suprayacentes. Estos últimos, por lo gene-

ral, están diluidos, son fríos y es probable que su composición isotópica sea distinta a la de los del yacimiento. En particular, los fenómenos de mezcla con fluidos suprayacentes son un indicio temprano de posibles problemas en el futuro, porque necesariamente al explotar el yacimiento su presión tenderá a disminuir, lo que puede ocasionar la penetración del fluido suprayacente con la consiguiente reducción de las reservas de calor.

En una etapa avanzada del desarrollo del campo, la geoquímica de isótopos estables, así como la química de los gases no condensables pueden aplicarse para modelar posibles fenómenos de separación de fases en el yacimiento. Estos pueden inducirlos la explotación o pueden presentarse en forma natural, como sucede en el campo de Los Azufres. En este campo de líquido dominante ocurre una separación de fases en el sistema en estado natural y el vapor producido sigue trayectorias determinadas por accidentes de fracturas en el yacimiento hasta acumularse en ciertas zonas.

contextos

del convenio de cooperación IIE-Stanford. En estos simposios se presentaron 14 trabajos y los participantes, entre los cuales se contó con la presencia de personal de la CFE, tuvieron oportunidad de conocer en detalle los laboratorios del Departamento de Geotermia, del Instituto.

A continuación se ofrece la lista de publicaciones realizadas por los investigadores de ambas partes, como una muestra de los logros alcanzados en este convenio.

Publicaciones*

Arenas, A., E. Iglesias, G. Izquierdo, R. Guevara, R. Oliver y S. Santoyo, "Effects of Contamination by Geothermal Drilling Mud on Laboratory Determinations of Sandstone

* Las personas interesadas en recibir copias de estos trabajos pueden dirigirse al doctor E. Iglesias, al Instituto de Investigaciones Eléctricas, Apartado Postal 475, Cuernavaca, Morelos, 62000, México.

contextos

Pore Properties" (Efectos de contaminación de los lodos de perforación geotérmica en la determinación en el Laboratorio de las Propiedades de Poro de Areniscas), *An Evaluation Proceedings Eighth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, dic. 1982, pp. 205-210.

Breitenbach, K.A. y R.N. Horne, "Evaluation of Chemical Tracers for Geothermal Use" (Evaluación de trazadores químicos para uso geotérmico), *Fourth New Zealand Geothermal Workshop*, Auckland: nov. 1982.

Castañeda, M., A. Abril, V. Arellano y R. Márquez, "Reservoir Simulation Studies on the Cerro Prieto Geothermal Field" (Estudios de simulación de yacimientos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, resultados preliminares), *Proceedings Eighth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, dic. 1982, pp. 231-236.

Castañeda, M. y R.N. Horne, "Location of Production Zones with Pressure Gradient Logging" (Localización de zonas de produc-

contextos

ción mediante perfilado de gradiente de presión), *Geoth. Res. Council Transactions*, vol. 5, 1981, pp. 275-278.

Castañeda, M., A. Abril, V. Arellano y R.L. McCoy, "Well Log Analysis Applied to Cerro Prieto Geothermal Field" (Análisis de perfilados aplicado al campo geotérmico de Cerro Prieto), *Proceedings of the Seventh Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, pp. 29-34.

Castañeda, M. y R.N. Horne, "Location of Production Zones in the Pressure Gradient Logging" (Localización de zonas de producción mediante el perfilado de gradiente de presión), *Geothermal Resources Council Annual Meeting*, Houston: oct. 1981.

Castañeda M., R. Márquez, V. Arellano y C.A. Esquer, "Reservoir Simulation on the Cerro Prieto Geothermal Field": A Continuing Study" (Simulación de yacimientos en el campo geotérmico de Cerro Prieto), *Proceedings, Ninth Workshop on Geothermal*

Estas técnicas geoquímicas ayudarían a distinguir, por ejemplo, un caso como el anterior de otro en el que la separación de fases ocurriera por causa de la explotación. En este último caso, un pozo podría empezar a producir una mezcla rica en vapor, pero por efecto de una baja permeabilidad de su zona de alimentación. Debido a la permeabilidad reducida, el líquido del yacimiento no puede ocupar el espacio del fluido saliente y como respuesta natural del sistema para mantener la presión, se separa vapor a expensas del calor de la roca. La precipitación de sólidos, como la sílice amorfa, es una consecuencia de la separación de fases que en un término de varios años puede provocar la obturación.

En este tipo de situaciones, la geoquímica puede contribuir a establecer la estrategia de explotación más adecuada. El decremento de la permeabilidad de las zonas de alimentación de pozos, que no necesariamente ocurre en todos los casos, se incrementa con el nivel de producción. Al detectarse el problema en un pozo determinado, mediante la técnica geoquímica, podría realizarse un balance utilitario para establecer la estrategia adecuada de explotación. Esto es, considerar diferentes opciones, tales como reducir la producción para disminuir el bloqueo; continuar con la misma tasa de flujo y después reperforar, buscando una zona de alimentación de buena permeabilidad, o estimular el pozo por medios químicos o mediante fracturamiento hidráulico.

Ingeniería de yacimientos

Perfiles de presión y temperatura de pozos

Esta es una de las herramientas típicas de la ingeniería de yacimientos. El perfil de temperatura, a lo largo del pozo, define la calidad del recurso geotérmico. No sólo interesa determinar la temperatura en el fondo del pozo, puesto que no necesariamente es ahí donde se encuentran los fluidos más calientes. Podría ocurrir que existan varias zonas de alimentación y es posible que alguna de ellas no esté en el fondo. Es factible también que a lo largo del pozo existan entradas de agua fría, cuyo conocimiento mediante el perfil de temperaturas permitiría bloquearlas.

Del mismo modo, los perfiles de pre-

sión arrojan bastante información del propio yacimiento. Por ejemplo, la localización de zonas de entrada del fluido. Además, si se presentan varias zonas de alimentación a lo largo del pozo, los perfiles de presión y temperatura pueden determinar los posibles flujos convectivos entre dichas zonas, que ocurren por efecto de las diferencias de presión y temperatura, aun cuando está cerrado el pozo.

Pruebas de presión

Las pruebas de presión son una de las herramientas más utilizadas para obtener datos que conduzcan a la caracterización del yacimiento. Se realizan en un solo pozo o en varios a la vez y consisten en un cambio repentino del gasto del pozo. Como resultado, se genera un cambio de presión transitorio en el yacimiento. El cambio de la presión, que se mide en el fondo del pozo, se relaciona directamente con la porosidad y con la permeabilidad del área de influencia o alimentación del pozo en el que se efectúa la prueba.

Pruebas de trazadores

Estas pruebas tienen por objeto monitorear el flujo del fluido geotérmico dentro del yacimiento entre uno o más pozos. Fundamentalmente, consisten en inyectar fluido (por lo general, salmuera) marcado con un trazador, que puede ser un compuesto químico o un elemento radioactivo. De este modo, se distingue el fluido marcado con el trazador del contenido en el yacimiento. Con estas pruebas es posible determinar si ciertas zonas del yacimiento están conectadas hidráulicamente por fracturas, así como caracterizar la geometría de las mismas y determinar el efecto dispersivo de la formación sobre los trazadores. Indican también la fracción de producción de un pozo que proviene de la zona de alimentación de otro.

Su aplicación principal se relaciona con la reinyección de las salmueras de desecho, operación que puede provocar efectos favorables —en cuanto a mantener la presión o a extraer la energía almacenada en la roca—. Sin embargo, la temperatura de la salmuera reinyectada es, en general, mucho menor que la imperante en el yacimiento. Aun cuando se reinyecte salmuera fría lejos de zonas productoras, la existencia de fracturas puede ocasionar interferencia térmica.

Por medio de las pruebas de trazadores puede determinarse la distancia mínima a la que la reinyección no provocaría interferencia térmica, incluso en el caso de que el terreno estuviera fracturado. El fluido reinyectado tendría tiempo de calentarse lo suficiente antes de llegar a la zona de alimentación.

Curvas de producción

A través de éstas, se relaciona el gasto del pozo con la presión del flujo en el cabezal. En casi todos los pozos de alta entalpía, por lo general, el flujo se evapora instantáneamente ("flashea") en su trayecto hacia la superficie. Por tanto, se obtienen tres tipos de curvas de producción, de líquido, de vapor y de una mezcla de ambos. Las curvas se generan midiendo diversos gastos con sus correspondientes presiones, una vez que el pozo se ha estabilizado después de cambiar el gasto.

Esta técnica brinda información tanto del pozo como del yacimiento. Las curvas de producción interpretadas con las técnicas tradicionales sólo proporcionan información cualitativa cuando se compararan las correspondientes a diferentes pozos. Sin embargo, en el IIE se ha desarrollado una metodología que permite obtener información cuantitativa sobre el pozo y el yacimiento, a partir de las curvas de producción.

Propiedades físicas de las rocas del yacimiento

Las características petrofísicas de las rocas del yacimiento representan otra parte de información fundamental para evaluar las reservas y la productividad del yacimiento. Las propiedades petrofísicas de mayor interés que se determinan en el laboratorio son la densidad, la compresibilidad, la permeabilidad, la porosidad, la conductividad térmica y la difusividad térmica.

El IIE cuenta con laboratorios que son muestra de los avances logrados en torno a la determinación de las propiedades mencionadas, así como a la influencia de la presión y temperatura sobre las mismas.

Además de las determinaciones de laboratorio, es posible obtener información importante sobre las características petrofísicas de las formaciones del yacimiento mediante la utilización de los denomina-

dos "registros eléctricos". Este tipo de complejos registros geofísicos se basa en la utilización de una diversidad de leyes físicas bien conocidas que permiten caracterizar una cantidad de propiedades de las formaciones, mediante el perfilado de las mismas. Usualmente, éste se realiza, introduciendo en los pozos instrumentos especiales que se hacen subir o bajar en el interior de los pozos. Los instrumentos registran diversas magnitudes físicas (por ejemplo, voltajes, corrientes e intensidad de radiación) para cada profundidad. Los perfiles se correlacionan y analizan posteriormente para extraer de ellos información petrofísica accesible. El empleo de estas técnicas en la geotermia ha tropezado con problemas derivados de las altas temperaturas existentes en muchos pozos geotérmicos. Por ello, en la actualidad, existe gran interés por adaptar las técnicas conocidas para su aprovechamiento a altas temperaturas.

Simulación numérica de yacimientos

Toda la información obtenida a partir de

los estudios geológicos, las evidencias geoquímicas, mineralógicas e isotópicas, junto con la que proveen las técnicas de la ingeniería de yacimientos, se integran para modelar matemáticamente el campo geotérmico. Del análisis de dicho modelo, pueden determinarse las reservas de fluido y calor y la existencia de zonas de recarga, así como la respuesta del yacimiento a diferentes modos de producción.

Por lo general, se utilizan dos tipos de modelos, el *modelo de dimensión cero* y el *modelo de parámetros distribuidos*. En el primero, se supone que todos los parámetros fisicoquímicos del yacimiento son homogéneos; así, presión, porosidad, permeabilidad, temperatura, etc., son las mismas en todos los puntos del yacimiento y sólo cambian con el tiempo. El yacimiento asemeja a una caja negra de cierto volumen de roca, que presenta determinada recarga y que produce una cantidad específica de fluido. Se establecen las ecuaciones diferenciales para esta caja negra y con ello se obtiene el comportamiento global del campo ante diferentes estrategias de explotación. Esta técnica

es conveniente como primer paso en la tarea de reproducir con mayor fidelidad el yacimiento.

En el segundo, el *modelo de parámetros distribuidos*, el yacimiento se considera en forma más realista. En este caso, el modelo se elabora considerando las *distribuciones* de temperatura, porosidad, permeabilidad, presión, etc., propiedades que realmente varían con la posición en el yacimiento y con la geometría. Esta última se considera en mayor detalle y, del mismo modo que en el caso del modelo de dimensión cero, se toman en cuenta condiciones iniciales y de frontera. Con el modelo de parámetros distribuidos puede analizarse el comportamiento del yacimiento para distintas configuraciones de distribución de pozos. La reproducción del comportamiento del campo se acerca más a la realidad con dicho modelo. Para utilizarlo se requieren computadores de alta velocidad, en las que se ponen en práctica el conjunto de programas que representa el modelo e integran lo que se denomina un simulador numérico de yacimientos.

contextos

Reservoir Engineering, Stanford University, dic. 1983.

Contreras, E., E. Iglesias y J. Sánchez, "High-Temperature Permeability Studies of Cerro Prieto Cores" (Estudios de permeabilidad en alta temperatura de núcleos de Cerro Prieto), *Proceedings Fourth Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field*, Guadalajara: ago. 1982 (en impresión).

Contreras, E., E. Iglesias y F. Bermejo, "Effects of Temperature and Stress on the Compressibilities, Thermal Expansivities and Porosities of Cerro Prieto and Berea Sandstones to 9000 psi and 280°C" (Efectos de la temperatura y de la presión de confinamiento sobre compresibilidades, expansividades térmicas y porosidades de areniscas de los campos geotérmicos de Berea y de Cerro Prieto a 9000 psi y 280°C), *Proceedings Eighth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, dic. 1982, pp. 197-203.

Contreras L., E., "Thermal Expansion Beha-

contextos

viour of Cerro Prieto Sandstones and other Sedimentary Rocks under Stress" (Comportamiento de la expansividad térmica bajo esfuerzo de areniscas de Cerro Prieto y de otras rocas sedimentarias), *Proceedings, Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, dic. 1983.

Contreras, E.A., E.R. Iglesias y F. Bermejo, "Laboratory-measures Physical Properties of Cerro Prieto Rocks. A Review of Early Work and Presentation of New Datas" (Propiedades físicas de rocas de Cerro Prieto medidas en el laboratorio: Revisión de trabajos anteriores y presentación de nuevos datos), *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 8, 1984 (en edición).

Counsil, J.R. y H.J. Ramey, Jr., "Effects of Vaporization and Temperature in Gas/Liquid Relative Permeability Experiments" (Efectos de la vaporización y la temperatura en experimentos de permeabilidad relativa con gas/líquido: Estado de avance), *Society*

contextos

of Petroleum Engineers Journal, feb. 1982, pp. 108-116.

Economides, M.J., D.O. Oghe, F.G. Miller y H.J. Ramey, Jr., "Geothermal Steam Well Testing: State of Art" (Pruebas en pozos geotérmicos productores de vapor), *Journal of Petroleum Technology*, may. 1982, pp. 976-988.

Fossum, M.P. y R.N. Horne, "Interpretation of Tracer Return Profiles at Wairakei Geothermal Field Using Fracture Analysis" (Interpretación de perfiles de retorno de trazadores en el campo geotérmico de Wairakei, usando análisis de fracturas), *Geothermal Resources Council Annual Meeting*, San Diego, Cal.: oct. 1982.

Horne, R.N. y F. Rodríguez, "Dispersion in Tracer Flow in Fractured Geothermal Systems" (Dispersión del flujo de trazadores en sistemas geotérmicos fracturados), *Geophysics Research Letters*, 10, 1983, pp. 289-292.

Contribuciones y actividades del IIE

En las tareas realizadas, es importante destacar la participación activa del personal de la Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos, de la CFE, sin la ayuda y el apoyo de los cuales difícilmente se hubieran obtenido los resultados que a continuación se describen.

Resultados del área de geoquímica

Los trabajos de investigación del área de geoquímica, del Departamento de Geotermia, se han desarrollado a través de la integración de técnicas mineralógicas, geoquímicas e isotópicas aplicadas a la caracterización preliminar de zonas de actividad hidrotermal, así como a la caracterización de yacimientos en etapa de desarrollo. Asimismo, se han desarrollado técnicas geoquímicas para monitorear la evolución de campos geotérmicos en su etapa de producción.

El objetivo de los trabajos realizados en el área de geoquímica ha consistido en elegir las técnicas que puedan arrojar resultados de mayor utilidad práctica y que resulten menos costosas. De acuerdo con esta línea general, en el Departamento de Geotermia se instalaron los Laboratorios de Isótopos Estables, el de Petrografía y de Rayos X, y el Laboratorio para Estudios de la Química de Gases no Condensables.

En el Laboratorio de Isótopos Estables, se obtienen datos numéricos de las concentraciones de deuterio y oxígeno-18 en fluidos geotérmicos. Los laboratorios de Petrografía y de Rayos X permiten obtener información útil de los efectos de alteración hidrotermal en muestras de roca de los yacimientos, así como determinar la composición química de productos volcánicos frescos y alterados hidrotermalmente. El Laboratorio para Estudios de la Química de Gases no Condensables se montó en virtud de que esta técnica geoquímica es muy promisoría por su utilidad en el monitoreo de las condiciones del yacimiento, tanto en el transcurso de la etapa de desarrollo como en el de la etapa de explotación. En este laboratorio también se realizan mediciones de radón (un gas inerte y radioactivo).

La aplicación de las técnicas geoquímicas desarrolladas o implantadas en el

Departamento de Geotermia contribuyó a la determinación de varios aspectos del yacimiento de Los Azufres. Permitieron establecer el bosquejo general de la geometría del yacimiento. A este respecto se descubrió que las dos zonas de descarga superficial de Los Azufres, separadas por una distancia de varios kilómetros, forman parte de un solo yacimiento continuo en la profundidad (véase la Fig. 3). La forma del yacimiento es una consecuencia de sus regiones fracturadas, por las cuales el fluido geotérmico ha ascendido con el paso del tiempo hasta formar las dos zonas de descarga superficiales. Asimismo, se determinó que el fluido geotérmico consta de una masa de líquido dominante, cuya composición isotópica presenta cierta heterogeneidad en las distintas áreas del yacimiento.

Conjuntando varias líneas de evidencia, se concluyó que se trata de un yacimiento despresurizado, por lo que se presenta la separación natural de fases y se acumula vapor en algunas de sus zonas. Lo anterior señala que las zonas de alimentación de los pozos de Los Azufres, que sólo producen vapor están cercanas a las zonas fracturadas y existen evidencias que indican que la masa de ese vapor es muy pequeña comparada con la masa del líquido.

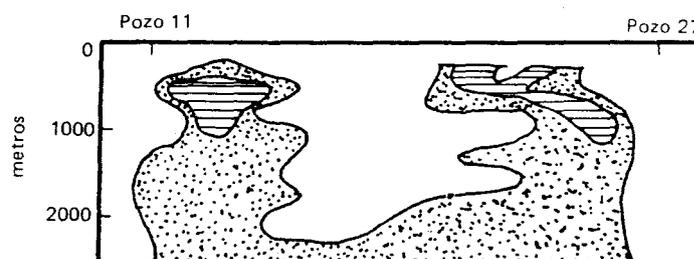
El hecho de que se produzca vapor en algunas zonas de Los Azufres es una ventaja, en vista de que la mejor forma de generar electricidad en un campo geotér-

mico es mediante pozos productores de vapor. Cuando sólo se produce vapor y no hay salmuera (líquido), se evitan muchos de los problemas de contaminación que acarrearía el desecho de la misma, además de que el vapor se usa directamente sin necesidad de separarlo. No obstante, antes de enviar el vapor a la turbina pueden presentarse algunas dificultades técnicas, tales como la necesidad de secarlo o de separarle compuestos contaminantes como el ácido sulfhídrico.

Bajo el patrocinio del Conacyt se realizan dos proyectos. En el primero participan las áreas de geoquímica y de ingeniería de yacimientos del Departamento de Geotermia. Uno de sus objetivos es tratar de predecir los efectos de la alteración hidrotermal sobre las propiedades físicas de interés de las rocas del yacimiento. Los fluidos geotérmicos alteran propiedades como la permeabilidad y la porosidad de las rocas del yacimiento; sin embargo, hasta ahora, no se han cuantificado el sentido ni el grado de dicha alteración. Este proyecto, que se realiza en colaboración con la Universidad de California, de Riverside, persigue efectuar esa evaluación. Se tomaron ya muestras de rocas de Cerro Prieto para llevar a cabo, en dicha Universidad, los análisis de la alteración hidrotermal. En forma simultánea, en los laboratorios del IIE, se estudiarán las propiedades petrofísicas con el propósito de establecer su variación en función de la alteración hidrotermal. Si se logra

FIGURA 3

Sección vertical de noroeste a sureste del yacimiento geotérmico de Los Azufres



Las dos zonas aproximadamente cilíndricas que sobresalen corresponden a sitios fracturados en la formación y constituyen las descargas naturales del sistema.

establecer una correlación, sería posible evitar algunas mediciones que deben efectuarse para determinar propiedades petrofísicas.

El segundo proyecto, patrocinado parcialmente por el Conacyt, permitió instalar un laboratorio de medición de radón en fluidos geotérmicos. Se ha iniciado una serie de mediciones de radón en el campo de Los Azufres, con el fin de establecer sus condiciones iniciales y seguir su evolución, utilizando el radón como trazador natural.

Petrogénesis

Esta rama de las ciencias de la Tierra trata de determinar los procesos que originan la formación del magma en el interior de la Tierra. Los estudios de petrogénesis permiten establecer las características fisicoquímicas y volumétricas de las cámaras magmáticas. En el Departamento de Geotermia se realiza un proyecto en el que se aplica la petrogénesis a la geotermia por medios geoquímicos. Su objetivo es caracterizar las cámaras magmáti-

cas en calderas volcánicas e integrar un modelo físico-matemático que reproduzca sus efectos térmicos sobre el yacimiento para poder calcular su distribución de temperaturas, así como la magnitud de las reservas energéticas. Este proyecto representa el primer caso en el que se aplica la petrogénesis a la geotermia.

Las mediciones geoquímicas —tales como la concentración y la distribución de elementos químicos y de isótopos radioactivos y radiogénicos—, en combinación con las estimaciones volumétricas y mineralógicas de diversas formaciones volcánicas asociadas con un centro volcánico, proporcionan información sobre las características de la cámara magmática subyacente: composición, volumen, profundidad y contenido energético. Estos datos se utilizan para integrar el modelo simulador de la caldera geotérmica. Los resultados del mismo, al implantarlos en una computadora se comparan para simular los datos medidos en el campo. La ventaja de esta técnica estriba en su bajo costo, ya que en forma alternativa, con la ayuda de técnicas geofísicas, pueden

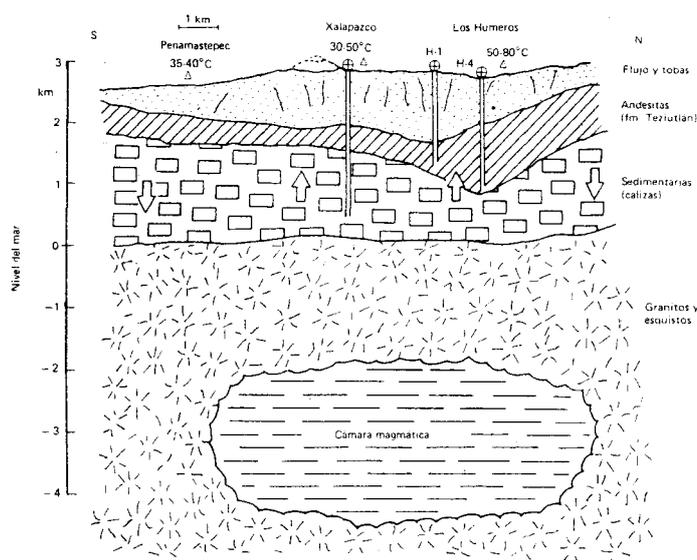
determinarse las características de la caldera que surte el calor al yacimiento. Sin embargo, este último procedimiento quiere emplear la sísmica activa, la cual resulta bastante costosa.

Hasta ahora, con este procedimiento se obtuvo un primer modelo de la cámara magmática del campo geotérmico de Los Hornos, Puebla (véase la Fig. 4). En esta investigación se encuentra en desarrollo con el fin de lograr un mejor modelo de ser posible, validarlo con métodos geofísicos directos.

Estos estudios han evidenciado la necesidad de recopilar la información disponible sobre las diversas áreas del Cinturón Volcánico Mexicano (el hogar de muchos campos geotérmicos del país). Por esa razón, se encuentran en proceso de publicación, diversos conjuntos de trabajos científicos realizados por diferentes autores tanto nacionales como extranjeros. Dichos trabajos se publicarán en uno o más números especiales de la revista *Geofísica Internacional*, editada por la Unión Geofísica Mexicana y por el Instituto C

| contextos | contextos | contextos |
|---|---|---|
| <p>Horne, R.N., K.A. Breitenbach y M.P. Fossum, "Retention of Chemical Tracers in Geothermal Reservoirs" (Conservación de trazadores químicos en yacimientos geotérmicos), <i>Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering</i>, Stanford University, dic. 1982.</p> <p>Horne, R.N. y M.A. Grant, "New Zealand: An Update on Reinjection Experience" (Nueva Zelanda: Actualización en las experiencias de reinyección), <i>Electric Power Research Institute Sixth Annual Geothermal Conference and Workshop</i>, Snowbird, Utah: jun./jul. 1982.</p> <p>Horne, R.N. "Tracer Analysis of Fractured Geothermal Systems" (Análisis de trazadores en sistemas geotérmicos fracturados), <i>Geothermal Resources Council Transactions</i>, vol. 5, pp. 291-294.</p> <p>Horne, R.N. y F.J. Rodríguez, "Tracer Flows in Fractures" (Flujos de trazador en fracturas), <i>Proceedings of the Seventh</i></p> | <p><i>Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering</i>, 1981.</p> <p>Horne, R.N. y M. Castañeda, "Location of Production Zones with Pressure Gradient Logging" (Localización de zonas de producción mediante perfilado de gradiente de presión), <i>Third New Zealand Geothermal Workshop</i>, Auckland: nov. 1981.</p> <p>Horne, R.N., A. Satman y M.A. Grant, "Pressure Transient Analysis of Geothermal Wells with Phase Boundaries" (Análisis de transitorios de presión de pozos geotérmicos con fronteras de fase), <i>1980 New Zealand Geothermal Workshop</i>, Auckland: University of Auckland, nov. 1980.</p> <p>Iglesias, E., D. Nieva, A. Garfias, A. Martínez, S. Verma y R. Barragán, "The First Multi-Well, Multi-Tracer Test in the Los Azufres Geothermal Field. Progress Report" (La primera prueba de trazadores múltiples en varios pozos en el campo geotérmico de Los Azufres), <i>Proceedings, Ninth Workshop</i></p> | <p><i>on Geothermal Reservoir Engineering</i>, Stanford University, dic. 1983.</p> <p>Iglesias, E. R., V. Arellano, A. Garfias, C. Miranda, J. Hernández N. y J. González G., "A Method to Estimate Useful Geothermal Parameters from Production Characteristics Curves (1) Steam Reservoirs" (Método para estimar parámetros geotérmicos útiles a partir de curvas características de producción de yacimientos de vapor), <i>Proceedings, Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering</i>, Stanford University, dic. 1983.</p> <p>Iglesias, E.R., V.M. Arellano y R. Molinar, "A Method to Estimate Useful Geothermal Parameters from Production Curves (2) Hot Water Reservoirs" (Método para estimar parámetros geotérmicos útiles a partir de curvas de producción de yacimientos de agua caliente), <i>Proceedings, Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering</i>, Stanford University, dic. 1983.</p> <p>Iglesias, E.R. y G. Hiriart, "Tracer Test in the Geothermal Field of Los Azufres,</p> |

FIGURA 4

Modelo geotérmico preliminar de Los Humeros

Geofísica, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estas publicaciones servirán de base para planear investigaciones futuras.

Resultados del área de ingeniería de yacimientos

Como se describe en Contextos, se tiene una colaboración activa con el Departamento de Ingeniería Petrolera, de la Universidad de Stanford, en ciertas áreas de las descritas a continuación.

Programoteca

El Área de Ingeniería de Yacimientos Geotérmicos (AIYG), del Departamento de Geotermia, ha integrado a lo largo del tiempo una extensa programoteca especializada. Los programas más importantes que la forman incluyen simuladores del estado de avance de yacimientos geotérmicos, simuladores de flujos de masa y calor en pozos geotérmicos, programas para analizar una gran variedad de distintos tipos de pruebas de presión, progra-

mas para analizar pruebas de trazadores y programas para digitalizar e interpretar registros geofísicos. Estos programas se utilizan normalmente en la Unidad de Cómputo del IIE, que cuenta con dos computadoras VAX-11/780 y con una variedad de complejos equipos periféricos. La programoteca está en continua expansión y revisión para mantenerla al día con el estado de avance de los estudios de yacimientos. Esta infraestructura se ha utilizado en múltiples aplicaciones de la ingeniería de yacimientos geotérmicos, con el objetivo principal de lograr resultados de utilidad práctica.

Curvas de producción

En todo campo geotérmico el registro de las curvas de producción de cada pozo es una actividad siempre presente. Estas curvas contienen información mezclada del pozo y del yacimiento. Al analizarlas, mediante técnicas comunes, puede obtenerse sólo información cualitativa tanto del pozo como del yacimiento. Sin embargo, el AIYG ideó una técnica para des-

contar la información relativa al pozo y conseguir información cuantitativa. A cerca del yacimiento la técnica se basa en utilizar un simulador de flujo en pozos mediante el cual las curvas de producción medidas en el cabezal se transforman a las condiciones de fondo de pozo. Después se utiliza un modelo radial simplificado de la zona de influencia del pozo al que se alimentan los datos que proveen las curvas de producción transformadas. Esto permite obtener la presión del yacimiento no perturbado y el índice de productividad de masa y de potencia del pozo. La presión del yacimiento perturbado es un dato relevante en el cálculo de las reservas, en tanto que el índice de productividad es una medida del comportamiento del pozo durante su explotación.

La ventaja principal de esta técnica es que se obtiene valiosa información cuantitativa del pozo y del yacimiento a partir de información disponible en las curvas de producción registradas en la superficie. Esto evita los riesgos y las complicaciones que se presentan al obtener esa misma información, introduciendo equipos de medición en el fondo del pozo. Las altas temperaturas que imperan en los yacimientos geotérmicos y la corrosividad de las salmueras causan problemas cuando se intenta realizar mediciones en la profundidad de los pozos. Pocos equipos resisten las adversas condiciones y, a pesar de que algunos de diseño especial puedan soportarlas, su introducción en los pozos siempre es una operación arriesgada y difícil.

La técnica se validó en pozos de Cerro Prieto y de Los Azufres, se desarrolló para dos casos, pozos que se alimentan de sólo vapor o pozos que lo hacen exclusivamente de agua caliente. En la actualidad, se trabaja para resolver el caso en el que coexisten las dos fases en el yacimiento, lo que resulta bastante complejo debido a que conduce a un problema matemático que no tiene solución analítica. La forma de resolverlo se orienta hacia la búsqueda de una solución numérica aproximada.

Pruebas de presión

La utilidad práctica y el éxito de la técnica aplicada a las curvas de producción motivó que el AIYG considerara la idea de desarrollar otros métodos para obtener información del yacimiento por medio

de mediciones en el cabezal. El AIYG desarrolló la teoría correspondiente para medir, indirectamente en el cabezal, los parámetros de interés del yacimiento a fondo de pozo. Se han diseñado varias pruebas que en breve se llevarán a cabo en un pozo productor de vapor de Los Azufres. Se intenta obtener información relativa al volumen de poro en la zona de alimentación de ese pozo, así como a su permeabilidad. Si las pruebas de campo validan este procedimiento, se habrá establecido otra herramienta de mucha utilidad práctica para obtener información de los yacimientos geotérmicos, a través de mediciones en la superficie.

Dentro de las actividades relativas a este mismo tema, se validó una técnica nueva desarrollada para un tipo especial de pruebas de presión en los Laboratorios Lawrence, en Berkeley. El cambio de gasto que se aplica en las pruebas de presión para medir la variación de ésta en el fondo del pozo, provoca también un efecto transitorio en este último. El pozo responde en forma transitoria al cambio de gasto, debido a la comprensibilidad del fluido geotérmico. Esto ocasiona que durante el transitorio sean diferentes el gasto en el fondo del pozo y el que se produce en el cabezal. Esta condición, denominada efecto de almacenamiento, enmascara las medidas de presión que se realizan en el fondo. Por tanto, usualmente es necesario esperar cierto tiempo hasta que termine el efecto de almacenamiento para efectuar las mediciones. Sin embargo, el periodo de duración de este efecto muchas veces es mayor que el tiempo que pueden permanecer en el fondo del pozo los instrumentos de medición antes de que los afecten las altas temperaturas y el efecto corrosivo de los fluidos. En muchas ocasiones, el instrumento se saca del pozo para que no se dañe cuando sólo ha registrado datos enmascarados.

Además, después de cierto tiempo de haber iniciado la prueba puede presentarse otro efecto debido a que la frontera de la zona de alimentación del pozo empieza a responder al cambio de gasto. Este efecto se suma también para enmascarar las mediciones de presión a fondo de pozo y puede presentarse antes de que cese el efecto de almacenamiento. La conjunción de ambos es la causa por la que muchas veces sólo se cuenta con datos enmascarados que no es posible interpretar con las técnicas tradicionales.

La técnica que validó el AIYG se basa, en primer término, en el empleo de un simulador numérico de flujo de pozos que permite restar los efectos de almacenamiento. A través de dicho simulador, se determina el gasto en el fondo del pozo durante la etapa transitoria. Como este gasto es variable, y en virtud de que en las técnicas de análisis tradicionales se considera un gasto constante, el procedimiento se completa utilizando un programa de computadora para analizar pruebas de presión a gasto variable. De este modo se aprovechan los datos registrados en la etapa en que aún persiste el efecto de almacenamiento y antes de que se presente el correspondiente a los límites de la zona de alimentación del pozo. Otra ventaja de esta técnica es que permite diseñar pruebas de corta duración, con lo que se incrementa la disponibilidad del instrumental de medición utilizado.

Otra actividad que realiza el AIYG en torno a este mismo tema es el estudio de

técnicas de análisis de pruebas de presión tradicionales que consideren los efectos térmicos en el pozo y los relativos a las fracturas de la formación. El objeto de este trabajo es refinar el análisis de las pruebas de presión para obtener información más precisa sobre las características de los yacimientos geotérmicos.

Pruebas de trazadores

En este aspecto el AIYG ha realizado diversos trabajos que incluyen la selección de trazadores tradicionales para uso geotérmico y de técnicas de análisis adecuadas para los mismos; el diseño y la realización de varias pruebas de trazadores; descubrimiento y la implantación de una metodología que permite utilizar las muestras de desecho como fuente de trazadores extremadamente barata; la formulación del concepto de trazadores bifásicos, y la investigación de candidatos apropiados para este uso.

contextos

Michoacan, Mexico: Progress Report" (Pruebas de trazadores en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México: Informe preliminar), *Proceedings of the Seventh Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1981, pp. 41-46.

Onyekonwu, M. y R.N. Horne, "Pressure Response of a Reservoir with Spherically Discontinuous Properties" (Respuesta de presión de un yacimiento con discontinuidades esféricas en sus propiedades), *Journal of Petroleum Technology*, 35, 1983, pp. 2127-2134.

Ramey, Jr., H.J. y A.C. Gringarten, "Well Tests in Fractured Reservoirs" (Pruebas de pozos en yacimientos fracturados), *Geothermal Resources Council Workshop on Fractures in Geothermal Reservoirs*, Honolulu: ago. 1982.

Ramey, Jr., H.J., "Well Loss Function and the Skin Effect: A review" (Revisión de la función de pérdida en pozos y del efecto piel), *Recent Trends in Hydrogeology, Geol. Soc. Am.* 1982, pp. 265-272 (Special Paper 189).

contextos

Sageev, A., B.D. Gobran, W.E. Brigham y H.J. Ramey, Jr., "The Effect of Temperature on the Absolute Permeability to Distilled Water on Unconsolidated Sand Cores" (Los efectos de la temperatura sobre la permeabilidad absoluta con respecto a agua destilada de núcleos de areniscas no consolidadas), *Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, dic. 1980.

Spivak, D. y R.N. Horne, "Unsteady State Pressure Response Due to Production with a Slotted Liner Completion" (Respuesta transitoria de presión debida a la producción en pozos terminados con "liner" ranurado), *Society of Petroleum Engineers California Regional Meeting*, San Francisco, Cal.: mar. 1982.

Westwood, J.D. y L.M. Castanier, "Application of a Lumped Parameter Model to the Cerro Prieto Geothermal Reservoir" (Aplicación de un modelo de parámetros globales para el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto), *Proceedings of the Seventh Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1981, pp. 23-28.

La selección de trazadores tradicionales se efectuó con base en su estabilidad termodinámica, el costo y el equipo de detección disponible. De este estudio se seleccionaron como trazadores a los iones negativos bromuro, ioduro y tiocianato, los cuales mostraron ser estables ante las altas temperaturas y el ambiente reductor de la formación. Para estos trazadores, se diseñó una prueba que se pensaba efectuar en el campo de Los Azufres; sin embargo, no pudo realizarse debido a que los costos de los trazadores se incrementaron a raíz de los problemas económicos provocados por la devaluación de la moneda mexicana a comienzos de 1982.

Esta situación condujo al descubrimiento de que la propia salmuera de desecho presenta una fuente de trazadores de muy bajo costo. La salmuera, al evaporarse en la superficie, provoca un aumento de concentración de sus sales que quedan disueltas en ella. La concentración se incrementa al aumentar la cantidad de vapor que se produce. Por esta razón, existe un contraste entre la concentración de los diversos iones y sales presentes en la salmuera de desecho y en la del yacimiento. Este contraste es lo que determina que la salmuera de desecho pueda emplearse como fuente de trazadores.

De nuevo, en función del equipo de detección disponible, se analizaron los trazadores contenidos en la salmuera para encontrar los más convenientes. Por su abundancia y facilidad de detección, se eligió el ión negativo cloruro. Bajo las mismas premisas, se determinaron también como trazadores complementarios a los iones positivos sodio y potasio, así como al litio, no tan abundante pero que presenta ventajas prácticas en su detección. Una prueba de cuatro meses de duración, efectuada en Los Azufres, demostró la validez de esta técnica, que por su práctica aplicación ha despertado gran interés en el ambiente geotérmico internacional.

Trazadores bifásicos

Los trazadores mencionados anteriormente, tanto los tradicionales como los contenidos en la salmuera de desecho, no pueden utilizarse cuando ocurre un cambio de fase, debido a que se quedan en la fase líquida. En el AIYG, surgió la idea de estudiar compuestos químicos solubles en agua que se queden en el vapor al ocurrir un cambio de fase y puedan utilizarse como trazadores bifásicos. El AIYG estudia, actualmente, el comportamiento de trazadores bifásicos económicos que podrán emplearse en los campos geotérmicos

de Los Azufres y Los Humeros, donde existen pozos que producen sólo vapor o una mezcla de éste con agua. Este tipo de trazadores se emplearían, por ejemplo, para establecer el efecto que provoca la reinyección en pozos productores de agua sobre pozos productores de vapor. Se han seleccionado varios trazadores bifásicos que se estudian en el laboratorio bajo condiciones simuladas del yacimiento de Los Azufres.

Determinación de propiedades petrofísicas

El AIYG ha realizado contribuciones importantes en esta rama de la investigación geotérmica, apoyándose —en gran medida— en la capacidad del Laboratorio de Petrofísica, del Departamento de Geotermia. La calidad de las mediciones físicas de rocas que se realizan en este laboratorio ha sido avalada por los laboratorios de petrofísica, como el de la Universidad de Stanford, el de Lawrence Berkeley Laboratory y el de la Universidad de California, de Berkeley, los cuales marchan a la cabeza de este tipo de estudios.

En el Laboratorio de Petrofísica, destaca el Simulador de Yacimientos Geo-

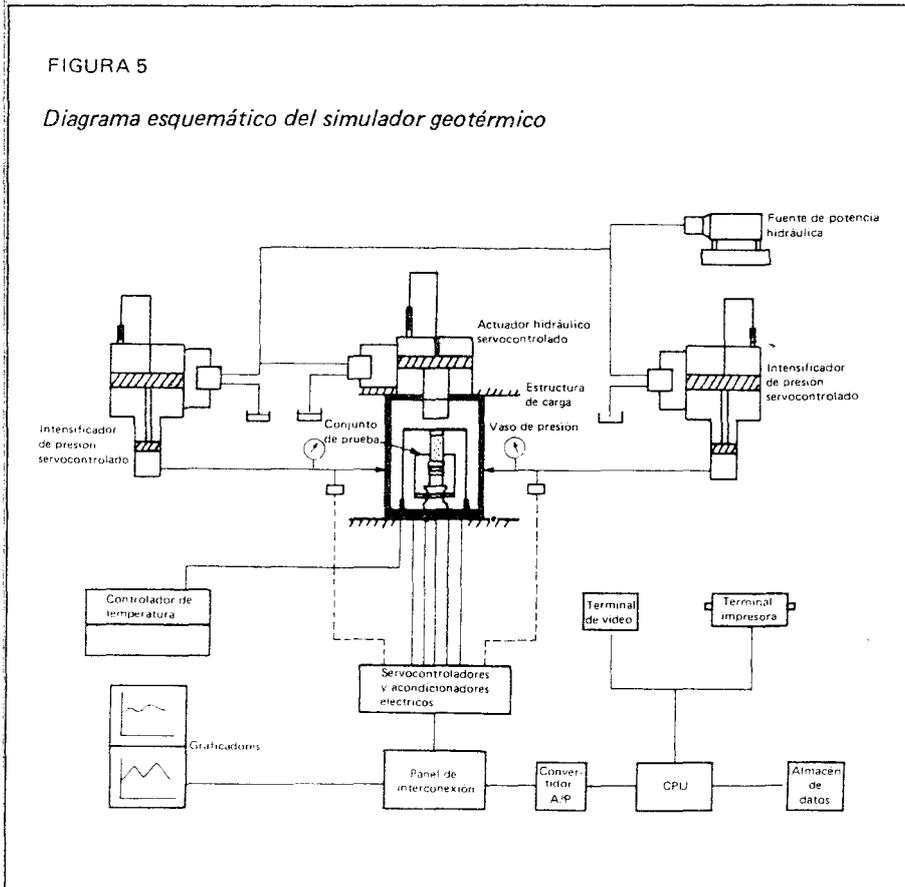
CUADRO 1

Capacidad del simulador geotérmico

| Tipo de prueba | Intervalos de operación | | |
|----------------------------|---|---------------------------------|------------------------|
| | Temperatura °C | Presión de confinamiento MPa | Presión de toro MPa |
| Comportamiento mecánico | Triaxial | 20 - 350 | 0 - 104 |
| | Compresión simple | 20 - 350 | 0 - 104 |
| | Compresión hidrostática | 20 - 350 | 0 - 104 |
| Propiedades térmicas | Expansión térmica | 20 - 350 | 0 - 104 |
| | Conductividad térmica | 20 - 350 | 0 - 104 |
| | Difusividad térmica | 20 - 350 | 0 - 104 |
| Permeabilidad | Método de régimen permanente bomba de desplazamiento constante y medidor de flujo (1 mD - 1D) | 20 - 315 | 0 - 104 |
| | Método de régimen permanente presurización con acumuladores hidráulicos (10 μ D - 10 mD) | 20 - 315 | 0 - 104 |
| | Método de régimen transitorio (0.1 μ D - 200 μ D) | 20 | 0 - 104 |
| | Conductividad de fracturas | { hasta 10 D hasta 500 D | { 0 - 41 0 - 41 |
| | | 20 - 315 | 0 - 104 |

FIGURA 5

Diagrama esquemático del simulador geotérmico



térmicos (SYG) con el que se determinan las propiedades petrofísicas de interés en condiciones simuladas del yacimiento para un amplio intervalo de presiones y temperaturas (véase el Cuadro 1). El SYG (véase la Fig. 5), que es un equipo de diseño especial con el que cuentan sólo unos cuantos laboratorios en el mundo, se utiliza fundamentalmente para medir propiedades mecánicas (pruebas uniaxiales, triaxiales e hidrostáticas) propiedades térmicas (conductividad y difusividad térmica), así como permeabilidad.

Uno de los trabajos del AIYG consistió en desarrollar una técnica nueva que permita medir porosidades en función de la temperatura, utilizando al SYG, para lo cual no había sido diseñado originalmente. La capacidad de este simulador se extendió también con el desarrollo de otra técnica experimental para estudiar los efectos de la presión de confinamiento y de la presión de poro sobre la porosidad.

La investigación de la dependencia con la temperatura de la permeabilidad de

rocas areniscas de Cerro Prieto es otro de los estudios que ha realizado el AIYG. A partir de las mediciones efectuadas, se encontró una relación empírica para determinar dicha dependencia, la cual cubre todos los casos estudiados.

El AIYG realizó un trabajo en el que se recopiló, analizó y organizó toda la información publicada en torno al estudio de las propiedades petrofísicas de las rocas del campo de Cerro Prieto,¹ que resulta de gran utilidad para los especialistas interesados tanto en Cerro Prieto como en cualquier otro campo geotérmico del mundo.

Entre otros temas en los que ha incurrido el AIYG están estudios de veloci-

1. Toda esta información se encuentra condensada en E. A. Contreras, E.R. Iglesias y F. Bermejo, "Laboratory-measures Physical Properties of Cerro Prieto Rock: A Review of Early Work and Presentation of New Data", *Geothermal Resources Council Transactions*, vol. 8, 1984. En el cual se incluye la lista completa de las referencias sobre el tema.

dades sónicas en función de temperaturas y presión de confinamiento en rocas de Cerro Prieto y de Los Azufres (realizadas por personal del IIE en los laboratorios de la Universidad de California, en Berkeley), de expansión térmica bajo presión de confinamiento y de expansión térmica de matriz también de rocas de Cerro Prieto.

Perfiles de presión y temperatura de pozos

La detección de las posibles zonas de alimentación que se encuentran a lo largo de los pozos representa uno de los temas de mayor interés en las tareas de perfilado de presión y temperatura. El AIYG desarrolló una técnica sencilla para localizar zonas de alimentación y determinar los flujos y la dirección de los mismos en el pozo. Esta técnica, denominada Perfilado de Gradiente de Presión, evita emplear el equipo utilizado para los mismos propósitos (*spinners*) y, en consecuencia, el riesgo y los problemas que implican introducirlos al pozo. La técnica consiste en realizar mediciones simultáneas de presión y temperatura a diferentes profundidades, calcular las densidades respectivas del fluido a partir de la temperatura medida y con ello estimar la presión hidrostática correspondiente. Mediante las presiones medidas y las calculadas se determinan gradientes de presión promedio que se comparan entre sí. Las diferencias permiten descubrir si existe flujo y su dirección, que evidencian la presencia de diferentes zonas de alimentación. La técnica se probó con éxito en algunos de los pozos de Cerro Prieto.

Desarrollo de un modelo de Los Azufres

La aplicación de las técnicas desarrolladas por el Departamento de Geotermia con el propósito de obtener información de los yacimientos, contribuye a los esfuerzos que el AIYG y el Area de Geoquímica realizan para establecer un modelo básico actualizado del yacimiento de Los Azufres. Este modelo integra toda la información obtenida relacionada con la geología, las características químicas, la geometría, las distribuciones de temperatura, de presión, de permeabilidad, de porosidad, etc., de dicho campo. Este tipo de modelos contiene la información básica que se utiliza en las tareas de simulación numérica.

FIGURA 6

Mapa reciente del campo geotérmico, donde se muestran los pozos y el área a simular

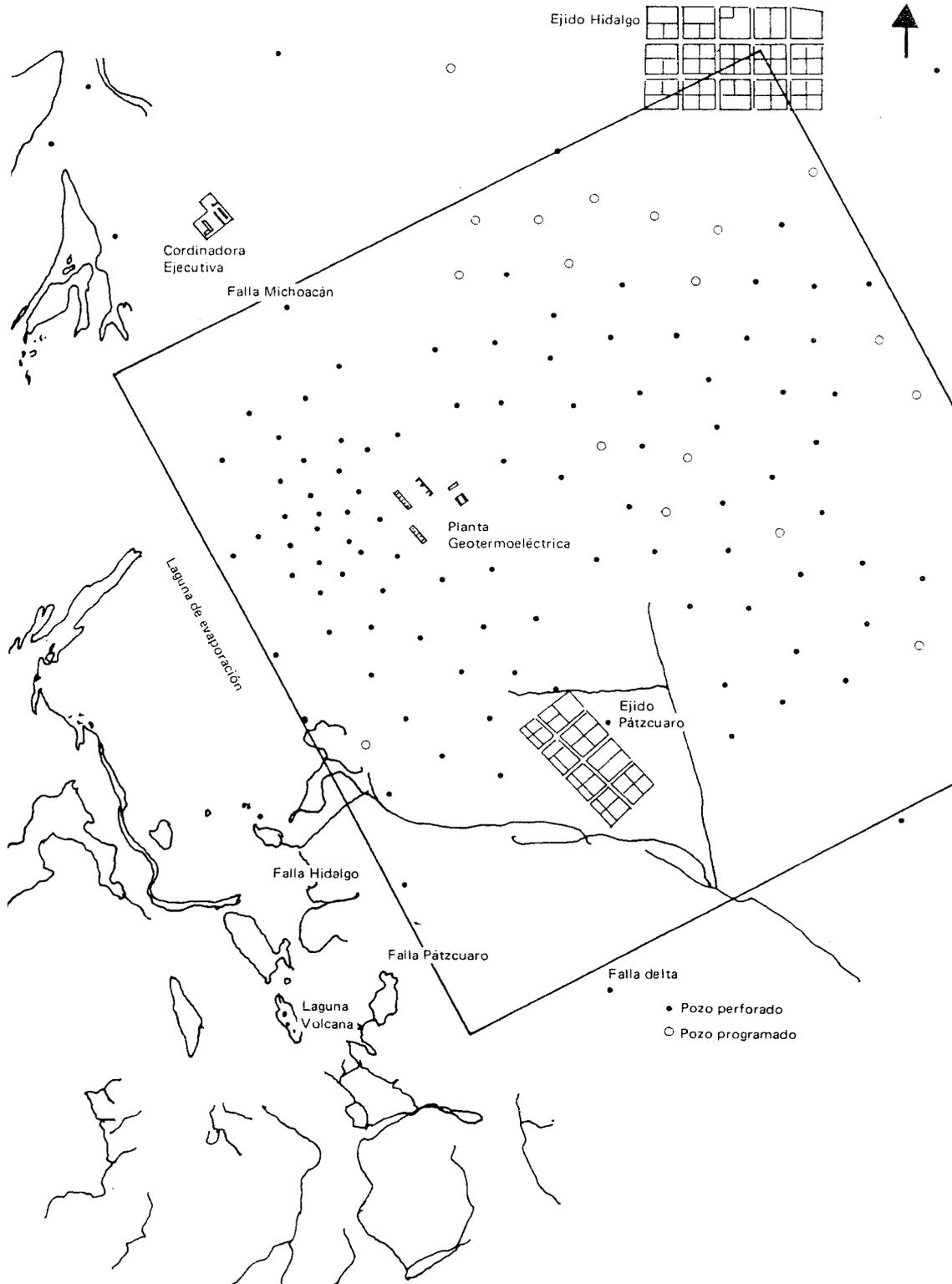
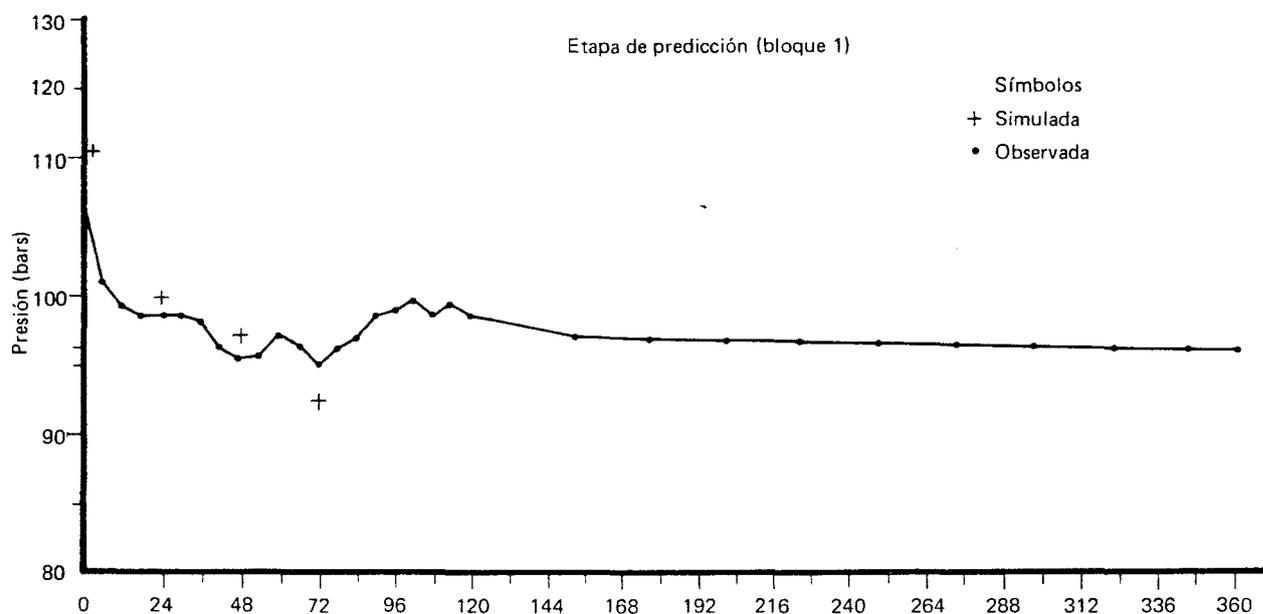


FIGURA 7

Caída de presión pronosticada para la región de Cerro Prieto I, según el estudio de simulación numérica para un periodo de 30 años



Simulación de Cerro Prieto

Los simuladores numéricos con que cuenta el AIYG se aplicaron para modelar el comportamiento del campo geotérmico de Cerro Prieto (véase la Fig. 6). Para la simulación matemática de este campo se elaboró, en primer término, un modelo de parámetros distribuidos, considerando una subdivisión geométrica gruesa de la región denominada Cerro Prieto I. A partir de ahí, se efectuó un balance de masa y energía hasta ajustar el modelo con los datos históricos del campo. Posteriormente, el modelo se extendió, tomando en cuenta una subdivisión geométrica más fina, la cual se amplió de modo que se incluyeran las regiones Cerro Prieto II y III. Después, se simuló el comportamiento del campo y se hizo un ajuste de su historia de presión y de la historia de la entalpía de su producción. Con estas bases y de acuerdo con las condiciones de producción que prevé la CFE, se predijo la historia futura del campo de Cerro Prieto (véase la Fig. 7).

Entre las conclusiones más importantes de este trabajo destaca la indicación de la existencia de cierto tipo de recarga en el yacimiento. Otra es que, a pesar de la producción, sólo en los alrededores de algunos pozos de producción, el yacimiento se encuentra en dos fases (líquida y vapor). Esta situación no se ha extendido a todo el yacimiento, lo que podría convertirse en un inconveniente grave para su explotación.

Formación de especialistas en ingeniería de yacimientos geotérmicos

El AIYG ha contribuido a formar especialistas del país y de Latinoamérica en la ingeniería de yacimientos geotérmicos. En 1981, realizó un proyecto de un año de duración en el que se adiestró en este tema a personal de la CFE y del IIE. Asimismo, tuvo a su cargo la coordinación académica de los dos cursos internacionales sobre yacimientos geotérmicos que se llevaron a cabo en México en 1981

y en 1984. Estos cursos fueron organizados por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la CFE, la División de Educación Continua, de la Facultad de Ingeniería, de la UNAM, y el IIE. En el segundo curso, el IIE facilitó a los participantes —la mayoría provenientes de Latinoamérica— su programoteca e instalaciones de Cuernavaca, Morelos, donde se impartieron los temas de simulación de yacimientos y de pozos geotérmicos, así como el de medición de propiedades físicas de rocas.

A través de la participación de diversos especialistas en los campos de la Geofísica, Geología y Geoquímica, uno de los objetivos importantes de este segundo curso fue mostrar a los asistentes la estrecha relación entre estas ciencias y la ingeniería de yacimientos en las tareas de caracterización. Todos estos especialistas persiguen superar la denominada paradoja de los yacimientos, en la cual se establece que al principio, cuando se descubre uno de ellos, poco se sabe de él, en tanto que al agotarlo no guarda ya ningún secreto.

Materiales en centrales termoeléctricas*

La disponibilidad de las centrales termoeléctricas es un aspecto de capital importancia para el desarrollo del país. Gran parte de las salidas de servicio de estas centrales generadoras se debe a las fallas de los materiales que integran sus componentes metálicos. El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) realiza un conjunto de proyectos que conforman un esquema integral con el que se persigue brindar las bases necesarias para prevenir y solucionar, en forma económica, las principales fallas de materiales que ocurren en este tipo de centrales.

Introducción

Un enorme complejo de componentes metálicos constituyen el generador de vapor o caldera de una central termoeléctrica (CTE). Kilómetros de tuberías forman el circuito por el que el agua se calienta, se convierte en vapor y se condensa para transformar la energía química de los combustibles fósiles en energía eléctrica. En una caldera típica de una CTE de 300 MW, el hogar puede medir 10 X 11 metros en la base, alcanza una altura equivalente a la de un edificio de siete niveles y sobre el mismo, se encuentran cerca de 115 kilómetros de tuberías que presentan una superficie de calentamiento de aproximadamente 2.5 hectáreas.

Los elementos metálicos del generador de vapor (paredes de agua, sobrecalentador, recalentador, economizador, cabezales, etc.) la turbina, el condensador, los calentadores de agua y demás componentes de una CTE están expuestos al efecto de esfuerzos, temperaturas y compuestos corrosivos que, en algunos casos, son muy nocivos para los materiales. Estas condiciones extremas provocan, en muchas

ocasiones, las fallas de los materiales y la consiguiente salida de servicio de las unidades que integran la central. En México, el combustóleo (aceite residual del petróleo) que se consume en los generadores de vapor proviene de una mezcla de los crudos istmo y maya. Este último contiene un gran porcentaje de elementos muy corrosivos, tales como el sodio (Na), el azufre (S) y el vanadio (Va), por lo que se agrava el problema de la falla de materiales en los generadores de vapor de las centrales nacionales.

En nuestro país, la importancia de un adecuado diseño, operación y mantenimiento para asegurar una alta disponibilidad de las centrales termoeléctricas, radica en el hecho de que alrededor de 62% de la generación eléctrica total se obtiene por medio de la quema de combustóleo, situación que seguramente se mantendrá hasta finales del siglo. El estudio integral de la problemática y de las soluciones relativas a las fallas de materiales en estas centrales, constituye una de las actividades que el IIE realiza en conjunto con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para mejorar la eficiencia, la disponibilidad y la confiabilidad de la generación eléctrica.

Dicho estudio se realiza en el Área de Materiales, del Departamento de Combustibles Fósiles, de la División de Fuentes

de Energía, a través de varios proyectos interrelacionados: análisis de materiales y fallas; estudios experimentales y teóricos de los procesos de corrosión (en alta y en baja temperatura), de termofluencia (determinación de la vida residual de tuberías) y de fatiga (mediante el desarrollo de técnicas de ultrasonido), y evaluación de recubrimientos orgánicos y metálicos contra la corrosión; así como actividades relativas al análisis preventivo de fallas y a la elaboración de un sistema de tipificación y registro de las mismas.

El recorrido de los gases de combustión y el ciclo agua-vapor

En un generador de vapor típico,¹ de una unidad de 300 MW a plena carga se consumen 68 toneladas por hora de combustóleo. Inyectado mediante atomizadores, el combustóleo se combina con el aire caliente para producir la combustión en el horno u hogar del generador de vapor. El agua se calienta y se evapora por efecto de la radiación que producen la flama y los gases de combustión. La producción de vapor se efectúa dentro de los tubos

1. Todos los datos numéricos que se mencionan en el presente artículo, son valores típicos aproximados para una unidad de 300 MW operando a plena carga. El propósito de incluirlos es mostrar, de manera general, las condiciones a las que se someten los diversos materiales en el proceso de la generación termoeléctrica.

* Informe preparado por el Departamento de Difusión, bajo la supervisión técnica del doctor Raúl Fuentes Samaniego, investigador del Departamento de Combustibles Fósiles, de la División de Fuentes de Energía, del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

CUADRO 1

Composición química, en volumen de los gases de combustión de una unidad operando con 68 ton/h de combustóleo (con un contenido de azufre del 3.5%), 8% de exceso de aire y 85% de humedad relativa

| % en volumen | |
|-----------------|------|
| Agua | 12.8 |
| CO ₂ | 13 |
| SO ₂ | 0.2 |
| O ₂ | 1.4 |
| N ₂ | 72.6 |

que conforman las paredes del hogar. Se producen 1 050 ton/h de gases de combustión (véase el Cuadro 1), los cuales salen del hogar a una temperatura aproximada de 1 380°C. Así inician el recorrido a través de los diversos bancos de tubos (sobrecalentador, recalentador y economizador), del precalentador de aire regenerativo y de la chimenea, transmitiendo su calor tanto en forma radiactiva como convectiva (véase la Fig. 1).

El agua entra en forma ascendente a los tubos del hogar y continúa hacia el domo, donde se lleva a cabo la separación del agua y del vapor. La presión en el domo se controla mediante válvulas a la entrada de la turbina y su valor, para este caso típico, es de 187 kg/cm², que corresponde a una temperatura de saturación de 358°C (la temperatura de saturación o ebullición del agua es de 100°C a una atmósfera de presión y de 358°C a la presión en el domo). El vapor producido en esta forma se envía a los bancos de tubos del sobrecalentador. En este último, los gases de combustión transfieren su calor para incrementar la temperatura del vapor a 540°C, el cual sale rumbo a la turbina de alta presión.

A la turbina de alta presión entran 910 ton/h de vapor. Este flujo hace girar el eje de la turbina, lo cual, a su vez, acciona el eje del generador eléctrico para producir la corriente eléctrica. Así, el poder calorífico del combustible, transformado en el movimiento del turbogenerador, se convierte en energía eléctrica. El vapor sale de la turbina a 340°C y a 40 kg/cm² de presión, en virtud de que ya transfirió una porción de su energía mecánica. De tal modo, 810 ton/h de vapor ingresan al recalentador. El resto

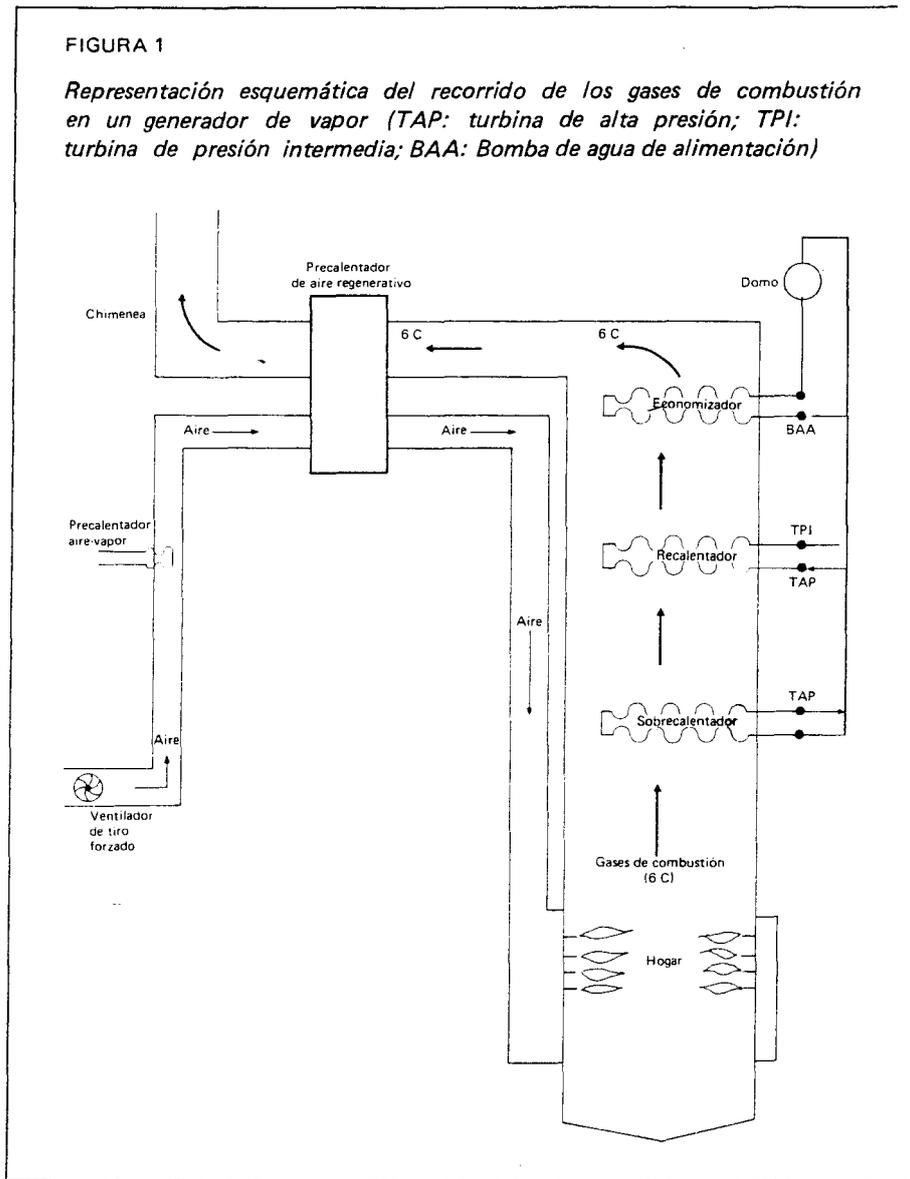


FIGURA 1

Representación esquemática del recorrido de los gases de combustión en un generador de vapor (TAP: turbina de alta presión; TPI: turbina de presión intermedia; BAA: Bomba de agua de alimentación)

(vapor de extracción) se emplea en otras etapas del ciclo de generación. Los gases de combustión ceden otra porción de su calor en el recalentador para incrementar nuevamente la temperatura del vapor a 540 grados Celsius.

Del recalentador, el vapor se envía, en forma consecutiva, a las etapas de presión intermedia y baja de la turbina. Alrededor de 600 ton/h de vapor salen de la turbina de baja presión (el resto es vapor de extracción) con destino al condensador, a una temperatura de 38°C y con una presión absoluta de 0.07 kg/cm² (0.07 atmósferas, aproximadamente).

Al incidir sobre los tubos del condensador, que conducen agua de enfriamiento a temperatura ambiente, el vapor se condensa y cae al pozo caliente. El condensador opera con agua de mar en circuito abierto o mediante un sistema de torres de enfriamiento en circuito cerrado.

Del pozo caliente, el agua inicia su recorrido hacia la caldera. La bomba de condensado eleva la presión del agua hasta 25 kg/cm², aproximadamente, y la envía a los calentadores de agua de baja presión que también son condensadores en los que circula vapor de extracción por el exterior de sus tubos.

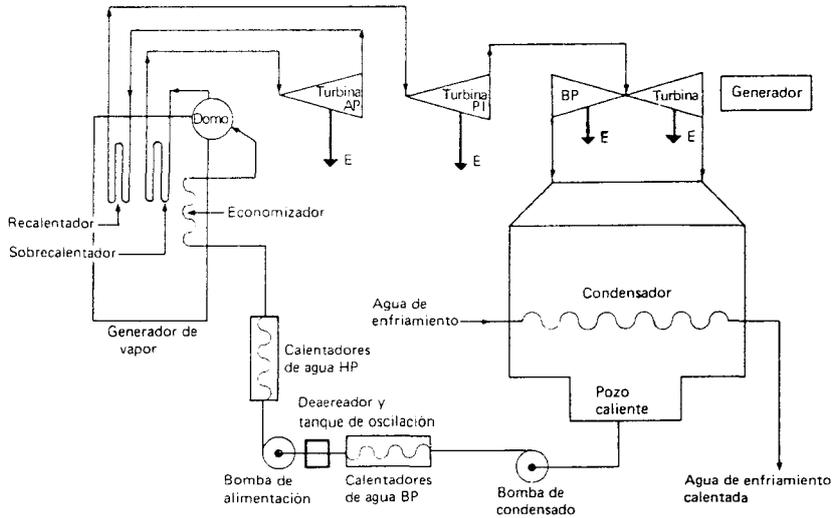
El deaerador es la siguiente etapa del proceso. En éste se inyecta vapor, también de extracciones, para arrastrar el oxígeno y las impurezas que lleva el agua con el fin de evitar picaduras por causa del primero o corrosión por efecto de las últimas. El vapor inyectado se extrae por drenes y el agua entra al tanque de oscilación. De ahí, las bombas de agua de alimentación, sincronizadas con la presión en el domo, elevan la presión del agua y la envían a los calentadores de alta presión, de donde pasa al economizador de la caldera con una presión de 189 kg/cm² y a una temperatura aproximada de 250 grados Celsius.

Al economizador han arribado los gases de combustión a 540°C y salen del mismo a 340°C. A su vez, el agua eleva su temperatura de 250 a 325 grados Celsius. Los calentadores de agua y el economizador tienen por objeto hacer más eficiente el proceso de la generación termoeléctrica. El agua entra al domo para remplazar al vapor que sale rumbo al sobrecalentador y, en esta forma, se completa el ciclo agua-vapor en una CTE (véase la Fig. 2).

Después de calentar el vapor en los diferentes bancos y el agua en el economizador, los gases de combustión ingresan al precalentador de aire regenerativo a una temperatura de 340°C; abandonan este último a 150°C para dirigirse a la chimenea y salir a la atmósfera. De esta manera, los gases ceden parte de su calor para incrementar la temperatura del aire que se emplea en la combustión con el propósito de efectuarla en forma más eficiente. El aire se toma de la atmósfera mediante un ventilador de tiro forzado y antes de llegar al precalentador de aire regenerativo pasa por el calentador de aire-vapor. Este último consta de un banco de tubos que conducen vapor de extracción. El aire se calienta hasta 70°C para que no llegue tan frío al precalentador regenerativo y evitar así el problema de corrosión en baja temperatura. Los precalentadores pueden ser de diversas formas; uno de ellos, el Ljungstrom, se asemeja a una rueda giratoria (véase la Fig. 3). Los gases de combustión atraviesan la rueda por una mitad, en tanto que el aire lo hace en sentido opuesto por la otra. El aire sale del precalentador con destino a los quemadores a una temperatura de 290 grados Celsius.

FIGURA 2

Diagrama esquemático del circuito agua-vapor en una unidad generadora de una CT (AP: Alta presión; PI: Presión intermedia; BP: Baja presión; E: Extracciones)



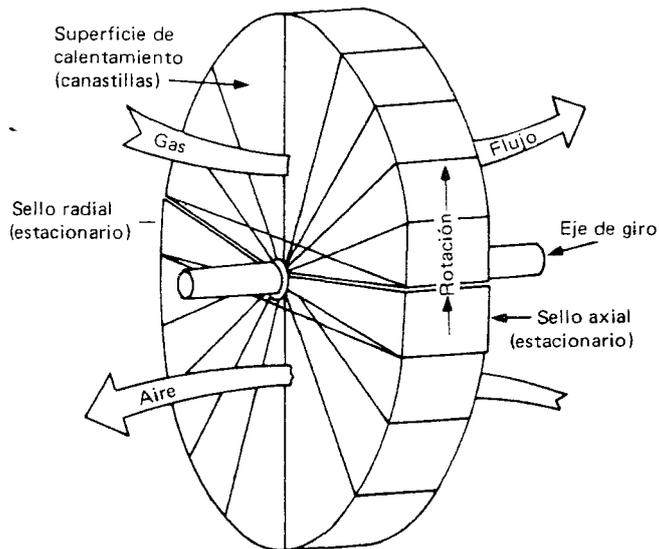
Los principales problemas de materiales en CTE y sus soluciones

La termofluencia y la corrosión en alta temperatura del sobrecalentador y del re-

calentador, la corrosión de las cajas de aire y soportes, la corrosión en baja temperatura en el precalentador de aire regenerativo y la chimenea, las picaduras en los tubos del condensador y economiza-

FIGURA 3

Elementos de un precalentador de aire regenerativo



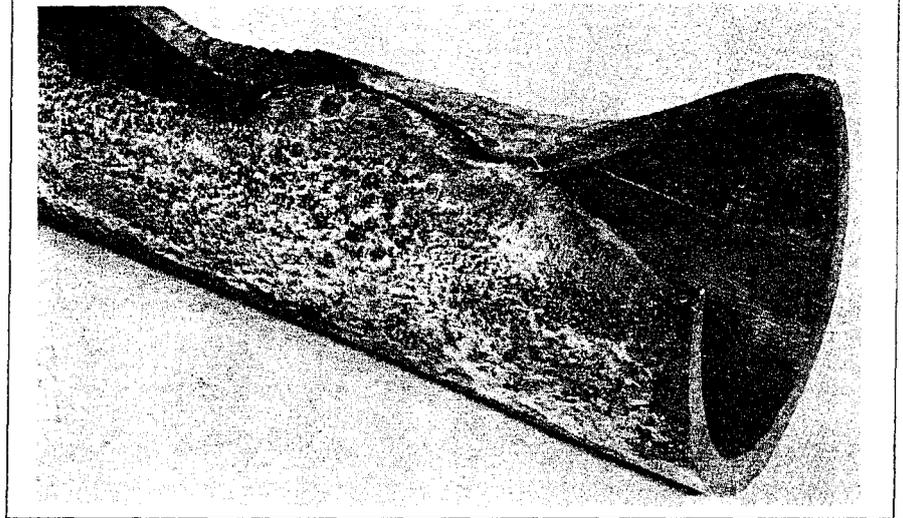
dor, así como la corrosión interna y los sobrecalentamientos en los tubos de las paredes de agua, son los problemas de fallas de materiales que con mayor frecuencia ocurren en las centrales termoeléctricas.

Sobrecalentador y recalentador

El proceso de termofluencia puede definirse como la deformación plástica progresiva de un material sometido a un esfuerzo de tensión constante. Dicho proceso se acentúa con el aumento de la temperatura y del esfuerzo. Los tubos del sobrecalentador y del recalentador sujetos a la termofluencia se abomban y adelgazan paulatinamente hasta que se destruyen (véase la Fig. 4). La termofluencia se caracteriza por dos procesos: la deformación plástica del material, y la nucleación y el crecimiento de microcavidades, o pequeños huecos, en su interior. Ambos producen un daño prácticamente irreversible que conduce a la fractura del material (en teoría, el daño es reversible; sin embargo, el proceso de recuperación es económicamente incosteable para tuberías). Estas se diseñan de manera que resis-

FIGURA 4

Efecto de la termofluencia en un tubo de sobrecalentador



tan la termofluencia, siguiendo los criterios impuestos por códigos como el ASME. Empero, cuando se presenta la corrosión, los esfuerzos exceden a los previstos en el diseño, ya que disminuye el espesor del tubo. La temperatura a la que se somete

el material es el factor más importante en la termofluencia, pues ésta depende exponencialmente de aquélla. Por ejemplo, en ciertas condiciones, un aumento de sólo 10°C es capaz de reducir a la mitad la vida de servicio de un tubo.

contextos

contextos

contextos

Infraestructura experimental del área de materiales

El Área de Materiales cuenta con una infraestructura de laboratorios y equipos que constituye una de las más completas y modernas de México. Dicha infraestructura integra la base en la que se sustentan los proyectos y servicios de análisis de materiales y de fallas que realiza el Departamento de Combustibles Fósiles.

Microscopio electrónico de transmisión

En este microscopio además de la imagen amplificada del material analizado se obtiene su patrón de difracción. A partir de este último, se evidencian todos los detalles de la estructura cristalina de sus diversos constituyentes microestructurales. El microscopio de transmisión logra magnificaciones de hasta 450 mil aumentos, opera con

un voltaje de aceleración de electrones de 200 kV y su resolución es del orden de 1.5 Angstrom. Cuando se trata de la muestra de un material que ha experimentado una falla, la comparación entre su nueva estructura cristalina y la de un material de referencia de iguales características brinda información relativa a las condiciones en las que ocurrió la falla.

En contraste con la microsonda, que proporciona información global de la su-

perficie, el microscopio de transmisión suministra información del interior del material. Se aplica principalmente a la caracterización de la microestructura cristalina de los aceros con los que se fabrican tubos empleados en los generadores de vapor y en los condensadores, de superaleaciones de álabes de turbinas y de la correspondiente a productos de corrosión. En este último caso, conocer la estructura cristalina permite determinar los tipos de compuestos corrosivos que se forman.

La corrosión en alta temperatura es el resultado de la acción química de los gases de combustión y de la escoria depositada sobre las superficies metálicas. Además de los gases, en la combustión se produce una ceniza rica en azufre, sodio y vanadio, que forma una escoria que se va depositando sobre los tubos. Entre los compuestos que forman el azufre, sodio y vanadio se encuentran algunos con puntos de fusión por debajo de los 600°C. De tal modo, durante la operación normal de la caldera se forman costras fundidas, en extremo adherentes, que permiten una mayor velocidad de difusión de los elementos nocivos, destruyendo al material de manera acelerada.

La velocidad de corrosión en alta temperatura depende de: a) la composición química del depósito, que es función del contenido de contaminantes en el combustible y de la calidad de la combustión; b) el tipo de material empleado en la fabricación del tubo; c) la temperatura de los gases de combustión, y d) la temperatura de la superficie metálica, que depende del diseño específico del generador de vapor. De estos cuatro factores, la importancia de la temperatura en la interfaz metal-depósito y del tipo de material empleado supera en mucho a la de los dos factores restantes, ya que el efecto es comparativamente menor dentro del escaso control que puede ejercerse sobre ellos.

La corrosión en alta temperatura depende exponencialmente de la temperatura de la superficie externa del metal y, en el caso del quemado de combustible resulta significativa cuando esta última sobrepasa los 550°C y catastrófica, por arriba de los 600 grados Celsius.

La termofluencia y la corrosión en alta temperatura son las causas de falla más importantes tanto en el sobrecalentador como en el recalentador. Sin embargo, por razones de diseño, la temperatura externa de metal es, generalmente, mayor en el recalentador que en el sobrecalentador, en tanto que en este último es más elevada la presión que ejerce el vapor. Por estas razones, la termofluencia es más relevante en los sobrecalentadores y la corrosión, en los recalentadores; éste es un hecho corroborado ampliamente por la experiencia de la Comisión Federal de Electricidad.

En el Area de Materiales, del Depart-

FIGURA 5

Cálculo de la vida residual de tubos a través del programa de cómputo elaborado en el IIE

a) CARACTERISTICAS DEL TUBO DE MATERIAL SA213-T22

| | |
|---------------------------------|------|
| ESPEJOR INICIAL (MM) | 5. |
| DIAMETRO INTERNO (MM) | 50. |
| PRESION (ATMOSFERAS) | 170. |
| VELOCIDAD DE CORROSION (MM/ANO) | 0. |
| TEMPERATURA MEDIA (C) | 550. |

TIEMPO DE VIDA = 2.482 ANOS = 2.1744E+04 HORAS

TECLEE <RETURN> PARA CONTINUAR

b) CARACTERISTICAS DEL TUBO DE MATERIAL SA213-TP304 H

| | |
|---------------------------------|------|
| ESPEJOR INICIAL (MM) | 5. |
| DIAMETRO INTERNO (MM) | 50. |
| PRESION (ATMOSFERAS) | 170. |
| VELOCIDAD DE CORROSION (MM/ANO) | 0. |
| TEMPERATURA MEDIA (C) | 550. |

TIEMPO DE VIDA = 31.37 ANOS = 2.7480E+05 HORAS

TECLEE <RETURN> PARA CONTINUAR

c) CARACTERISTICAS DEL TUBO DE MATERIAL SA213-TP304 H

| | |
|---------------------------------|------|
| ESPEJOR INICIAL (MM) | 5. |
| DIAMETRO INTERNO (MM) | 50. |
| PRESION (ATMOSFERAS) | 170. |
| VELOCIDAD DE CORROSION (MM/ANO) | 0. |
| TEMPERATURA MEDIA (C) | 600. |

TIEMPO DE VIDA = 3.650 ANOS = 3.1977E+04 HORAS

TECLEE <RETURN> PARA CONTINUAR

En a) y b) se muestran tubos de diferentes materiales, iguales características de diseño y sometido bajo las mismas; en c) puede apreciarse un tubo del mismo material que en b), expuesto a una mayor temperatura.

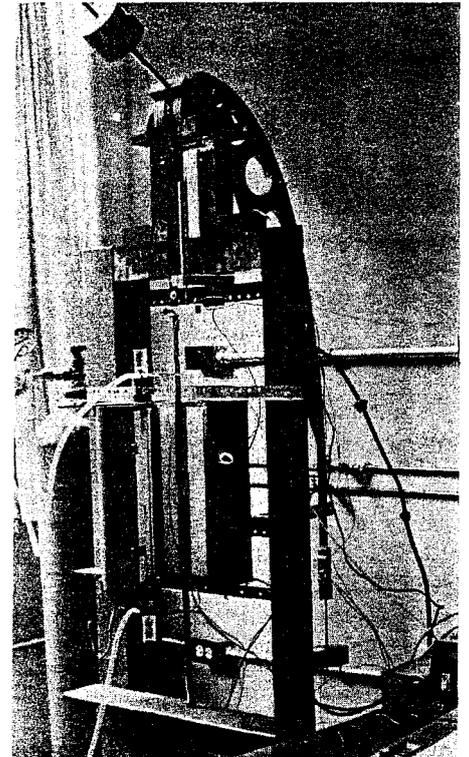
mento de Combustibles Fósiles, los procesos de la termofluencia y de la corrosión en alta temperatura se estudian tanto en forma experimental como teórica, con el fin de evaluarlos y determinar la solución idónea para cada caso particular. En el caso de la termofluencia, los estudios experimentales se orientan hacia el diagnóstico de la misma y hacia la determinación de la vida residual (o de la vida consumida) de tubos afectados. Con este propósito se desarrolló un programa de computadora mediante el cual se calcula la vida residual de una tubería, en función del material que la compone, de su diseño, de la temperatura y de la velocidad de corrosión a la que se somete (véase la Fig. 5). Este programa representa una herramienta práctica para decidir sobre aspectos relativos a la operación y/o el mantenimiento, tales como el remplazo de una tubería sujeta a este fenómeno por otra de material o diseño más resistente.

En lo que se refiere al estudio de la corrosión en alta temperatura, los trabajos del Area de Materiales se concentran en la evaluación de la velocidad de dicho pro-

ceso, en función de los diferentes parámetros que intervienen, así como en la evaluación de recubrimientos que puedan resultar eficaces y económicos para contrarrestarla. De acuerdo con las posibilidades del sector metal-mecánico nacional, los recubrimientos se contemplan como la solución idónea para la protección contra la corrosión de los generadores de vapor. La experimentación que se ha realizado hasta la fecha, ha sido muy exitosa y se prevén posibilidades para solucionar el problema a corto plazo, a través de recubrimientos aplicados por plasma y recubrimientos orgánicos.

Pre calentadores de aire

La aplicación de recubrimientos sería, asimismo, una solución viable para el problema de corrosión en baja temperatura sobre el precalentador regenerativo. En este recuperador de calor, la temperatura del metal es aproximadamente igual al promedio entre la temperatura del gas y del aire. Por el lado donde entra el aire y sale el gas, el primero llega a 70°C y el segundo abandona el precalentador a 150°C, de manera



Máquina de termofluencia construida en el IIE

contextos

Microsonda

En este equipo se conjuntan la microscopia electrónica de barrido con el análisis químico elemental por emisiones características de rayos X para realizar el microanálisis de los materiales. Las imágenes amplificadas de la muestra se obtienen a través del sondeo que sobre ella realiza el barrido de un haz colimado de electrones. Al interaccionar con la muestra, el haz de electrones provoca la emisión de electrones secundarios, los que se detectan para formar una imagen de hasta 180 mil aumentos.

La producción de rayos X característicos se obtiene cuando incide sobre la muestra el mismo haz colimado de electrones de alta energía. Para cada elemento presente en la muestra se generan rayos X de energía y longitud de onda características y con una intensidad que es función de la concentración de dicho elemento en la muestra. La

contextos

determinación de los elementos contenidos se logra por medio de un espectrómetro dispersivo de onda o mediante un espectrómetro dispersivo de energía. En el primer caso, los rayos X atraviesan consecutivamente un cristal analizador y un detector proporcional de flujo de gas. El pulso de salida de este detector permite realizar el análisis químico cualitativo y cuantitativo de cualquier elemento presente en la muestra, con excepción del hidrógeno (H), el helio (He), el litio (Li) y el berilio (Be). En el espectrómetro dispersivo de energía, un cristal de Si-Li detecta los rayos X como pulsos y permite analizar cuantitativamente cualquier punto de la imagen. El espectro total de rayos X se muestra en una pantalla gráfica como un espectro de energía, con lo cual es posible detectar hasta 26 elementos en forma simultánea. Una computadora PDP-11-16, controla automáticamente la microsonda, por lo que aumenta la flexibilidad y rapidez de operación de la misma y se reducen los errores humanos.

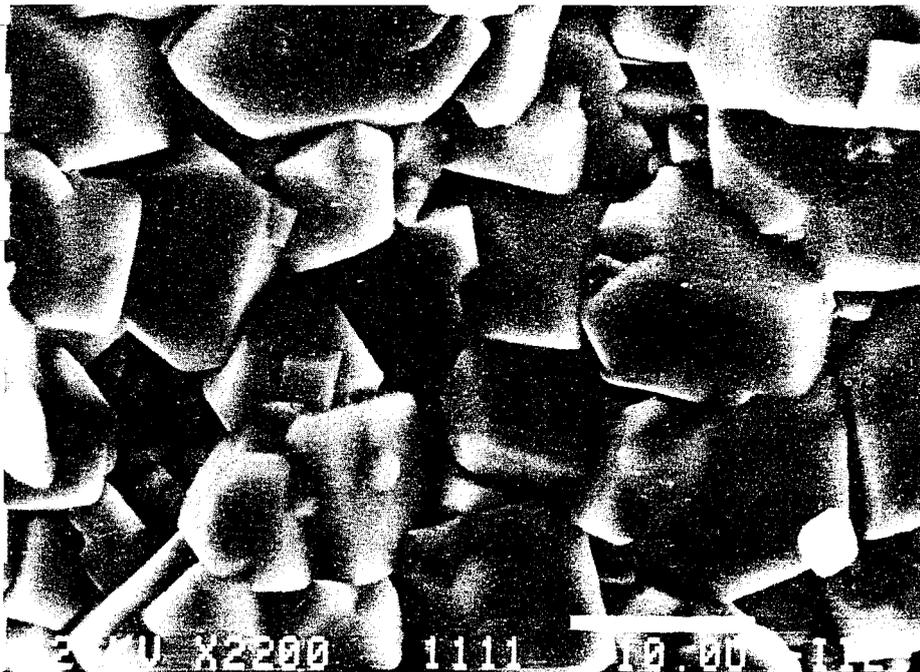
contextos

Laboratorio de Termobalanzas

En este laboratorio se mide el cambio de peso con el tiempo, de muestras sometidas a ciertas atmósferas y temperaturas. El alcance de detección puede llegar a microgramos para temperaturas de hasta 1 100°C, con una variación de $\pm 1.8^\circ\text{C}$. Las termobalanzas cuentan con un sistema de control de atmósfera que permite regular la concentración y el flujo de gases para reproducir condiciones que se dan en los generadores de vapor. Asimismo, están acondicionadas para simular el ciclado térmico que experimentan los materiales en condiciones reales de operación. En este laboratorio se realizan, básicamente, estudios del efecto de la temperatura y de la composición química de gases y depósitos sobre la corrosión de metales y aleaciones.

Laboratorio de Metalografía

Cuenta con el equipo básico convencional



Microfotografía obtenida a través de la microsonda, que muestra productos de corrosión encontrados sobre un tubo de recalentador.

que la temperatura del metal es aproximadamente de 110°C . A esta zona se le conoce como la parte fría del precalentador. Esta temperatura de metal, que depende del diseño, la operación y la temperatura ambiente, es del orden de la correspondiente al punto de rocío o de condensación del ácido sulfúrico (H_2SO_4), que se produce en esta parte del generador de vapor al combinarse el vapor de agua con el SO_3 presente en los gases de combustión.

Cuando se da la corrosión del metal por efecto del ácido sulfúrico, las laminillas del precalentador van consumiéndose y los sulfatos de hierro que se forman, junto con las partículas arrastradas por el gas de combustión, obstruyen tanto el paso del gas como el del aire. Debido a ello, este precalentador debe limpiarse en forma continua con una solución neutralizante para evitar taponamientos que reduzcan la eficiencia de la unidad y que lleguen a provocar incendios.

Además de los estudios sobre recubrimientos para precalentadores de aire regenerativos, en el Área de Materiales se realizan trabajos de evaluación de diversas aleaciones bajo la acción de ácido sulfúrico en sus condiciones de temperatura más agresivas. Se ha encontrado una muy

buena resistencia a la corrosión en aceros de bajo carbón microaleados con cobre y silicio, los cuales están dentro de las posibilidades de producción del sector metal-mecánico nacional. Asimismo, se llevan a cabo evaluaciones de aleaciones viables para recubrimientos que, en términos prácticos, resultan inmunes a la corrosión por ácido sulfúrico.

Condensador y paredes de agua

En la superficie interna de los tubos del condensador, los problemas de picaduras resultan de la depositación y subsecuente acción química de ciertos compuestos corrosivos contenidos en el agua de enfriamiento. Este problema es más frecuente en los condensadores enfriados por agua de mar. En la superficie externa de los tubos, algunos problemas de corrosión son consecuencia de la acción del amoníaco depositado por el vapor. Al ocurrir la falla de un tubo del condensador, la fuga de agua con alto contenido de sales que circula por el sistema de enfriamiento contamina el agua de alta pureza contenida en el pozo caliente. El resultado final es la depositación de las sales sobre las superficies metálicas del circuito agua-vapor y sus consecuencias más nocivas se presentan en el interior de los tubos de la pared de agua, ya que en esta parte la evaporación incrementa la concentración

local de las sales y conduce a una corrosión acelerada. Este tipo de falla se presenta generalmente junto con un pH ácido en la zona del problema y por ello se conoce también con el nombre de ataque ácido. Otra característica del ataque ácido es que se libera una gran cantidad de hidrógeno cuando el agua oxida el hierro. Los átomos de hidrógeno que se forman penetran el interior del metal y reaccionan con el carbono para producir burbujas de metano a lo largo de las fronteras de grano o de subgrano. A esto se debe que al ataque ácido se le denomine también ataque por hidrógeno. La característica principal de estas fallas es la extremada fragilidad producida por la alta densidad de microcavidades que se manifiesta por una ruptura en la que, generalmente, se desprende una sección del material formando una "ventana" con labios de fractura gruesos.

Para evitar este problema, se monitorea continuamente la conductividad eléctrica del agua en el pozo caliente con el fin de detectar contaminaciones y proceder a la reparación del tubo perforado antes de que la magnitud de las mismas reduzca el pH del agua de la caldera y ocasione el ataque ácido.

Con el propósito de evitar la corrosión interna, el agua se mantiene ligeramente alcalina mediante la inyección de productos químicos. Este procedimiento debe controlarse cuidadosamente para no producir un ataque que, en este caso, sería de tipo alcalino. Este tipo de ataque, conocido también como ataque cáustico, tiene la característica de producir una fractura dúctil. A diferencia del ataque ácido en el que forzosamente se requiere la presencia del contaminante, y a pesar de que se haya realizado un control químico adecuado, es posible que se presente el ataque cáustico si el flujo térmico es excesivo (incidencia de la flama sobre la pared de agua). Aparte del control sobre el flujo térmico, el control químico y el de los contaminantes, la limpieza de las paredes de agua es esencial para evitar fallas.

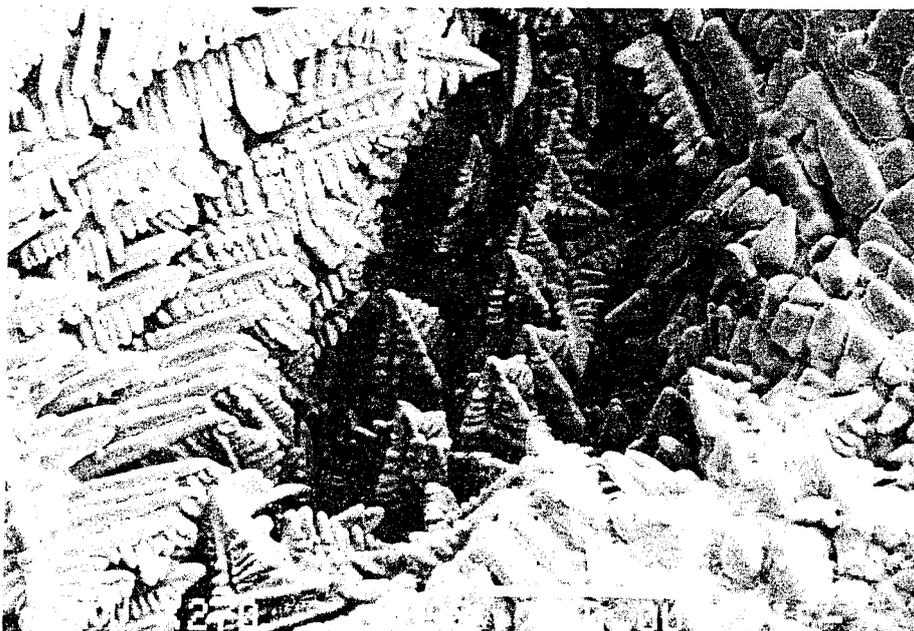
Los sobrecalentamientos son causa también de falla de los tubos de pared de agua. Se deben a un excesivo flujo térmico ocasionado porque las superficies metálicas se encuentran muy cerca de la zona de flama o bien, a una circulación de agua inadecuada en el interior de los tubos. El agua, en su trayecto por el interior de

estos últimos, actúa como refrigerante llevándose el calor que incide y se transmite a través del material. Cuando el flujo térmico es excesivo o la circulación no es suficiente se incrementa la producción de burbujas de vapor sobre la superficie interna, causando la coalescencia de las mismas para formar una película de vapor que actúa como aislante entre el tubo y el agua que circula. El metal se sobrecalienta y falla. En condiciones normales de operación, la temperatura externa de los tubos de la pared de agua es del orden de los 380°C en tanto que en un sobrecalentamiento puede llegar a los 900 grados Celsius.

Las actividades del Area de Materiales, para contribuir a la solución de este problema, se concentran en la evaluación de recubrimientos internos para el condensador, el diagnóstico de las fallas en paredes de agua y la emisión de recomendaciones específicas para cada falla.

Cabezales y turbina

Los cabezales y la carcasa de la turbina experimentan el fenómeno de fatiga. Este



Microfotografía obtenida con la microsonda de una estructura dendrítica de solidificación en una aleación Fe - 13 Cr.

es consecuencia de los muchos ciclos de enfriamiento y calentamiento que suceden durante la vida de servicio de dichos componentes. Asimismo, los álabes y el rotor

de la turbina están sujetos a esfuerzos cíclicos originados por el movimiento de rotación. Con el paso del tiempo, los esfuerzos térmicos y mecánicos que resul-

contextos

de preparación y observación para analizar muestras metálicas tanto a nivel de microscopía óptica como electrónica. El objetivo fundamental de este laboratorio es suministrar la información que describa las microestructuras presentes en los aceros y correlacionarlas posteriormente con sus propiedades químicas y mecánicas o con características de tratamientos térmicos o de situaciones de falla. Lo integran los equipos de preparación: cortadoras de tipo mecánico con base en aglomerados de CSi y polvo de diamante, desbastadoras, pulidoras y un equipo para el ataque electrolítico de las muestras. El examen óptico se realiza a través de un microscopio metalográfico con un poder de resolución de hasta 800X. Además, se cuenta con un microdurómetro Vickers para medir dureza.

El laboratorio ofrece fundamentalmente el servicio de análisis de materiales y de fallas de componentes metálicos de centra-

contextos

les termoeléctricas. El análisis de materiales se realiza, por un lado, en términos de la calidad de los mismos, lo cual significa verificar los requerimientos químicos y mecánicos especificados por norma y, por otro, en términos del tratamiento térmico, para lo que es necesario comprobar si el material posee la microestructura requerida.

Laboratorio de Termofluencia

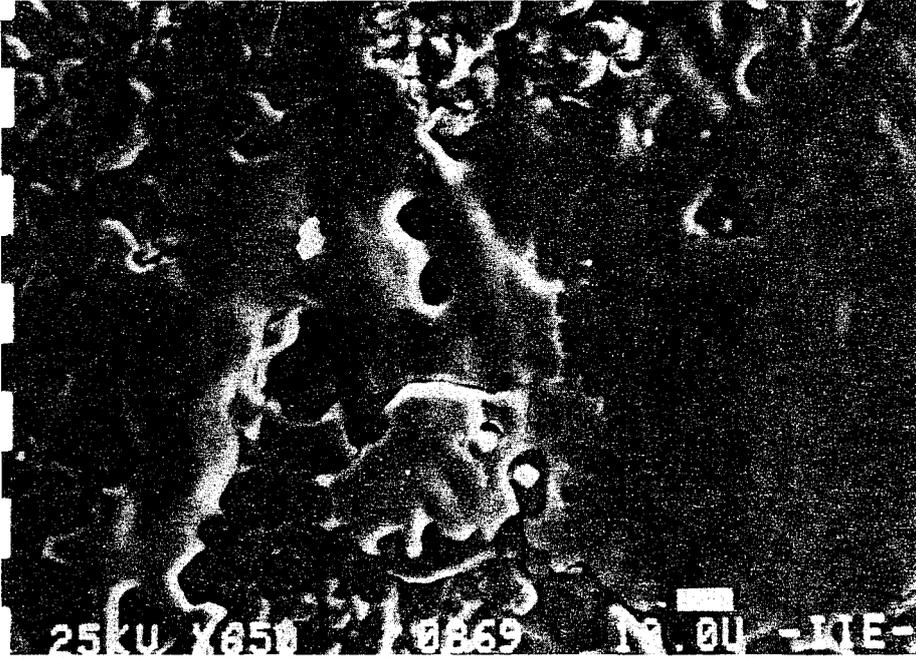
Este laboratorio se creó para efectuar pruebas de termofluencia a materiales que se someten a elevadas temperaturas, principalmente álabes de turbina de gas y tubos de caldera de centrales termoeléctricas. Lo integran una máquina de termofluencia de esfuerzo constante construida en el propio IIE, con la colaboración del Instituto de Física, de la UNAM, y del Departamento de Ciencia de Materiales, de la Universidad de Stanford, California. Este equipo consta básicamente de un horno y un medidor de

contextos

desplazamientos (LVDT: Linear Variable Differential Transformer) con una precisión de 0.000254 cm (0.0001 pulg.); un sistema de adquisición de datos de 30 canales (26 de adquisición y 4 actuadores); una microcomputadora con una capacidad máxima de 32 kb; un graficador, y una tableta digitalizadora. Las pruebas de termofluencia que se realizan se orientan a determinar la vida residual de materiales.

Laboratorio de Hornos

En el laboratorio se llevan a cabo pruebas en alta temperatura de materiales metálicos, principalmente aceros utilizados en centrales termoeléctricas. Para esto se cuenta con siete muflas y un horno de tubo, que pueden alcanzar temperaturas de hasta 1 200°C. En la actualidad, se efectúan pruebas en alta temperatura de recubrimientos metálicos y orgánicos para materiales utilizados en calderas y se realizan evaluaciones de co-



Microfotografía obtenida mediante la microsonda, que muestra vanadatos fundidos sobre la capa de óxido de un acero ferrítico.

an causan grietas internas microscópicas, que al crecer originan la falla del material. El desarrollo de técnicas especiales de ultrasonido, para detectar fisuras y microcavidades a través de un sistema computarizado, es otra de las actividades en las que se trabaja en el Area de Materiales. El principio del ultrasonido consiste en incidir, por medio de un transductor, una onda acústica en el material y en capturar la señal acústica reflejada. A partir de la información que esta última contiene, se determina la existencia y las características de fisuras y microcavidades y además, se obtiene información microestructural del material analizado. Se planea complementar este tema de investigación con holografía y tomografía para obtener imágenes en tercera dimensión de componentes y analizar diversos problemas de materiales, tales como fatiga, termofluencia, control de calidad de materiales, control de corrosión y control de lavados químicos de caldera, entre otras aplicaciones.

La reparación y el recubrimiento de álabes de turbina de gas, con el fin de que sea posible utilizarlos después de una vida de trabajo inicial, es uno de los proyectos futuros que se consideran en el Area de Materiales. Estos trabajos se fundamentan en la aplicación de la técnica denominada compresión isostática en caliente (HIP:

Hot Isostatic Pressing), en la cual el material se somete a elevadas presiones y temperaturas que aceleran los procesos atómicos de difusión y eliminan las microcavidades y las microfisuras causantes del deterioro interno. Los álabes reparados con este procedimiento podrían utilizarse durante un tiempo equivalente a varios periodos de su vida de servicio nominal. Si se considera que los álabes de las turbinas de gas se construyen con base en superaleaciones y que el costo unitario puede ser hasta de 10 mil dólares, salta a la vista el beneficio económico que obtendría el país si tuviera éxito este proyecto.

El enfoque integral

Los resultados de los estudios de termofluencia, de fatiga y de corrosión en alta y baja temperaturas se integran a una simulación matemática validada del generador de vapor para determinar los esfuerzos, temperaturas y vida de servicio esperada de cada uno de sus componentes. Este enfoque integral es útil tanto para resolver problemas ya identificados como para realizar un análisis preventivo de fallas que prevea problemas de un diseño o condiciones de operación específicas. Por supuesto, esta infraestructura de simulación puede utilizarse para seleccionar diseños o modos de operación y mantenimiento, desde un punto de vista relativo

a la vida del equipo y, por tanto, en términos de disponibilidad. Este enfoque, que ya empieza a manejarse en el extranjero, permitiría a México adelantarse a los problemas de materiales y, en un futuro, prevenirlos desde las etapas de selección y construcción de los generadores de vapor.

El sistema de tipificación y registro de fallas que se desarrolla en el Area de Materiales, representa el medio de obtener la información necesaria y suficiente para brindar una solución definitiva a los problemas repetitivos de mayor impacto sobre la disponibilidad de las unidades. Asimismo, las estadísticas que generará podrían utilizarse para definir la forma óptima de concentrar los esfuerzos y los recursos en áreas prioritarias. La información, retroalimentada por el sistema, permitirá establecer líneas de investigación, así como ajustar y actualizar el enfoque integral del área.

Otros proyectos tendientes a resolver problemas de materiales

Los estudios en el área de materiales sobre disponibilidad de CTE contemplan las soluciones al problema de corrosión de cajas de aire y soportes por efecto de la deposición de escorias fundidas; desgaste de los orificios de los atomizadores por el paso a gran velocidad de las partículas erosivas en el combustóleo; corrosión de chimeneas por ácido sulfúrico; picaduras por oxígeno de los calentadores de agua y economizador, y el continuo problema de la falla de los álabes del penúltimo paso de la turbina de baja presión por contaminantes alcalinos. Además, por contar con uno de los laboratorios mejor equipados de México (véase la sección Contextos), se realiza una gama muy amplia de servicios de análisis de materiales y de fallas para el sector eléctrico, incluyendo análisis para apoyar la sustitución de importaciones y análisis de materiales para centrales hidroeléctricas.

Por último, el Area de Materiales realiza continuamente actividades orientadas a difundir tanto sus propios avances como aquellos que se logran en el extranjero. A través de esta labor, el IIE colabora con la CFE ofreciendo diferentes opciones de solución y prevención que permitan disminuir la indisponibilidad causada por fallas de materiales en centrales generadoras de energía eléctrica.

junta directiva

Rogelio Gasca Neri: director general de la Comisión Federal de Electricidad (presidente).

Salvador Palafox Trujillo: representante de la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (secretario).

Ricardo Samaniego Breach: encargado de Despacho de la Subsecretaría de Política y Desarrollo de Energéticos de la Secretaría de Energía.

Raúl Fuentes Samaniego: subdirector técnico de la Comisión Federal de Electricidad.

Raymundo Campos Milán: subdirector de Transmisión, Transformación y Control de la Comisión Federal de Electricidad.

Oswaldo Gangoiti Ruiz: subdirector de Generación de la Comisión Federal de Electricidad.

Luis R. Almeida Durán: subdirector de Programación de la Comisión Federal de Electricidad.

José Merino Mañón: director general de Luz y Fuerza del Centro.

Carlos Bazdresch Parada: director general del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Francisco Barnés de Castro: rector de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Julio Rubio Oca: rector de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Diódoro Guerra Rodríguez: director general del Instituto Politécnico Nacional.

Gustavo Roviroza Renero: comisario público propietario del Sector Energía y Electricidad, Secodam.

Jorge Collard de la Rocha: director general de Programación y Presupuesto de Energía e Industria de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público.

Jaime Hernández Romero: auditor externo (invitado).

comité técnico operativo

Ignacio Armendáriz Molina: Secretaría de Energía.

Gustavo Roviroza Renero: Secretaría de Contraloría y Control Administrativo.

Jorge Collard de la Rocha: Secretaría de Hacienda y Crédito Público.

Luis R. Almeida Durán: Comisión Federal de Electricidad.

Fernando A. Kohrs Aldape: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

María Ana Paredes Noriega: Secretaría de Energía.

comité editorial

Julio Sánchez Gutiérrez
Roberto Carlos Ruiz
Luis María Álvarez
Soleador Salvador Castro
José Miguel de la Cruz Barahón
Fernando Antonio Aldape

Editor
Sandra Alguete

Redacción

Departamento de Ciencias Tecnológicas

Comité de la edición

Helena Rivas

Diseño

Juan H. Pires

Impresión y Formatos

Verónica López

Encuadernación

Sebastián Rojas

Distribución

División de Edición

Luis C. Gómez

Comisión Nacional de Energía y Electricidad

Comisión Federal de Electricidad

Comisión Nacional de Energía y Electricidad

El Senop en el Primer Torneo de Operadores del Cenace



Es la hora, el operador está atento a lo que sucede en la red del Sistema Eléctrico Nacional, de pronto ocurre un disturbio, debe evitar un sobrevoltaje y comunicarse con la cuadrilla que en ese momento está en campo para evitar accidentes que pueden ser fatales; con voz firme y segura dicta instrucciones, realiza acciones precisas; la adrenalina corre libremente por su cuerpo, pero permanece ecuánime. Pronto todo vuelve a la normalidad.

Da un suspiro, se levanta y al caminar hacia la salida llueven los aplausos sobre él. Ha terminado su participación en la tercera etapa del Primer Torneo de Operadores del Sistema Eléctrico Nacional organizado por el Centro Nacional de Control de Energía (Cenace), ahora todo depende de los jueces.

Por una hora este operador —como otros 19 finalistas de tres distintas categorías: operador de subárea, auxiliares de turno y operadores de área— debió enfrentar fallas y eventos simulados que ponían a prueba su pericia, habilidad y conocimientos durante la operación de una red ficticia. Permaneció solo y concentrado frente a los mandos que simulaban una sala de operación, mientras, del otro lado del espejo de esa Cámara de Gessel, siete jueces observaban sus reacciones ante las eventualidades que tres instructores creaban a propósito.

Los jueces han tomado en cuenta

los siguientes aspectos: análisis del origen del disturbio; secuencia de maniobras; tiempo de normalización; control ante presión; seguridad para el personal y el equipo en las maniobras efectuadas; manejo de información e instrucciones; y uso de los medios disponibles.

La herramienta que permitió llevar a cabo esta tercera etapa fue el simulador avanzado para entrenamiento de operadores (Senop) diseñado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) a partir de un simulador básico comercial.

El Senop, historia¹

En 1987 el Centro Nacional de Control de Energía (Cenace) solicitó apoyo al IIE para concretar un programa de formación y capacitación de operadores de sistemas eléctricos de potencia. Hasta entonces en los cursos al

¹ "Simulador avanzado para adiestramiento de operadores de centros de control de energía", en *Boletín IIE*, vol. 20, núm. 2, marzo-abril, Departamento de Difusión, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, 1996, pp. 51-53.



personal se consideraban solamente los aspectos teóricos de fenómenos básicos para la operación de sistemas eléctricos de potencia y la actitud ante fallas estaba dictada por la experiencia que se adquiría con el paso de los años.

Primer Torneo de Operadores

En este Primer Torneo de Operadores del Sistema Eléctrico Nacional diecinueve ingenieros debieron enfrentar en la etapa final diferentes escenarios creados en el simulador avanzado de entrenamiento para operadores.

Hablan los ganadores de las tres categorías en el Torneo: operador de área, auxiliar de turno y operador de subárea.

El Departamento de Análisis de Redes, resultados y perspectivas

Entrevista con el ingeniero Mauricio Mier Muth, jefe del Departamento de Análisis y Redes

En los últimos decenios, las empresas eléctricas de servicio público han interconectado sus sistemas eléctricos para satisfacer la demanda eléctrica en forma más económica y confiable. Esto ha implicado un crecimiento tanto en la extensión como en la complejidad de las redes eléctricas. Para garantizar el suministro en forma continua y económica, se utilizan centros de control que regulan la generación y la transmisión de la energía eléctrica. Con el apoyo de sistemas computarizados, estos centros adquieren y procesan información de la red eléctrica para efectuar las accio-



Estudió la licenciatura en ingeniería mecánica y eléctrica, en la Universidad Nacional Autónoma de México, y la maestría en ingeniería eléctrica, en el Massachusetts Institute of Technology; su campo de interés es el estudio de la administración y el control de la calidad en programación para tiempo real, y es coautor del libro *Desarrollo y administración de programas de computadora*. Desde 1976, es investigador de la División de Sistemas de Potencia y, actualmente, es jefe del Departamento de Análisis de Redes.

nes de control que coordinan la operación de todo el sistema.

La relación que existe entre los centros de control y las redes eléctricas se asemeja a la del cerebro y el sistema circulatorio en un ser humano. El cerebro ordena las acciones para distribuir la sangre por el cuerpo; el centro de control coordina la generación, transmisión y distribución del fluido que da vida a las actividades de la civilización: la electricidad.

En México, el Centro Nacional de Control de Energía (Cenace), de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se encarga de realizar estas funciones, que giran en torno a los objetivos principales de un sistema eléctrico. Estos son la continuidad en el suministro, la seguridad en la operación, la economía en el uso de los recursos disponibles en cada momento y la calidad del servicio medido en variaciones de la frecuencia y del voltaje. Dicho centro tiene a su cargo la operación del sistema eléctrico nacional, integrado en ocho áreas (véase el mapa de la fotografía de la p. 178; seis de ellas conforman el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las otras dos, correspondientes a Yucatán y Baja California, operan en forma independiente.

En el futuro, la operación del Sistema Eléctrico Nacional se llevará a cabo a través de un sistema computarizado de control distribuido, que integrará una red de sistemas de cómputo para la adquisición

de datos y el control supervisorio en tiempo real del sistema eléctrico interconectado. Este sistema, denominado Sistema de Información y Control en Tiempo Real (SICTRE), cuenta ya con una serie de programas de cómputo elaborados por el Departamento de Análisis de Redes (DAR), de la División de Sistemas de Potencia, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

El ingeniero Mauricio Mier Muth señala que el DAR surgió del mismo modo que otros departamentos del IIE que se formaron alrededor de un gran proyecto asignado por la CFE. "En particular —afirma el ingeniero Mier— el DAR se ha dedicado a colaborar con el Cenace en la solución de los problemas de la operación a corto plazo. A través de estas actividades el Departamento desarrolló los programas de aplicación avanzada de pronóstico de carga a corto plazo, coordinación hidrotérmica, despacho económico restringido, cálculo automático de intercambios y tabulación de intercambios.

"Estos programas de aplicación avanzada permitirán, por una parte, la optimización económica de la generación y de la transmisión de energía eléctrica en el sistema eléctrico nacional y, por otra, la planeación de la operación a corto plazo (1 semana)."

El ingeniero Mier describe por qué se asignó esta parte del proyecto del SICTRE al Departamento: "En un principio, la

NUMERO ESPECIAL



BOLETIN IE

CENTRALES TERMOELECTRICAS



instituto de investigaciones eléctricas

Junta Directiva

Guillermo Guerrero Villalobos
*director general de la
Comisión Federal de Electricidad
(presidente)*

Luis Cárcoba García
*representante de la Cámara
Nacional de Manufacturas Eléctricas
(secretario)*

Juan Eibenschutz Hartman
*subdirector de la
Comisión Federal de Electricidad*

Andrés Moreno Fernández
*subdirector de Construcción de la
Comisión Federal de Electricidad*

Agustín Pérez Ruiz
*subdirector de Operación de la
Comisión Federal de Electricidad*

Jorge Gutiérrez Vera
*subdirector y apoderado general de
la Compañía de Luz y Fuerza del
Centro*

Manuel Ortega Ortega
*director general del Consejo
Nacional de Ciencia y Tecnología*

José Sarukhán Kermes
*rector de la Universidad
Nacional Autónoma de México*

Alberto Escofet Artigas
*subsecretario de Energía de la
Secretaría de Energía, Minas e
Industria Paraestatal*

Oscar M. González Cuevas
*rector general de la Universidad
Autónoma Metropolitana*

Oscar Joffre Velázquez
*director general del
Instituto Politécnico Nacional*

Felipe Ramón y Castañeda
*comisario propietario del Sector
Energético de la Coordinación
General de Secretarías y
Comisarios de Contralorías de la
Secretaría de la Contraloría General
de la Federación*

Luis Almeida Durán
*director general de Programación y
Presupuesto Energético e Industrial
de la Secretaría de Programación y
Presupuesto*

Héctor Pita Esquivel
*director general de Operación
Energética, de la Secretaría de
Energía, Minas e Industria
Paraestatal*

Comité Técnico Operativo

Héctor Pita Esquivel
*Secretaría de Energía, Minas e
Industria Paraestatal
(coordinador)*

Luis Almeida Durán
*Secretaría de Programación y
Presupuesto*

Javier Pérez Saavedra
Comisión Federal de Electricidad

Felipe Ramón y Castañeda
*Secretaría de la Contraloría General
de la Federación*

Fernando A. Kohrs Aldape
*Instituto de Investigaciones
Eléctricas*

Comité Editorial

Guillermo Fernández de la Garza
Pablo Mulás del Pozo
Roberto Canales Ruiz
Eduardo Hernández Goríbar
Eduardo Lobatón González
Francisco J. Plata Olvera
Fernando A. Kohrs Aldape
Héctor Lira Valenzuela

Editor

Gabriel Nagore
Cuidado de edición
Mayavel Saborío
Zoraida Vásquez
Redactores
Alejandra Elvira
Jesús Márquez
Diseño
Ricardo Harte
Fotografía
Sergio Ortega
Distribución
Antonio Martínez
Adolfo Rojas

Agradecemos la colaboración de:

Comisión Federal de Electricidad
Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A.
Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas
(CANAME)

Interior Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos
Tel. 183 811 ext. 2224 y 2237
Télex 17 3380 INIEME
Facs. (73) 143 034

Leibnitz 14, 3o. piso
Col. Anzures
Del. M. Hidalgo
11590, México, D.F.
Tel. 531 1036

BOLETIN IIE. Es una publicación bimestral. Su distribución es gratuita dentro de la República Mexicana. Aparece la última semana de cada bimestre. Editada por el Departamento de Difusión Tecnológica, de la División de Información Tecnológica y Desarrollo Profesional, del Instituto de Investigaciones Eléctricas. El material de este boletín sólo podrá ser reproducido, parcial o totalmente, con la autorización escrita del IIE. Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores. Certificado de licitud de contenido 1044 y certificado de licitud de título 1077. Registro y autorización como correspondencia de segunda clase D6C 002 0583 Características 319321412. Tiraje: 5 000 ejemplares.

Composición tipográfica y formación
Grupo Edición, S.A. de C.V.
Moras 543-bis, Col. del Valle
03100 México, D.F.

Impresión

Talleres Gráficos de la Nación

Hoy día, la generación termoeléctrica desempeña el papel principal en la satisfacción de la demanda de energía eléctrica en nuestro país. Cerca de 70% de la producción total se genera en centrales que consumen combustóleo, carbón o gas. Este escenario prevalecerá durante los siguientes años para responder a la demanda futura de energía eléctrica.

Los estudios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) predicen un crecimiento anual de 8.3% de la demanda de energía eléctrica para el periodo 1988-1998. Los planes de construcción de centrales termoeléctricas de la empresa eléctrica mexicana consideran que la contribución de este tipo de plantas a la satisfacción de la demanda para el mismo periodo requerirá duplicar la capacidad instalada actual (de 15 490 a 30 579 megawatts). El programa de construcción correspondiente ya se ha iniciado, y para el periodo 1989-1994, se planea construir plantas termoeléctricas con una capacidad instalada de 9 498 MW, cifra que representa un poco más de la tercera parte de la capacidad total instalada actualmente en México.

La investigación y el desarrollo tecnológico, tanto para los nuevos proyectos termoeléctricos como para las centrales en operación —en áreas tales como combustión y procesos térmicos en generadores de vapor; instrumentación y control; supervisión y mantenimiento de turbinas y generadores eléctricos; sistemas de información, de adquisición de datos y registro de eventos, y simulación de procesos, entre otras—, contribuirán a elevar los niveles de disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de esta importante fuente de generación eléctrica, e impulsarán la fabricación nacional de algunos componentes, equipos y sistemas importantes en la operación de las centrales.

El impulso que la CFE ha dado al desarrollo de estudios científicos y tecnológicos en las áreas mencionadas ha permitido al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) integrar y consolidar una amplia infraestructura científica y tecnológica en materia de centrales termoeléctricas. Dicha infraestructura apoyará a la CFE a enfrentar el enorme reto que representará satisfacer de la mejor manera la demanda de energía eléctrica en nuestro país en el próximo decenio.

BOLETIN *ue*



DVIE - DIC - E 19 - L. 19 - 6. 1 - 185-0

1975

1995

Políticas

231

Hacia un sector eléctrico moderno y competitivo, entrevista con el secretario de Energía.

234

Mensaje del director general de la Comisión Federal de Electricidad y presidente de la Junta Directiva del IIE.

236

Ciencia y tecnología, camino al desarrollo/Entrevista con el director general del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

238

Política de energéticos para el sector eléctrico/ Entrevista con el subsecretario de Política y Desarrollo de Energéticos de la Secretaría de Energía.

240

Productividad en investigación/Entrevista con el comisario público propietario del Sector de Energía y Electricidad de la Secretaría de la Contraloría y Desarrollo Administrativo.

241

Luz y Fuerza del Centro: más de 90 años en el hogar de millones de mexicanos/Entrevista con el director general de Luz y Fuerza del Centro.

Investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación

243

El IIE, fuente de servicios tecnológicos especializados para el sector eléctrico/Entrevista con el director ejecutivo del IIE.

244

El sector eléctrico se prepara para el próximo siglo/CFE: entrevista con los subdirectores de Generación, de Transmisión, Transformación y Control, y de Distribución y con el gerente de Centrales Nucleoeléctricas; LyFC: entrevista con los subdirectores Técnico, de Distribución y Comercialización y de Producción.

250

Innovación tecnológica y el sector eléctrico en México/ Directores de las divisiones de Fuentes de Energía, Sistemas de Control y Sistemas Eléctricos.

259

Las líneas de desarrollo como conductoras de la investigación a largo plazo en el IIE/Directores de las divisiones de Planeación y Finanzas y de Informática y Desarrollo Profesional.

Sistemas eléctricos del futuro

263

El futuro de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica/Entrevistas con ocho investigadores del IIE.

265

La industria de las manufacturas eléctricas/ Entrevista con el presidente de la Caname.

267

Integración entre instituciones de educación superior y centros de investigación y desarrollo tecnológicos/Entrevista con el rector general de la UAM, con el secretario académico del IPN y con el director de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.



El futuro de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica

La generación eléctrica mundial se enfrenta a varias encrucijadas. Una de ellas es el mayor crecimiento de la demanda pero con limitaciones de capitales para construir instalaciones y con políticas más estrictas tanto en lo que respecta al mejor uso de los recursos naturales como a la preservación del medio ambiente. Esto ha motivado la búsqueda de soluciones tecnológicas que ayuden a superar dicho desafío, así como de nuevas formas de vida y de consumo orientadas más a la conservación de nuestro hábitat que al desperdicio. Ocho especialistas del IIE en algunas de las principales áreas de investigación vinculadas a los procesos de la generación, transmisión y distribución y uso de la energía eléctrica, nos brindan en la siguiente serie de entrevistas su visión relativa a los sistemas eléctricos del futuro.

Electricidad mediante combustibles fósiles

En la actualidad, cerca de las dos terceras partes de la electricidad mundial se genera con combustibles fósiles. Todo parece indicar que esta situación no cambiará en las próximas décadas. Como sabemos, el problema al respecto es la preservación de los recursos petroleros y la reducción de los efectos ambientales que ocasiona su combustión. El doctor Anselmo Chávez Argüelles, jefe del Departamento de Sistemas de Combustión, inicia este tema señalando que el principal problema

que tendrán que resolver las empresas eléctricas del mundo en los próximos años será quemar eficiente y limpiamente los combustibles fósiles, principalmente el carbón y los residuos de la refinación del petróleo.

Para el doctor en termodinámica por la Universidad Técnica de Munich, Alemania, la generación eléctrica en México dentro de 30 años ofrecerá el siguiente escenario: el 50 por ciento con combustibles fósiles, el 30 por ciento con hidroelectricidad y el 20 por ciento restante con nucleoelectricas.

"Ante este panorama y la preocupación mundial por limitar la producción de dióxido de carbono, así como de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno —afirma el entrevistado— los estudios para encontrar cada vez formas más eficientes y limpias de quemar los combustibles seguirán siendo de suma importancia.

"En México, dos de las vertientes al respecto son quemar combustibles más limpios con cierto grado de desulfurización o modificarlos, por ejemplo, emulsificándolos para mejorar la atomización y reducir la producción de partículas inquemadas y de compuestos de nitrógeno. Otra de las opciones en la que a nivel mundial se tienen muchas esperanzas es la gasificación. Este es el proceso mediante el cual el combustible reacciona con oxígeno o aire dentro de un recipiente a presión donde se produce un gas sintético formado por monóxido de carbono e hidrógeno. Este gas se usa entonces como combustible en un ciclo Brayton. Si además este ciclo se combina con un ciclo Rankine convencional, la eficiencia resultante aumenta considerablemente y se producen menos compuestos contaminantes".

El doctor Chávez comenta que en la actualidad hay una gran expectativa en todo el mundo respecto a los resultados de una planta de gasificación de demostración instalada en Holanda, porque de ahí se obtendrán experiencias muy valiosas



para afinar esta tecnología y conseguir tal vez una reducción considerable de gases contaminantes a la atmósfera en los próximos años.

La diversificación de las fuentes de generación es otro de los puntos donde se debe centrar la atención en opinión del jefe de Sistemas de Combustión. "Como ya mencioné, en el futuro energético de México es muy probable que junto con la nucleoelectricidad se recurra al carbón. Se estima que las reservas petroleras durarán aproximadamente 50 años, en tanto que las de carbón en el mundo pueden llegar a 250 años. Asimismo, la tecnología actual permite que prácticamente no se emitan a la atmósfera los productos de la combustión de este mineral".

Sin embargo, el doctor Chávez indicó que será necesario intensificar la investigación y los proyectos de demostración de fuentes no convencionales, pero no pensando en satisfacer la demanda sino en mejorar el medio ambiente, quemando, por ejemplo, la basura u obteniendo metano para su uso en procesos de combustión.

El doctor Chávez resumió este punto indicando que son diversas las opciones, pero que en general se observa que se mantendrá la tendencia actual de mayor participación de los combustibles fósiles, y que la decisión final sobre los energéticos del futuro dependerá evidentemente de la tecnología más limpia y económica, antes de que se logren avances para explotar comercial-

mente otras tecnologías como la fusión nuclear.

Señaló también que en los países desarrollados es necesario continuar con legislaciones más estrictas para reducir las emisiones, pero que en países en desarrollo estas legislaciones deberán permitir que los procesos de combustión sean renta-

bles, pues existe el obstáculo de los altos costos de las inversiones para limpiar o eliminar los productos de combustión.

En cuanto al papel futuro de los centros de investigación y del propio Instituto en temas como la generación eléctrica con combustibles fósiles y la preservación ambiental,

el doctor Chávez señala que es necesario aumentar el porcentaje del PIB en investigación y desarrollo tecnológico, ya que países de desarrollo similar al nuestro como Brasil y Argentina destinan varias veces más recursos en este rubro. Asimismo, indicó que "el IIE ha alcanzado la madurez suficiente para

262 ←

CFE, coordinador de las ocho áreas de control del sistema interconectado nacional. La segunda, en operación desde 1976, es responsable de 33 subestaciones del área metropolitana operadas a control remoto. La tercera está funcionando en la ciudad de Toluca y fue desarrollada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, bajo promoción de Luz y Fuerza del Centro, para iniciar la estructuración informática de la zona.

Luz y Fuerza del Centro está a punto de iniciar la puesta en servicio de un poderoso sistema del tipo abierto, que representará un cambio tecnológico de vanguardia, mismo que sustituirá al viejo sistema de control instalado en 1976. El sistema será de los primeros en operación en el mundo y cuenta con dos estaciones maestras de control interoperando, que soportarán su adquisición de datos y control en tiempo real en cinco frentes de comunicaciones, tres de los cuales serán nodos concentradores remotos, estratégicamente ubicados con el fin de enlazar las terminales para la captura de información en las subestaciones y ejecutar el telecontrol. El sistema corresponde a una red de área extendida; incluirá un sistema experto de alarmas en una de sus estaciones maestras y un sistema de información geográfica en la otra, ambas con funcionalidad en tiempo real.

Tendencias

Dentro del plan informático para operar el sistema eléctrico, Luz y Fuerza del Centro sustenta aplicar estructuras abiertas de cómputo en red, con la ventaja de poder distribuir su capacidad de procesamiento tanto como sea necesario, permitiendo utilizar productos de diferentes fabricantes, lo que será benéfico también al facilitar su adición y actualización oportuna. Se considera integrar la informática con estaciones maestras de control y frentes de adquisición de datos locales y remotos interoperando, que evitan la formación de islas informáticas.

Como aplicaciones se visualiza la inclusión de sistemas expertos que manejan en tiempo real los tres escenarios de un disturbio, el procesamiento inteligente de alarmas, la localización experta de fallas y la restauración.

Además, con el libre acceso a la red, reglamentado

en la ley de la industria eléctrica, será fundamentalmente importante integrar las aplicaciones que permitan evaluar en línea el margen de seguridad y determinar la estabilidad dinámica de voltaje. Asimismo, se deberá efectuar el cálculo del uso de red por el transporte de energía consecuencia de las transacciones entre particulares. Las funciones deberán complementarse con un simulador de entrenamiento acoplado con la estación maestra de control para crear los ambientes de simulación, análisis, capacitación y estudios. Sobre el despacho económico de generación no nos queda claro cómo deberá estructurarse esta función, su coordinación e interacción funcional con las áreas de control. Sin embargo, sí es claro que algorítmicamente ahora deberán considerarse los precios del mercado energético y la restricción de emisiones contaminantes a la atmósfera.

Acciones

Debido a las condiciones energéticas del sistema eléctrico de Luz y Fuerza del Centro, se han implementado acciones para disminuir los efectos del desbalance entre la demanda y la generación local. Por un lado, la construcción de nuevos enlaces por parte de la Comisión Federal de Electricidad para robustecer la infraestructura de transmisión disponible y, por otro lado, las medidas para el control de voltaje adoptadas por Luz y Fuerza del Centro.

Además, se está trabajando con el Centro Nacional de Control de Energía en un proyecto de actualización tecnológica de la plataforma informática de control nacional, adecuándola a los nuevos y futuros requerimientos operativos, de seguridad y de economía. A través de este proyecto, con un horizonte de desarrollo a cinco años, la estación maestra de control de área de LyFC se reemplazará, y en conjunto con el nuevo sistema en proceso de instalación, se logrará integrar la estructura informática distribuida y abierta de LyFC, soportando también el respaldo entre centros de control y disponiendo siempre de herramientas de control.

Otra acción vinculada con los procesos de producción y transmisión de energía eléctrica, se relaciona con una próxima regionalización operativa. La organización prevista constará de cinco centros de control jerárquicos, construyendo cuatro nuevos edificios de operación: Metropolitano Norte, Metropolitano Sur, Toluca y Pachuca.

pasar del seguimiento y adaptación de tecnologías a la innovación tecnológica en varios campos, entre ellos los sistemas de combustión de combustóleo".

Fuentes no convencionales

La comunidad internacional coincide en que es difícil que el escenario actual de la producción mundial cambie de manera significativa en las siguientes décadas en lo que respecta a la participación de las fuentes con que se genera la electricidad. Sin embargo, las presiones por la preservación del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales también están impulsando esquemas con una mayor partici-

pación de las fuentes no convencionales (sol, viento, biomasa y pequeñas caídas de agua), que algunos piensan podrían ser las fuentes de los próximos siglos, si la humanidad da un giro en su forma de usar la energía.

Uno de ellos es el doctor Jorge M. Huacuz Villamar, jefe del Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía, quien inició sus comentarios señalando que tal vez el mundo actual sería muy diferente si se hubiera descubierto el magnetismo antes que el fuego. "Todo ha girado en torno a la cultura del fuego: transporte, producción de fuerza mecánica, electricidad... Ahora la humanidad se está dando cuenta de los efectos dañinos de ese



esquema. Además, la creciente conciencia por el cuidado del hábitat humano se está enlazando a otro hecho importante: la inoperabilidad de los grandes esquemas centra-

La industria de las manufacturas eléctricas

Entrevista con el ingeniero Salvador Palafox Trujillo, presidente de la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas, Caname

El ingeniero Salvador Palafox T., afirma que entre los principales problemas que afectan a este sector se cuenta: "La caída vertical de las compras de la CFE a la industria nacional, lo cual ha causado seria desocupación de los factores de la producción. La recesión de la economía del país, que ha agravado la situación descrita en el punto anterior. El aumento desmedido de las importaciones que pasaron de 2,028 millones de dólares en 1989 a 5,052 millones de dólares en 1994, elevando el déficit comercial del sector de 530 millones de dólares en 1989 a 2,338 millones de dólares en 1994; a junio de 1995 el déficit comercial era de 443 millones de dólares. El ejercicio del Tratado de Libre Comercio ha producido un déficit comercial con Estados Unidos de 1,757 millones de dólares en 1994 y de 58 millones de dólares con Canadá durante el mismo período, lo que ha deteriorado aún más la situación del sector.

"Por todo lo anterior muchas empresas se han convertido en comercializadoras de productos importantes y otras han cerrado. Las que se mantienen 'vivas' lo logran con muchas dificultades, limitaciones financieras y recortes de personal.

"Por otra parte, las tendencias tecnológicas que tienen



mayor posibilidad de seguirse para ampliar la participación de la industria eléctrica nacional en el sector eléctrico son:

- Optimizar las tecnologías de procesos productivos de motores eléctricos arriba de 300 CP y hasta 12,000 CP y modernizar sus cadenas productivas y de comercialización.
- Aumentar la capacidad eléctrica de las plantas de luz y de los generadores de electricidad, mejorando sus costos.
- Introducir la técnica electrónica en los balastos y fabricar focos y luminarias de bajo consumo de corriente y fuerte luminosidad.
- Lograr una mayor eficiencia en la fabricación y operación de transformadores de potencia y hacer más livianos los de distribución y que generen menos pérdidas.
- Desarrollar las fibras ópticas.
- Hacer buenos estudios para una eficiente sustitución de importaciones de partes componentes de equipos diversos, según selecciones de los fabricantes, principalmente de equipo de protección, seguridad y control, en alta, baja y mediana tensión".

lizados, que los países en desarrollo ya no pueden seguir a expensas de su soberanía". El doctor Huacuz señala que incluso los países desarrollados van a tener dificultades por la escasez de capitales y las presiones ambientales para construir grandes centrales e instalaciones eléctricas.

Afirma que otro punto en contra del esquema actual es la limitación en la capacidad de extracción y refinación de los recursos energéticos convencionales, por lo que tal vez sea más conveniente conservarlos como elementos estratégicos de negociación futura que quemarlos ahora y contaminar.

En cambio, en un esquema diversificado —señala el jefe de Fuentes No Convencionales y doctor en ingeniería física por la Universidad de California, San Diego— puede haber más flexibilidad en el manejo de los recursos y mayor capacidad de negociación. "Estoy convencido de que tarde o temprano se van a emprender acciones institucionales, legislativas, para ordenar las cosas en aras de la sobrevivencia con esquemas de abatimiento energético que no sean restrictivos y que no comprometan ni al ambiente ni a la libertad de opción de los individuos.

"La sociedad debe cambiar si quiere un mejor futuro y las fuentes

no convencionales son una alternativa viable para apoyar este cambio, no sólo en lo tecnológico, sino también respecto a la evolución de la sociedad hacia un estilo diferente de vida".

¿Pero es viable un esquema de este tipo?, preguntamos al entrevistado, que responde: "No es obligatorio recorrer el mismo camino de otros y cometer los mismos errores. Más bien, podemos aprovechar lo aprendido de esos fracasos. El esquema de desarrollo industrial es insostenible y debe virarse hacia otro esquema de forma de vida, con comodidades y tecnología, por supuesto, pero sin los males del esquema industrial tradicional. Los países desarrollados ya se han dado cuenta de ello y por eso mismo destinan cantidades considerables a la investigación de fuentes no convencionales de energía.

"Por otra parte, la sociedad actual tiende más a los servicios que a la gran producción industrial. El esquema de grandes inversiones y pocos empleos debe cambiarse. En mi opinión, se tiende hacia una sociedad basada en servicios y en un uso exagerado de la tecnología de la información. Tal es el caso de algunos países avanzados".

El doctor Huacuz agrega que estos esquemas podrían ser más baratos y se basarían en dos as-

pectos: la efficientización de los procesos productivos y la disminución de muchos productos industriales suntuosos. "Por ejemplo, con el uso de la tecnología informática se reduciría la producción de muchos productos como el papel, no habría tantos viajes por los avances en las telecomunicaciones; lo mismo ocurriría en otras ramas de la actividad humana. La demanda energética se estabilizaría y bajaría".

El entrevistado comenta que esto no quiere decir que vayan a desaparecer las otras fuentes y que sólo van a existir las no convencionales. Al respecto señala que la oferta de energía eléctrica va a integrarse por un mosaico de opciones, donde la nucleoelectricidad puede tener una participación importante a escala mundial, pero que en su opinión a la larga la generación eléctrica va a ser predominantemente fotovoltaica en los sectores doméstico y de servicios. "La nucleoelectricidad o las grandes centrales serán importantes donde se requiera gran potencia. Habrá generación centralizada para grandes consumidores, y plantas más pequeñas con generación distribuida, con capacidades de 30 MW o menos, predominantemente basadas en fuentes locales de energía, incluidas las no convencionales, para centros de consumo menores. Así por ejemplo, la basura se utili-

Sin embargo, el presidente de la Caname aclaró "que si las políticas del Gobierno Federal en relación con el sector eléctrico no cambian —contracción presupuestal nacional y favorecimiento a las compras en el extranjero financiadas en 'paquetes llave en mano' —la participación de las manufacturas eléctricas se irán minimizando hasta llegar a tener un volumen no significativo.

"Por otra parte —añade— si las políticas del Gobierno Federal cambian para privilegiar las compras nacionales y ejercer un presupuesto de la Comisión Federal de Electricidad mayor y en relación con las necesidades del desarrollo eléctrico del país, la industria de manufacturas eléctricas podría remontar hasta llegar a tener la situación general que experimentó en los años 1990 y 1991".

El ingeniero Palafox aseguró que en estudios realizados por la Subcomisión de Competitividad de la Comisión

Consultiva Mixta de Abastecimientos del Sector Eléctrico (CCMASE), durante 1994 y principios de 1995, quedó demostrado que los productos que fabrica la industria nacional de manufacturas eléctricas son, en su gran mayoría, competitivos en calidad y precio con los importados. "El problema básico no está ahí —afirma el Ingeniero Palafox—, sino en los financiamientos, con los cuales cuentan ampliamente los importados y los nacionales no. Los nacionales gozan de un crédito caro que los saca de competencia, además de que actualmente, por la crisis, no tienen liquidez en una buena parte de casos. Así, para lograr competitividad se requiere de créditos baratos al comprador y de liquidez suficiente de las empresas proveedoras. De lo contrario, el círculo vicioso de competitividad-financiamiento-liquidez no se rompe, y seguimos atados a la importación".

zará para generar la electricidad que requerirán servicios públicos como el alumbrado. También veremos la microgeneración, miles y miles de generadores fotovoltaicos en el techo de las casas, máquinas eólicas en centros agrícolas y parques industriales donde el recurso del viento sea abundante".

De acuerdo con esta perspectiva, para el doctor Huacuz el futuro del sistema eléctrico podría presentar el siguiente panorama: "Estamos hablando de una demanda eléctrica menor en un plazo más largo como resultado de una mejor eficiencia en el uso de la electricidad. También de una demanda diferente por el cambio esperado en los patrones de vida de la sociedad. Los altos hornos de

arco, por ejemplo, serían sustituidos por hornos activados por el sol; con acciones de este tipo la demanda eléctrica en grandes volúmenes tendería a estabilizarse y, a la larga, a disminuir. Mucha de la demanda se tornará distribuida pero de altísima calidad, ya que en 50 años los consumidores van a ser muy exigentes, porque van a depender más de la electricidad. En este esquema la transmisión a grandes distancias no será tan necesaria. Vamos a poder generar en nuestras casas, que dentro de 50 años van a ser más eficientes, y a consumir un décimo de lo que se consume en la actualidad. Habrán nuevas tecnologías domésticas, todo con base en equipos eléctricos más acordes. La

electricidad se podrá convertir directamente en frío mediante dispositivos sin partes móviles que sustituirán a los motores de los actuales: refrigeradores y, en sustitución de fuego, se recurrirá a tecnologías como la combustión sin flama basada en hidrógeno, también producido domésticamente a partir de agua con energía solar".

El jefe de Fuentes No Convencionales de Energía puntualiza que esto no se aleja de la realidad. "Este es un esquema que conviene a las empresas eléctricas. Como se sabe un problema apremiante es el posible déficit de potencia para abastecer a las grandes ciudades en las horas pico. Para superar este problema, la empresa eléctrica tiene

Integración entre instituciones de educación superior y centros de investigación y desarrollo tecnológicos

La relación entre los centros de investigación y las instituciones de educación superior en nuestro país ha comenzado a estrecharse ante la necesidad de responder adecuadamente a la demanda de recursos humanos calificados en todas las áreas productivas. Este acercamiento se ha dado a partir de nuevos esquemas que buscan una mayor participación de los investigadores en las aulas y de la adopción de los laboratorios de los centros especializados como lugares ideales de práctica para los estudiantes. En las siguientes tres entrevistas, funcionarios de instituciones de educación superior nos presentan un panorama de cómo se ha desarrollado la integración señalada, sus retos, alcances y la participación que el IIE ha tenido como formador de investigadores a partir de sus programas de becas para la realización de tesis.

Doctor Julio Rubio Oca, rector general de la Universidad Autónoma Metropolitana

El doctor Julio Rubio Oca afirmó que la formación



universitaria de todos niveles, para ser integral, debieran realizarla profesores con experiencia en investigación, "esto es una verdad incontrovertible a nivel de posgrado y, muy particularmente, en lo que respecta a la formación de investigadores".

Para el doctor Rubio, es de gran importancia la formación de personal con doctorado: "Los índices relacionados con el número de investigadores que hay en nuestro país nos dan una idea del esfuerzo que México debe realizar en la formación de personal con doctorado. El Sistema Nacional de Investigadores, que seguramente agrupa a la gran mayoría de los investigadores productivos que tenemos, consta de alrededor de 6,500 miembros. Esto, en un país con 90 millones de habitantes. Contrástese esta proporción con la propia de países desarrollados, donde hay 30 o 40 investigadores por cada 10,000 habitantes.

"Por ello, es mi convicción que no deberían existir en México instituciones de educación superior o centros de investigación que no estén comprometidos con la formación de recursos humanos de alto nivel. Aquellas instituciones educativas que han logrado conjuntar grupos de investigación productivos y consolidados

dos opciones: conseguir capitales para construir nuevas instalaciones o reducir la demanda, por ejemplo, con un esquema de generación descentralizado, en el cual el usuario aporta el capital de inversión. Consideremos tan sólo que mil casas generando 1 kW suman 1 MW. En este caso, las empresas eléctricas estatales tendrán que ir adoptando un papel distinto, incluyendo el desarrollo de normatividad técnica para alojar estos nuevos esquemas de generación".

El especialista indica que no está hablando de privatización total. "Más bien —añade— tenemos que hacer conciencia colectiva; no se trata de cambiar el rumbo sino los esquemas. El sistema eléctrico que creo

va a ser el del futuro será una mezcla de grandes centrales que surtirán grandes cargas a cortas distancias, coexistiendo con pequeñas centrales de generación distribuida y cientos de miles de unidades de microgeneración con base en fuentes no convencionales".

En cuanto al futuro del IIE, el investigador señala que va a requerir una gran versatilidad, flexibilidad y velocidad de respuesta acordes con los ritmos y las direcciones en que se den los cambios. Sin embargo, hay funciones que se podrían eliminar por anticipado. "Por ejemplo, puntualiza, no creo que el IIE se dedique a desarrollar en sus aspectos fundamentales las nuevas tecnologías de generación o uso de elec-

tricidad o a producir nuevos materiales para el aprovechamiento de las energías no convencionales. Esto ya se está dando en otras partes y sólo podríamos ser competitivos en ese campo si los esquemas de financiamiento de nuestra labor cambiaran favorablemente y de manera radical. En vez de eso debemos definir nuestra vocación con base en la evolución del sector eléctrico y el papel que habrán de desempeñar los diversos actores del nuevo mosaico energético. Por ejemplo, si la CFE va a desempeñar un papel normativo, lo cual me parece una opción muy viable, el IIE estará realizando en buena medida investigación en apoyo al desarrollo de la normatividad técnica, que es un

deberían tener entre sus prioridades la formación de recursos humanos de calidad, de ahí el papel fundamental que deben jugar los centros de investigación. La colaboración entre los especialistas de estos organismos y los profesores de los programas de posgrado que ofrecen los institutos de educación superior debería ser muy estrecha".

Para el funcionario, las infraestructuras física, humana, material y de servicios que han logrado adquirir los centros de investigación deberían estar a la disposición de los programas de formación de nuevos investigadores que tienen las universidades.

Con respecto a los nuevos esquemas para la realización de estudios de posgrado por investigación fuera de las universidades, el doctor Rubio aseguró que en nuestro país la formación de nuevos investigadores la realizan las instituciones de educación superior, particularmente las públicas, pero aclara que lamentablemente esta actividad la realizan consistentemente tan sólo un puñado de centros educativos. "Hay desequilibrio geográfico, por áreas del conocimiento y hasta institucionales", reconoció.

El funcionario indicó que los programas de posgrado deben estar sustentados en grupos de investigadores consolidados y productivos; además, externó su preocupación porque los nuevos esquemas de realización de posgrado dieran lugar a programas que por no tener esa característica no fueran de calidad y que surjan sólo ante la urgencia de formar nuevos cuadros. "Sí, como se plantean, contendrán rigor académico y estarán basados más que otra cosa en la investigación, serán de utilidad y ayudarán a eliminar los doctorados excesivamente escolarizados que todavía padecemos

"Sin embargo, opino que estos nuevos esquemas 'fuera de las universidades', debieran, antes de competir o duplicar, complementar los que ofrecen las instituciones de educación superior. La colaboración a la que me referí antes jugará en este caso un papel fundamental. No tendría mucho sentido iniciar una competencia entre distintas organizaciones por los recursos que, al fin de cuentas, siguen proviniendo básicamente de la misma bolsa, la del gobierno federal".

En cuanto a las actividades de formación de recursos humanos especializados que el IIE realiza para el sector eléctrico, el doctor Rubio dijo estar al tanto de la captación, por parte del IIE, de estudiantes destacados para la realización de sus tesis, tanto de licenciatura como de posgrado, y recordó que académicos de la institución que él encabeza participan en los jurados que año con año se integran para premiar a las mejores tesis, certámenes con los cuales se estimula la búsqueda de soluciones que afectan al sector eléctrico. "Veríamos con agrado que el IIE intensificara estas funciones con miras, por ejemplo, a iniciar programas de formación de investigadores. En la UAM, ciertamente, estaríamos dispuestos a trabajar conjuntamente con el IIE en este sentido".

Para finalizar, el funcionario habló sobre los retos que enfrentarán las instituciones de educación superior en cuanto a formación de especialistas que fortalezcan los cuadros científicos y técnicos del país: "Cualquier programa nacional de educación superior o de investigación científica y desarrollo tecnológico deberá tener como objetivo fundamental la formación de recursos humanos, de cuadros científicos. La pertinencia social de nuestras universidades será mayor cuanto más logremos contribuir a este propósito. Los países desarrollados han

trabajo que va a requerir laboratorios, asimilar tecnología, avanzar en ellas e innovar".

El doctor Huacuz indica que una mayor participación en los aspectos normativos debe ser un sólido apoyo en el desarrollo de un mercado eléctrico ordenado, en el que todas las opciones de generación tengan oportunidades equitativas de participación, y esto incluye la consideración de sus costos sociales y ambientales. Añade que el IIE también desempeñará un papel importante en el desarrollo de la infraestructura industrial para servicios, apoyando la formación de cuadros de ingeniería y sus herramientas de trabajo, acordes con la generación distribuida. "Para que opere un sistema de este tipo, será

necesaria una industria adecuada, que cuente con el soporte en cuanto a métodos ingenieriles y guías de diseño, construcción, operación y mantenimiento. El IIE debe ser aliado de esas empresas y un valioso apoyo para los servicios.

"A nivel de usuario, en microgeneración, el IIE estará muy ligado al usuario autosuficiente a través, por ejemplo, de Internet. En el futuro, no va a dejar de haber fallas, pero las instalaciones domésticas tendrán sus propios sistemas inteligentes de diagnóstico y reparación de fallas menores. Estos sistemas podrán ser supervisados por una computadora central para el caso necesario contactar con los centros de servicio, que incluso podrían ser

los propios centros de investigación en cuanto a la reparación de fallas mayores. Esto dará pie a muchas innovaciones en el mercado de la microgeneración. Después vendrán otros 50 años para seguir buscando nuevos esquemas para el sector eléctrico", concluye el doctor Jorge Huacuz.

Instrumentación y control en centrales generadoras

En el próximo siglo mucho habrá que hacer en el corazón de las centrales generadoras, los cuartos de control, para superar el reto de una generación más eficiente y limpia. Los avances en la computación aunados al desarrollo en otros campos como

logrado poner ciencia y tecnología al servicio de las grandes tareas nacionales y en México nuestros centros educativos deberán estar cada vez más conscientes de esta estrategia".

Maestro en ciencias Jorge A. Maciel Suárez, secretario académico del Instituto Politécnico Nacional

Para el M. en C. Jorge A. Maciel Suárez, los centros de investigación y las instituciones educativas comparten la responsabilidad de formación académica, pues aunque en los primeros la función docente no aparece como intrínseca, ni sería reprochable su ausencia, es frecuente encontrar la relación formativa, la cual se origina por el conocimiento personal o profesional entre el académico y el investigador.

El maestro Maciel afirmó que ambos tipos de instituciones deberán encontrar formas de participación conjunta en el proceso de formación de recursos humanos de alta calidad, especialmente de doctorado y maestría.

Señaló que una forma posible para enlazar académicamente ambas partes es que los programas de posgrado de las instituciones educativas se extiendan hacia los centros especializados declarándolos laboratorios asociados y designando a sus investigadores, profesores invitados; esto fomentaría un contacto más cercano del alumnado con la verdadera actividad de investigación, con lo que se alcanzaría un mejor nivel académico.

Al referirse a los nuevos esquemas para la realización de estudios de posgrado por investigación fuera de las



universidades, sus ventajas y desventajas y en qué medida pueden colaborar las instituciones educativas, el maestro Maciel aseguró que, particularmente en el caso del doctorado, esos esquemas son una respuesta coherente a la urgente necesidad

del país por incrementar, en el menor plazo posible, el número de doctores en ciencias aprovechando óptimamente la infraestructura disponible.

"Para ponderar adecuadamente esta modalidad, es necesario partir del perfil del investigador, ya que el objetivo primordial del doctorado es formar investigadores. El investigador se caracteriza por haber aprendido a través de la construcción del conocimiento. Esta formación se logra en un medio que contiene lo necesario; sin embargo, los centros de investigación carecen del ambiente académico en el que el proceso de formación es supervisado y evaluado por un comité de doctores, por lo que es fundamental que el centro de investigación una esfuerzos con la institución educativa superior y que sus investigadores conjunten esfuerzos para conformar el espacio académico necesario".

Para el funcionario politécnico, las actividades del IIE en cuanto a la promoción de la formación de recursos



la modelación matemática contribuirán notablemente en este sentido. Una de las áreas de mayor avance será la relativa a estrategias de control avanzadas. Sobre el tema

nos habla el ingeniero Rafael Chávez Trujillo, jefe del Departamento de Instrumentación y Control: "Una gran desventaja de los sistemas de control actuales de las centrales termoeléctricas es la dificultad para implementar innovaciones con sistemas digitales, pues la mayor parte se construyeron con sistemas de instrumentación y control basados en tecnología neumática y electrónica analógica o dedicada. Por ello resulta difícil implantar estrategias de control avanzadas, cuyo propósito es ajustar de manera más eficaz el estado de las variables del proceso de generación dentro de los intervalos de control que resulten en una mejor operación".

El jefe de Instrumentación y Con-

trol con estudios de especialización en el área de control automático por la Universidad de Nantes, en Francia, menciona que este es un problema en todo el mundo, pues no se ha podido implantar lo que se conoce como control óptimo. "Se trata de un concepto que ha estado por más de cuarenta años en los escritorios de los académicos. Su eje principal es optimar el proceso de generación".

El entrevistado abunda en este punto afirmando que en ciertas partes del proceso se agrega energía para, por ejemplo, elevar una presión (una bomba) y después reducirla en otro lado (una válvula). "Por ello hay márgenes considerables para pensar en otros diseños

humanos especializados para el sector eléctrico ha sido importante: "Quizá lo más notable sean los Certámenes Nacionales de Tesis, así como su programa de becas para la realización de tesis bajo la tutela de sus investigadores y el auspicio del Conacyt".

El maestro Maciel consideró que el IIE, junto con el Instituto Politécnico Nacional, ha jugado un papel importante para que la Comisión Federal de Electricidad haya decidido canalizar apoyos económicos en favor del posgrado de ingeniería eléctrica y últimamente para otros posgrados en el área.

Finalmente, el entrevistado aseguró que los retos que enfrentarán las instituciones educativas en cuanto a la formación de especialistas que fortalezcan los cuadros científicos y técnicos del país pueden derivarse de los siguientes hechos:

- Respecto a la vinculación entre las instituciones de educación superior y el sector productivo, el país enfrenta el reto de encontrar formas efectivas de vinculación, quizás ampliando los espacios académicos hasta el interior de la empresa misma.

- La densidad de investigadores en relación con la población total deberá incrementarse. Hoy en día, el número de investigadores es de cuatro por cada 10,000 habitantes; la proporción deberá ser de cuando menos 40 por cada 10,000.

- La infraestructura de las instituciones de educación superior para la investigación es inadecuada, por lo que deben canalizarse apoyos económicos a los grupos de investigación.

- La estructura presupuestal de las instituciones de educación superior para apoyar la investigación hace obligatoria la creación de una normatividad adecuada

para posibilitar la asignación presupuestal suficiente, así como el ejercicio ágil y oportuno del presupuesto.

- En nuestro país existe una tradición científica y tecnológica incipiente, por lo que es necesario crear e impulsar permanentemente los medios para atraer a los jóvenes hacia la carrera de la ciencia y la tecnología.

- Hasta ahora el aparato productivo nacional ha tenido una mentalidad dependiente, por lo que debe procurarse la conformación y consolidación de grupos de investigación que por su formalidad, capacidad y productividad inspiren confianza a la posible empresa demandante de servicios.

- Debe existir una planeación y aplicación de acciones de corto plazo. Aquí, el reto consiste en incorporar en la toma de decisiones los criterios de los grupos consolidados de académicos que se hayan distinguido por su productividad.

Ingeniero José Manuel Covarrubias Solís, director de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

"El desarrollo futuro de nuestro país requiere de un crecimiento acentuado de la formación de recursos humanos del más alto nivel dentro de nuestro sistema educativo; esto representa un crecimiento de los estudios de posgrado, es decir, especializaciones, maestrías y doctorados. La realización de estudios de posgrado en el extranjero se ha hecho sumamente restrictiva por razón de la crisis económica que padecemos y que no se superará en el corto plazo, por lo que las pocas becas que puedan otorgarse deberán resolverse para áreas estratégicas o prioritarias", así respondió el ingeniero

que incrementen la eficiencia, confiabilidad y vida de servicio de las plantas. Se habla de control inteligente, control experto, difuso, robusto, predictivo. Todas son estrategias de control modernas con algoritmos muy complicados, que se basan en ecuaciones matemáticas que posibilitan mantener con mayor rapidez los valores de las variables que determinan el proceso en los valores preestablecidos para la operación óptima".

El ingeniero Chávez Trujillo indica que serán muchas las ventajas que se conseguirán con esta tecnología: "Con las estrategias modernas de control se logran reducir costos de mantenimiento, mejorar el régimen térmico, esto es, más megawatts

producidos con la misma cantidad de combustible y bajar los costos de operación. Además, al incorporar control moderno se previenen fatigas de materiales, se eliminan esfuerzos, lo que repercute en la vida de los equipos de las plantas. Otro aspecto muy importante es que las mediciones de desechos y emisiones pueden formar parte de los lazos de control basados en estrategias modernas.

"Para ello, es necesario primero modernizar las plantas con sistemas digitales para luego poder implantar estrategias de control avanzadas. Esta es una actividad que en México la CFE ya está emprendiendo, pero las asignaciones presupuestales limitan la rapidez de estas acciones

de modernización.

"Otro de los problemas es que estas estrategias tienen que compararse contra las convencionales y como no es posible hacerlo con las plantas en operación, es necesario utilizar simulaciones".

Para el ingeniero Chávez, los sistemas de instrumentación y control del futuro incorporarán matemáticas más avanzadas y dejarán de lado los tableros para dar paso a monitores de computadora interactivos. También serán comunes la comunicación por voz y el control automatizado y técnicas de multimedia y realidad virtual para apoyar el control. Para ello se requerirán lazos de control muy avanzados. El especialista concluye sus comentarios



José Manuel Covarrubias Solís, director de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, al ser cuestionado sobre cuál debe ser la relación entre los centros de investigación y las instituciones académicas con

respecto a la formación de recursos humanos.

Para el entrevistado, corresponde al propio sistema de posgrado nacional hacer un esfuerzo para lograr el crecimiento que se requiere en la formación de recursos humanos de alto nivel, pues el crecimiento en cantidad y calidad de la investigación y el desarrollo tecnológico y la necesidad de mejorar la formación profesional con personal académico con posgrado, determinan la necesidad urgente de crecimiento en ese nivel educativo. "Ante esta tarea y responsabilidad estratégica en nuestro país, lo menos que puede esperarse y que debe obtenerse, es una estrecha vinculación y colaboración entre centros de investigación e instituciones educativas para que todo aquel que pueda contribuir a la nueva demanda de estudios de posgrado lo haga, sin importar en dónde se encuentre ubicado. En igual forma, deben evitarse las duplicidades en inversión de infraestructura y equipamiento para el desarrollo de la docencia y las

líneas de investigación necesarias para este objetivo".

El funcionario universitario reconoció las ventajas de los nuevos esquemas para la realización de estudios de posgrado por investigación fuera de las universidades: "Efectivamente aparecen nuevos esquemas o sistemas de posgrado en que pueden participar en conjunto centros de investigación e instituciones educativas, situación que permite aprovechar tanto los recursos humanos, como la infraestructura disponible. Si se tiene una adecuada vinculación entre ambas instituciones, las ventajas parecen superar con mucho a las posibles desventajas.

"Además del aprovechamiento de recursos, la formación de posgrado con líneas de investigación o desarrollo, que atienden a la solución de problemas reales y concretos de nuestro desarrollo productivo o tecnológico, sin duda contribuye a una preparación de recursos humanos que con mayor facilidad ofrecerá resultados benéficos para el país y un efecto multiplicador más importante".

Según el ingeniero Covarrubias, los estudios de especialización y maestrías siguen conservando su parte básica en la impartición de cursos y más bien son los trabajos terminales o tesis de grado los que requieren de la participación en un trabajo de investigación. En su opinión, la formación doctoral tiende a desarrollarse con base en un proyecto de investigación y es principalmente en este campo en donde parece a todas luces benéfica la vinculación entre centros de investigación e instituciones de educación para lograr el crecimiento que se requiere.

Para el ingeniero Covarrubias, las actividades que a lo largo de los últimos años ha desarrollado el IIE para

señalando la importancia de seguir de cerca el avance tecnológico en esta área puesto que a pesar de que es muy probable que existan proveedores comerciales de estos equipos, "siempre será necesario adaptarlos a la medida de las propias necesidades de las plantas de nuestro país".

Automatización de procesos

Los grandes volúmenes de datos que serán capaces de manejar, sus elevadas velocidades de adquisición, procesamiento y presentación, así como la facilidad con que podrán utilizarlos los usuarios, son algunas de las razones por las que los sistemas integrales de información del proceso serán en el futuro esenciales en la operación eficiente y confiable de las centrales generadoras de energía eléctrica. Sobre el tema nos habla el doctor Alejandro Villavicencio Ramírez, gerente de la Unidad de Automatización de Procesos, quien afirma que los problemas de automatización están fuertemente relacionados con el mejoramiento de los índices de desempeño, la confiabilidad y la disponibilidad de las unidades generadoras, puesto que el principal objetivo de las mismas es satisfacer eficaz y rentablemente la demanda de energía eléctrica, cumpliendo con la normatividad del impacto ambiental.

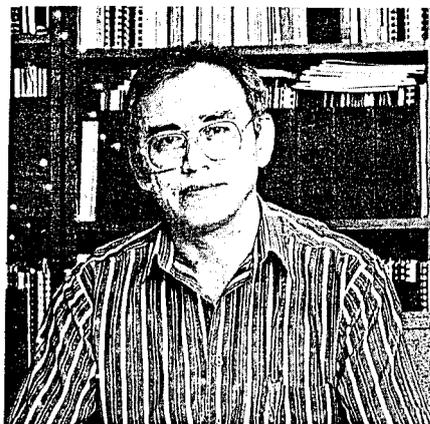
El entrevistado señala que en re-

lación con este objetivo se identifican cinco áreas susceptibles de mejora en cuanto a la automatización: el inventario de energéticos, el inventario de aguas y reactivos químicos, el régimen térmico, el impacto ambiental y la medición de la producción de energía eléctrica. Comenta que lo anterior conduce a considerar un enfoque de automatización con base en sistemas integrales de información técnica de unidades generadoras.

"Estos sistemas se apoyan en metodologías que permitan mejorar la disponibilidad del proceso de generación, incrementar la capacidad analítica del personal de operación al brindarles herramientas de diagnóstico para evaluar correcta y oportunamente el desempeño, así como estandarizar y disponer, en forma automática y en tiempo real, de la información requerida por los niveles de planta y corporativos de las empresas eléctricas.

"De hecho, la CFE ya está trabajando en esta dirección modernizando la instrumentación instalada en sus centrales generadoras, para estandarizarla y hacerla inteligente, así como migrando los sistemas computarizados actuales hacia plataformas abiertas, normalizadas e interconectadas mediante redes de comunicación de alta velocidad".

El gerente de Automatización de Procesos menciona que otro problema en la automatización es la alta



interacción entre las variables del proceso, la cual se refleja en el nivel de complejidad de los sistemas de supervisión y control, ya que involucra la aplicación de tecnologías avanzadas, tanto en equipo de cómputo y *software* como en algoritmos de procesamiento y diagnóstico. "Estas herramientas —añade— se están aplicando por primera vez en la industria eléctrica nacional, por lo que existe cierta desconfianza hacia este tipo de proyectos, al no contar el cliente con referencias cercanas para validar la funcionalidad y beneficios de estas tecnologías".

Respecto a las principales tendencias tecnológicas relacionadas con este campo, el investigador y doctor en ingeniería informática por el Instituto Politécnico Nacional de Grenoble, Francia, comenta: "El enfoque clásico de la instrumentación y control en centrales generadoras

la formación, con diferentes modalidades, de recursos humanos en el sector eléctrico, ha sido "sumamente provechosa y encomiable"; sin embargo, aclaró que la infraestructura física, el potencial humano y la experiencia adquirida por el Instituto, deben ser compartidos para la formación de posgrados en forma más intensa a través de convenios con instituciones educativas que les permitan participar más directamente en el área eléctrica y seguramente en el área electrónica, por lo menos.

El funcionario identificó varios retos para las instituciones educativas en cuanto a la formación de especialistas científicos y técnicos, los cuales, por ejemplo, tienen que ver con la rapidez con que tendrán que enfrentar la demanda creciente de estudios de posgrado.

"Por otra parte —agregó— las universidades de nuestro país deben considerar el requerimiento de mayores recursos para hacer crecer la infraestructura física que necesita líneas de investigación. Sin duda, una posibilidad para allegarse recursos la da la vinculación con el sector productivo; ésta constituye un nuevo reto para las instituciones educativas.

"Por último, podría resumirse que los retos principales son la flexibilidad de los programas sin menoscabo del rigor académico, la vinculación con los centros de investigación que apoyen, con recursos humanos e infraestructura, la vinculación con el sector productivo y el crecimiento de la matrícula en estudios de posgrado". ■

de energía eléctrica incluye los sensores, actuadores y elementos de control, cableados en duro hasta los tableros y paneles de control para fines de operación, control y protección, y que sirven como interfaz hombre-máquina en las unidades de generación eléctrica. Existen en los Estados Unidos esfuerzos integrados entre la industria y los centros de investigación y desarrollo tecnológico tendientes a establecer un plan integral que permita la actualización de los sistemas de instrumentación y control atacando dos problemas principales. Uno de ellos es la obsolescencia, en el contexto de la imposibilidad de ampliar y/o implantar nuevas aplicaciones, así como de no contar con partes de repuesto, lo que se agrava por la falta de soporte técnico del producto por parte del vendedor. El otro problema se refiere a las fallas en equipo ocasionadas por una operación inadecuada de los mismos.

"En México, el enfoque tradicional está cambiando lentamente, incorporando funciones tales como monitoreo y diagnóstico del equipo de la planta para propósitos de administración del envejecimiento de las partes, pruebas periódicas y mantenimiento predictivo; herramientas de *software* de ayuda al operador como guías de operación y sistemas de diagnóstico de fallas y alarmas, ingeniería de factores humanos aplicada desde el diseño, la integración de sistemas de supervisión en línea con sistemas automatizados de documentación de planta, también en línea, y la comunicación de información en tiempo real relacionada con los índices de desempeño en la planta y corporativos.

"Todo esto mediante la incorporación validada de los avances en la tecnología informática y de telecomunicaciones, lo que se considera una expansión del enfoque tradicional de la instrumentación y control en las centrales, fortalecido por el aumento de la resolución en la toma de señales y, por tanto, la disminución de los má-

hasta niveles del 0.10 al 0.25% de escala completa".

Con relación a la complejidad de los sistemas de automatización para centrales termoeléctricas, el entrevistado indica que la tendencia consiste en llevar a cabo una validación y evaluación exhaustiva de las nuevas tecnologías en laboratorio, utilizando para ello simuladores de procesos, que permiten validar en línea y en tiempo real la operación y el desempeño de los nuevos sistemas. "Esto reduce la incertidumbre de la operación de estos sistemas en la central una vez implantados, minimizando riesgos y dando al cliente un punto de referencia para su aceptación."

Al referirse a los sistemas futuros, el doctor Villavicencio puntualiza que las generaciones de sistemas de instrumentación y control en el mediano plazo seguramente estarán basadas en la aplicación del control digital en la totalidad de los sistemas de las unidades generadoras, utilizando arquitecturas abiertas y distribuidas. "Estas —complementa— estarán integradas por sensores y actuadores remotos encapsulados y redundantes, intercomunicados vía sistemas de comunicación inalámbricos con protocolos capaces de manejar y validar comandos de actuación, así como de efectuar autorregulaciones basadas en modelos predictivos de comportamiento. Se intercambiará información y no sólo datos, en el área local, así como parámetros de operación para llevar a cabo regulaciones en el proceso.

"En cuanto a los cuartos de control, tendrán sistemas de despliegues de información basados en proyecciones tridimensionales del proceso monitoreado, así como funciones de ayuda que faciliten realizar en forma automática operaciones del tipo de arranque, seguimiento de carga y paro seguro bajo cualquier condición de operación, así como vigilancias de variables críticas, mitigando oportuna y eficazmente cualquier consecuencia por fallas en

"La interfaz hombre-máquina será de manera natural, con la racionalización de sistemas de prevención de alarma y acciones correctivas, vía reconocimiento de huella digital en *touchpanel* y/o con reconocimiento de voz y validación de comandos críticos, mediante la incorporación de realidad virtual, vía cascos y guantes de comando. Todo ello con mecanismos de confiabilidad mejorada y arquitectura redundante para fines de seguridad. El operador podrá comunicarse en cualquier momento y efectuar cualquier maniobra sin requerir contacto físico con manetas y/o botones; asimismo, contará con 'información digerida' del comportamiento histórico y localización de cualquier componente y/o lógica de control y efectos de falla, así como con recomendaciones para mitigarlos. La necesidad de llevar a cabo mantenimiento correctivo se reducirá a través del control de la vida útil de los componentes y del conocimiento organizado y documentado de su historia."

El doctor Villavicencio señala que la mayor parte de las centrales generadoras del país tiene problemas y necesidades comunes, a pesar de tener instalaciones con diversos niveles de automatización. "Por ese motivo hay la oportunidad de aprovechar la experiencia del usuario para formular un plan integral de mejoramiento de los sistemas de instrumentación y control, que ayudará a cumplir con el principal requerimiento de contribuir eficaz y rentablemente a la satisfacción de la demanda de energía eléctrica, evitando con esto la aparición y adquisición de múltiples paquetes de tecnología, en ocasiones obsoleta".

Para concluir, apunta que resultará importante trabajar en programas pilotos para validar nuevas tecnologías aplicables a centrales generadoras de energía eléctrica y que las áreas prometedoras en automatización de procesos son las relacionadas con la aplicación de técnicas de diagnóstico en línea,

de datos retrospectivas y en tiempo real, sistemas modulares escalables y configurables, sistemas basados en estándares y redes de campo para adquisición de datos, entre otras. Menciona también la conveniencia de "seguir formando investigadores vinculados tanto con instituciones académicas de prestigio como con los problemas reales del campo para promover y apoyar la innovación tecnológica".

Entrenamiento de operadores de centrales generadoras

A la par de los avances tecnológicos que serán necesarios en los sistemas de instrumentación, control y automatización de las centrales generadoras para cubrir los objetivos de eficiencia, confiabilidad y limpieza ambiental, se incrementarán las exigencias de capacitación de sus operadores. Como se sabe, los simuladores de entrenamiento son el medio ideal donde los encargados de operar las plantas pueden ejercitar maniobras normales y acciones que tal vez no enfrenten en la realidad, pero que deben practicar para preservar el buen funcionamiento e integridad de las instalaciones ante la posible ocurrencia de fallas o situaciones de emergencia.

En opinión del doctor Eduardo Gleason García, jefe del Departamento de Simulación, uno de los principales problemas que su área de investigación enfrentará será una alta demanda de capacitación, tanto en la operación de centrales termoeléctricas como nucleoelectricas, que se traduce en la necesidad de reducir los costos y tiempos de desarrollo de estos complejos sistemas. "Esto es importante porque los simuladores que diseñamos son específicos de las plantas de la CFE y por ello implican un fuerte ingrediente de desarrollo; es posible que 80% de su costo corresponda a ingeniería y el 20% a equipos".

El jefe de Simulación, doctorado en control automático por el Instituto

Nacional Politécnico de Grenoble, Francia, agrupa las tecnologías necesarias para desarrollar un simulador en sistemas de cómputo, *software* en tiempo real y de instrucción, herramientas de desarrollo de aplicaciones como manejadores de bases de datos y editores gráficos, tableros de control, modelado matemático, pruebas e integración de simuladores, así como la administración de la configuración. "Evidentemente, casi todas estas tecnologías se relacionan con equipo de cómputo y *software*, por lo que se encuentran en un entorno de cambio rapidísimo. Por eso mismo, en todas ellas puede decirse que la tendencia es estandarizarlas para facilitar el desarrollo. Por ejemplo, la consola del instructor, uno de los elementos clave, tiende a ser genérica para que pueda configurarse de acuerdo con la aplicación específica y disminuir los costos de desarrollo. La estandarización ofrece enormes ventajas aparte de la reducción de tiempos de desarrollo y costos; entre otras, facilita la expansión de la capacidad de procesamiento, la inclusión de periféricos y el mantenimiento del *software*".

Por lo que se refiere a la modelación matemática de los procesos que se simulan, el doctor Gleason, comenta que la combinación de la mayor capacidad de cómputo y de las herramientas de *software* ha dado lugar a la tendencia de que el modelado se haga con arquitectura, es decir, que el ingeniero de proceso trabaje gráficamente en su diagrama de proceso, integrándolo mediante íconos de componentes. "De manera transparente para el ingeniero, el *software* y la computadora asocian los códigos de los modelos matemáticos y los algoritmos numéricos para solución, integrando rápida, fácil y económicamente el modelo de un sistema. Esta arquitectura genérica debe tener la flexibilidad, fidelidad y alcance que permitan personalizar aplicaciones diversas con diferentes niveles de detalle y complejidad, conservando la simulación en tiempo



real. Este *software* de modelado, junto con el de instrucción, son los elementos claves en el desarrollo de los simuladores.

"Otra tendencia importante es sustituir los tableros de control de los cuartos de control de las centrales por sistemas altamente informatizados, como monitores de computadora con despliegues gráficos y mímicos de procesos, pantallas sensibles e interactivas y pantallas proyectadas. Bajo este esquema, las plantas serán controladas por medio de monitores que no superarán una decena.

"No he mencionado a multimedia y a la realidad virtual, tecnologías emergentes que considero tendrán un impacto en los simuladores a más largo plazo. Por ejemplo en el adiestramiento en aula, donde se revisan todos los principios de operación de las plantas e incluso los de mantenimiento, podrían utilizarse simuladores que incorporen gráficos, textos, animación (video), sonidos y 'tutores inteligentes'. Por ahora hay mucha especulación, sobre todo en las aplicaciones de las tecnologías de realidad virtual, y no se sabe hasta dónde podrán llegar. En este último caso, se menciona, por ejemplo, que un operador o un ingeniero de mantenimiento podrá 'recorrer', sin salir del aula, una central, conocer los equipos e 'interactuar con ellos', ver los resultados de sus operaciones, detectar, escuchar y observar fallas, y responder a la asesoría de un tutor inteligente. Tomando en

cuenta las tecnologías actuales y emergentes, hay amplias perspectivas para la simulación, pues podrían contribuir a hacer más eficaz, amena, motivadora y autónoma la instrucción".

El doctor Gleason comenta un aspecto interesante relacionado con las exigencias futuras para los operadores: "En los cuartos de control de las centrales generadoras los cambios no son tan rápidos. La industria eléctrica mundial se ha caracterizado por ser conservadora en cuanto a la aplicación de tecnologías de vanguardia. Sin embargo, a pesar de que se van incorporando poco a poco los avances, es muy factible que en las próximas décadas la operación sea altamente automatizada y que el operador tenga menor participación en cuanto a la operación de la planta. Su presencia siempre va a ser necesaria porque evidentemente las máquinas necesitan de la participación humana, pero va a requerir muchos mayores conocimientos de cómputo. Además del conocimiento de la planta, tendrá que saber cómo utilizar las herramientas, moverse a través de ellas y sacarles el mejor provecho".

El doctor Gleason finaliza sus comentarios señalando que la investigación que realiza el IIE debe ser muy selectiva. "Es necesario definir claramente nuestro nicho de desarrollo, ya que es muy difícil cultivar toda la vanguardia tecnológica en campos que como el nuestro tienen un avance vertiginoso". Señala que esta es la forma de ir poco a poco introduciendo aportaciones en el estado de avance del campo de la simulación y añade que "si no es posible contribuir al desarrollo de tecnología de vanguardia, es de suma importancia por lo menos conocerla y aprovecharla en los desarrollos".

El nuevo escenario de la generación-transmisión

El binomio generación-transmisión será tierra fértil para un sin-



número de innovaciones tecnológicas. En opinión del doctor Rolando Nieva Gómez, jefe del Departamento de Análisis de Redes, los cambios que se avecinan en este campo en el mundo marcarán una revolución tecnológica en el sentido de la gran cantidad de desarrollos que tendrán que realizarse en diversas áreas como la computación, telecomunicaciones, informática e investigación de operaciones, entre otras.

El entrevistado puntualiza que la tendencia mundial actual persigue conjugar el crecimiento de la demanda con un modelo de mercado sustentable para que se cuente con los recursos financieros que garanticen dicho crecimiento, y con la tecnología para controlar en forma segura y confiable la operación de un sistema eléctrico cada vez más grande y complejo. Otros retos serán operarlo de la manera más eficiente desde el punto de vista económico y brindar la capacitación necesaria a operadores de los centros de control, plantas y subestaciones del futuro.

"Actualmente —señala el doctor Nieva— es clara la tendencia internacional de reestructuración de los sectores de energía eléctrica, creando un marco legal y comercial que promueve la participación de capital privado y que favorece la competencia en la producción de energía eléctrica. El modelo genérico de sector eléctrico que refleja los cambios estructurales tiene las siguientes características principales. Se pri-

vatiza la generación, dando lugar a un número elevado de empresas generadoras y a la competencia; algunas de estas empresas, por su carácter estratégico, la nuclear, por ejemplo, siguen siendo propiedad del estado. La competencia entre los generadores se realiza a través de un mercado de energía que se basa en un predespacho, y un despacho, centralizado; en el mercado se realiza la compra-venta de la energía necesaria para satisfacer la demanda del sector público al mínimo costo. Hay libre acceso al servicio de transmisión; los dueños o concesionarios de la red de transmisión se ven obligados a permitir que los productores usen la capacidad de transmisión para transportar la energía a sus clientes consumidores. Por último, se concesiona o privatiza la distribución entre varias compañías regionales; las compañías distribuidoras compran la energía que necesitan a través del mecanismo de predespacho centralizado y venden la energía entre los clientes de la región que enmarca su concesión".

El doctor Nieva señala que este nuevo escenario ya ha dado lugar a diversas reformas en varios países. "Las correspondientes al sector eléctrico de Chile, Argentina, Perú e Inglaterra reflejan todas las características del modelo competitivo señalado. En México, el Reglamento de la Ley de Servicio Público de Energía incorpora todas las características del modelo competitivo, salvo la distribución.

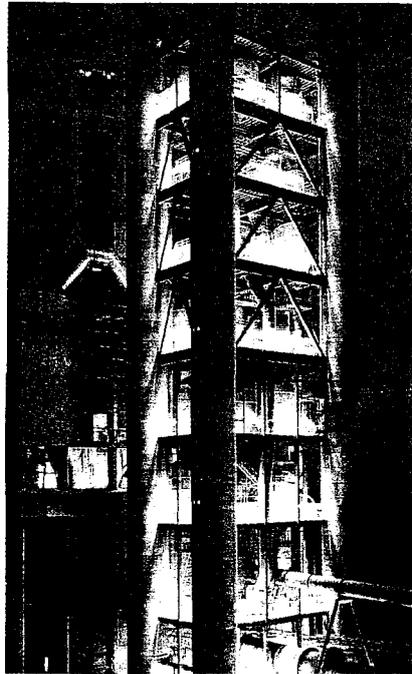
"En los Estados Unidos, la reforma del sector eléctrico se ve matizada por la presencia de un gran número de compañías verticalmente integradas, es decir, que generan, transmiten y distribuyen la energía eléctrica; sin embargo, la tendencia es hacia el modelo genérico que he señalado. En muchos de sus estados, 25 hasta mayo de 1995, se han iniciado cambios legislativos para desregular el mercado. California lleva la delantera, persiguiendo la meta de ofrecer en el año 2002 la

opción a los consumidores finales de contratar el suministro con el productor de energía eléctrica de su elección. Es muy factible que la situación donde el usuario, sin importar que sea grande o pequeño, compre su energía con quien más le convenga llegue a ser común no sólo en California sino en todo el mundo. Sin embargo, esta es una tendencia mundial que de llegar a consolidarse implicará un desarrollo tecnológico impresionante por la enorme complejidad que imprimirá al sistema eléctrico".

El nuevo escenario no se restringe a la generación y a los intercambios de energía exclusivamente: "Además del mercado de energía componente del modelo genérico —afirma el jefe de Análisis de Redes—, están surgiendo mercados de servicios auxiliares o complementarios en el sector eléctrico. En Inglaterra, por ejemplo, se están desarrollando los mercados de regulación primaria, reserva y potencia reactiva. Estos servicios contribuyen a mantener estándares de calidad de regulación de frecuencia y voltaje y a compensar, además, las fallas de generación o transmisión y las imprecisiones del pronóstico de la demanda.

"En todos los casos, la compra-venta de estos servicios se realiza mediante contratos anuales, que se asignan a través de licitaciones públicas y se rigen por la libre competencia en todas sus modalidades. Un ejemplo real en la dirección de esta tendencia es la aparición en los Estados Unidos de las primeras empresas de mercaderes de energía (que compran y venden, pero no producen), operando mercados de futuros (cuatro a seis meses)".

El jefe de Análisis de Redes y doctor en ingeniería eléctrica por la Universidad de Alberta, Canadá, comenta que la nueva estructura del mercado eléctrico dará un giro importante al concepto tradicional de control de operación de los sistemas de potencia: el control automático de generación. Afirma que tal concepto



se ha utilizado desde los años treinta en sistemas multiáreas y lo explica de la siguiente forma: "El sistema eléctrico está formado por áreas de control. Cada área constituye un subsistema eléctrico que regula su propia generación para mantener el programa de intercambio neto de energía acordado con otras áreas, y para contribuir con la aportación que le corresponde de regulación de frecuencia del sistema completo.

"Para este fin, cada área cuenta con un sistema de control automático de generación constituido por equipo y *software* que automáticamente ajustan la generación del área de control para mantener el programa de intercambio neto de energía y contribuir con la aportación que le corresponde de regulación de frecuencia. Dicho control trata de mantener pequeño el error de control de área.

"En la nueva tendencia de estructura genérica de sector eléctrico, el concepto tradicional de área de control queda fuera de contexto. En ella coexisten inmersos en un mismo

sistema eléctrico interconectado y con acceso a la misma red de transmisión, los productores independientes, las compañías de distribución y los grandes consumidores. Asimismo, los flujos de potencia en la red de transmisión son resultado de la actividad del mercado de energía, esto es, del predespacho y despacho centralizado, así como de las transacciones de porteo y no de la negociación independiente entre áreas de control inmersas en el sistema eléctrico. Además, la regulación de frecuencia se realiza con la contribución de un segmento de los productores. La selección de los productores que participan en la regulación se hace por licitación pública y con criterios estrictamente económicos; se selecciona a los productores que ofrecen el servicio a menor precio".

El doctor Rolando Nieva comenta en torno a un escenario probable para el sector eléctrico mexicano, considerando la tendencia global de reestructuración: "Cuando entre en operación la nueva versión del SICTRE (sistema con el que se supervisa y controla el sistema interconectado nacional), aproximadamente en el año 2000, la reestructuración del sistema eléctrico mexicano se habrá consolidado. Durante la vida útil de la nueva versión del SICTRE, aproximadamente del año 2000 al 2010, es muy probable que se inicie para entonces la operación de nuevos mercados de servicios: el de regulación de frecuencia, el de reserva y el de soporte de potencia reactiva. También podrán aparecer los mercados futuros de compra-venta de energía".

El control de este atomizado y complejo sistema de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, orientado a ofrecer menor costo a los usuarios, requerirá sólidas herramientas tecnológicas, así como personal altamente capacitado, con las que en el futuro, en opinión del doctor Rolando Nieva, "sin duda contará el sistema eléctrico mexicano".

La distribución de energía eléctrica

Los avances tecnológicos influirán de una manera determinante en la forma en que se distribuirá la energía eléctrica. Inicia este tema el doctor Raúl Velázquez Sánchez, jefe del Departamento de Transmisión y Distribución, comentando sobre dos de los principales problemas que enfrentan los sistemas de distribución de nuestro país de cara al futuro: "Considero que hay dos aspectos muy importantes. Por un lado, la carencia de medios para tener un conocimiento detallado y rápidamente disponible para todos los involucrados de las instalaciones de distribución, pues su extenso tamaño, complejidad y dinámica imposibilitan saber con precisión cuáles son los equipos y su estado o modo de operación en cada momento. A este problema se suma el hecho de que son diferentes los grupos que se encargan de planearlas, operarlas y mantenerlas y de ofrecer los servicios al público. Por ello, cualquier cambio tarda en hacerse del conocimiento de todos los involucrados y, además, no se cuenta con un medio para registrarlos de manera que todos puedan consultarlo y estar al tanto oportunamente".

El segundo problema para el jefe del Departamento de Transmisión y Distribución es el rezago de las instalaciones, las cuales operan, en muchos casos, más allá de su capacidad. "Lo anterior se debe, como es bien sabido, al diferimiento de las inversiones que han tenido que afrontar tanto la CFE como LyFC en los últimos años por los problemas económicos del país".

Además del cumplimiento de los programas de expansión, el doctor en sistemas eléctricos de potencia por el Ecole Polytechnique de Montreal, Canadá, menciona dos alternativas tecnológicas que contribuirían a la solución del problema: "En primer lugar tenemos el uso de sistemas integrales de información en los que se registran tanto las

características de los equipos como su estado de operación. Estos sistemas en su estado inicial se encuentran generalmente fuera de línea. Se usan para funciones de ingeniería de análisis de las condiciones de la red y de sus mejoras posibles. Con ellos se simulan posibles escenarios de operación ante la ocurrencia de problemas comunes que afectan la continuidad y la calidad del suministro, como tormentas eléctricas, vientos, accidentes, para obtener información que permitirá apoyar las decisiones ante una contingencia real. El beneficio de este enfoque es un menor tiempo de interrupción, menor número de usuarios afectados, ahorro de tiempo en las reparaciones y, consecuentemente, ahorros económicos".

El otro aspecto tecnológico que menciona el doctor Velázquez es la automatización de la distribución. "Se trata de sistemas de monitoreo y control con los que puede conocerse el estado de la red a través de sensores y actuadores colocados en puntos estratégicos. A través de ellos es posible conocer instantáneamente los parámetros de operación de la red y, ante contingencias, reconfigurarla de manera automática para dejar inhabilitada la parte donde haya ocurrido una falla y habilitar el resto para no interrumpir el servicio. En México ya se están empezando a utilizar esquemas de este tipo en varias ciudades. Pero eso se está haciendo sólo en zonas prioritarias donde hay usuarios industriales, comerciales y residenciales. Sin embargo, a este esquema se le puede sacar más provecho si se le considera integralmente. Esto es, emplearlos para lograr operar la red hasta su límite práctico de utilización. Como señalé antes, el diferimiento de inversiones hace que las instalaciones se sobreutilicen. Por esa misma razón, convendría incorporar esquemas de automatización para lograr un máximo aprovechamiento de instalaciones, incrementando la continuidad y calidad del servicio".



El doctor Velázquez no espera 50 años. "No me iría tan lejos. En diez años la distribución se va a manejar como un producto para el que los usuarios de cierta capacidad, de consumo comercial para arriba, van a estar en comunicación directa y permanente con las redes de distribución. La supervisión de la red va a llegar a nivel de transformador de poste, lo que va a permitir al usuario manejar su demanda como mejor le convenga para, por ejemplo, consumir a la hora que le resulte más económica e incluso puede considerar la competencia de diversos oferentes de energía".

El especialista indica que lo anterior requerirá un complejo sistema de cómputo y de comunicación mediante el cual la red y los usuarios estarán enlazados. "Serán comunes situaciones en las que las empresas eléctricas ofrezcan descuentos a los usuarios si se utiliza en una hora determinada, por ejemplo, de baja demanda.

"Otra escena que será común para las futuras generaciones corresponderá a la combinación de edificios y casas inteligentes con la satisfacción de la demanda. Por ejemplo, un edificio podrá tener programado el encendido y el apagado del sistema de calefacción de acuerdo con horarios de trabajo y condiciones ambientales. Podrían señalarse muchos más ejemplos que apuntarían a una utilización más racional y óptima de la energía, basados en la comunicación directa de

la red con los usuarios.

"Este panorama dará lugar también a la generación distribuida y a esquemas de almacenamiento de energía, donde se aprovecharán la cogeneración, los sistemas fotovoltaicos y eólicos, junto con las celdas de combustible y los sistemas de almacenamiento como baterías, aire comprimido o superconductores. También en este caso va a ser necesaria la comunicación de la red con los usuarios. Esta es una tendencia importante que persigue que las grandes centrales se utilicen para satisfacer la carga base, y que los sistemas distribuidos satisfagan los picos con fuentes de generación locales como las señaladas. El resultado de todo ellos será una generación más económica, continua y de calidad.

"Para que nuestra red evolucione tecnológicamente, lo primero que tenemos que hacer es implantar sistemas de información que permitan conocer el sistema completo de red y usuarios con el mayor detalle posible y de manera instantánea, tanto en lo relativo a las características y parámetros de operación de los equipos como a los tipos y tamaños de carga de los usuarios, junto con las formas en que se usa la energía, ya sea que se trate de refrigeración, calefacción, fuerza motriz, iluminación. El siguiente paso consistiría en ir equipando la red para poder controlar esos escenarios por medio de telecomunicaciones y centros de control distribuidos a nivel de red, para poder ir haciendo la administración de la demanda y de la oferta a nivel de bloque de generación y transmisión. Ello posibilitará un uso de la red y de la energía más eficiente. Esto no se prevé aún en la ley; pero hay posibilidades de que ocurra y ya se está viendo en otros países".

Para cerrar la entrevista, el jefe del Departamento de Transmisión y Distribución comenta que la infraestructura de comunicaciones va a ser muy importante para que este esquema futuro de redes automa-

tizadas brinde una imagen instantánea de las mismas y de su vínculo con los usuarios." Ello será de valiosa ayuda para lograr un servicio más económico y de mayor calidad, tanto con redes cada vez más grandes y complejas como con usuarios más exigentes y dependientes de la energía eléctrica".

Ahorro de energía

Es evidente que cuidar nuestros recursos y preservar nuestro ambiente a todos nos debe de importar. Y también lo es que la conciencia respecto al ahorro de energía será determinante en ambos aspectos en los próximos años. El doctor Gaudencio Ramos Niembro, coordinador del programa de ahorro de energía del IIE, inicia esta entrevista comentando cómo nace la conciencia del ahorro y el uso eficiente de la energía:

"Hasta los inicios de la década de los setenta, la oferta de energía eléctrica era exclusivamente función de la demanda, es decir, se observaba la tendencia de crecimiento de la demanda y en función de ella las empresas eléctricas instalaban nuevas plantas y líneas de transmisión y distribución. Dicho en otras palabras: si se requería más, se instalaba más.

"Sin embargo, debido a los altos costos de los suministros, las dificultades y restricciones para construir nuevas instalaciones y la oposición de los usuarios a los altos precios de la energía eléctrica, las empresas eléctricas han cambiado su forma de planeación de la demanda. En la actualidad a este aspecto se le conoce con el nombre de Planeación Integral de los Recursos, lo cual no es otra cosa que enfrentar las necesidades de energía eléctrica a través de cualquiera de las siguientes alternativas: construir nuevas plantas de energía; comprar electricidad a otra empresa eléctrica que tenga en exceso capacidad instalada y revenderla; realizar mejoras a la producción y optimización en generación, transmisión y distribución para tener



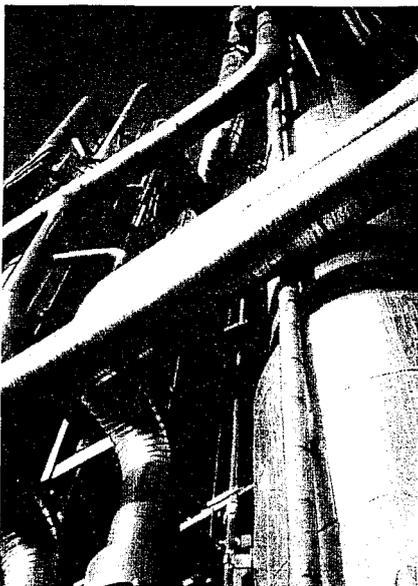
menos pérdidas; implementar programas que mejoren la eficiencia del uso de la energía eléctrica por el lado del usuario, es decir, hacer administración del lado de la demanda, y analizar opciones de venta y precio del fluido eléctrico".

Entre los problemas más importantes para llevar a cabo las medidas de ahorro de energía, el doctor Ramos menciona entre los más importantes el desconocimiento de lo que es el ahorro de energía: "En muchos casos, las personas no están enteradas acerca de la existencia de las diversas opciones que existen en la actualidad para ahorrar energía eléctrica. Una posible solución a este problema es poner a disposición del público consumidor programas de educación, información, demostración, etc., de todo lo que se puede ganar. Aun cuando falta mucho por hacer, el Fide ha logrado un paso importante en los diferentes sectores, industrial, de servicios, comercial y residencial, a través de muy diversos proyectos demostrativos de uso eficiente y de ahorro de energía".

Según el doctor Ramos otra causa es el costo de la implementación de medidas. "En un número importante de los casos el ahorro de energía representa una inversión inicial, la cual es recuperada por el usuario en periodos a veces 'largos'. En otras palabras, existe el problema de que el usuario desearía que hacer el cambio no le costara o que su costo fuera mínimo para que la

inversión se recuperara en el menor tiempo posible, un año, por ejemplo, y entonces ver muy pronto los beneficios del ahorro en el recibo de pago. En este caso, existen diversas alternativas para apoyar a los usuarios, como son los mecanismos de financiamiento y el mecanismo gana-gana, en el que tanto el usuario como la empresa obtienen beneficios. Tal es el caso del proyecto ILUMEX de la CFE, donde se venden lámparas fluorescentes compactas a un precio menor que el del mercado y se cobra el foco en varios pagos a través del recibo de energía eléctrica; en este caso, el usuario ahorra energía por iluminación y paga menos; el pago no es inicial sino diferido, y la CFE gana, pues deja de subsidiar parte de la energía".

El coordinador del programa de ahorro de energía del IIE menciona que también es importante la indiferencia del usuario. "En este caso me refiero al hecho de que hay pocos incentivos por ahorrar, pues el precio de la electricidad es bajo; es de todos sabido que existen subsidios para algunos usuarios. Entre las alternativas que existen para promover el ahorro y el uso eficiente de la energía están la elaboración a



nivel nacional de normas de eficiencia energética, labor que ha estado realizando con mucho impulso la Conae, así como el establecimiento de tarifas más realistas".

El doctor Ramos puntualiza que lo anterior corresponde a problemas vistos desde el lado del usuario, pero indica que falta considerar qué opina la empresa eléctrica de tales acciones, pues con estas medidas se pierde la noción de negocio; esto es, una empresa quiere vender más porque desea ganar más. Al respecto indica que es necesario que las empresas eléctricas analicen sus recursos y su forma óptima de utilizarlos, para en un buen número de casos mejorar sus ingresos.

El doctor Ramos amplía el punto: "Veamos un par de simples escenarios: si se reduce la demanda pico, que es la que al final de cuentas define los requerimientos de capacidad máxima instalada, y si se mejoran la operación y el mantenimiento de la infraestructura, podrían reducirse las presiones de nuevas inversiones. Otro caso sería promover un incremento en el uso de la electricidad para ciertos procesos en las horas de demanda baja, mejorando los precios de las tarifas.

"Es conveniente mencionar que en la actualidad no sólo se consideran los factores técnicos y económicos, sino también los ambientales y sociales. Cabe resaltar que, por ejemplo, las comisiones reguladoras en los Estados Unidos separan las utilidades de las ventas y acuerdan con las empresas eléctricas el costo de la energía, considerando lo que invierten y/o dejan de ganar por las acciones de ahorro de energía; se incluyen, por ejemplo, los costos de los programas de administración de la demanda, tasas por recuperación, ajustes de costos/utilidades, etcétera".

En cuanto a la pregunta de las principales tendencias tecnológicas, el entrevistado comenta que hay una amplia gama, pero que también es importante indicar cuáles son factibles de aplicarse en cada país.

"Resulta difícil generalizar; en efecto, cada país, cada zona de un país y cada clase social, tienen su propio escenario de mejora para el uso eficiente y el ahorro de energía. Por ejemplo, en los Estados Unidos, en el sector residencial en particular, las acciones más importantes se han enfocado a la calefacción y el aire acondicionado y no al resto del equipamiento, mientras que en los países en vías de desarrollo, nos preocupamos más por el resto del equipamiento". En el caso específico de México la iluminación artificial en el consumo residencial representa el 43%".

El doctor Ramos añade que actualmente existen tecnologías probadas que permiten mejorar la eficiencia de los equipos que utilizan energía eléctrica; sin embargo, falta aún mucho por hacer. "Podríamos decir que desde el punto de vista del usuario, las investigaciones se enfocan principalmente hacia: a) sistemas de control del factor de potencia; b) motores de velocidad variable; c) alumbrado de alta eficiencia; d) nuevos procesos industriales, y e) mejoras tecnológicas a todo tipo de equipos.

"En lo que respecta a las oportunidades para generación de energía, se esperaría un apoyo importante a las investigaciones para el uso de fuentes alternas".

A la pregunta de cómo será el ahorro de energía en los próximos años, el experto en ahorro de energía y doctor en control por la Universidad de Grenoble comenta que hay estudios muy formales que muestran la existencia de potenciales de ahorro del orden del 25% durante el periodo 1990-2010.

El doctor Ramos señala por último que es indudable que un paso importante en el futuro será tanto el desarrollo tecnológico como sensibilizar a los usuarios acerca de la necesidad de ahorrar y hacer un uso eficiente de la energía, "si, además de disfrutarla, queremos contar con mayores recursos naturales y minimizar los daños al medio ambiente".

Una historia del Instituto de Investigaciones Eléctricas

Edición especial
del Boletín IIE

Aceptar el reto



Junta Directiva

- **Alfredo Elías Ayub**, director general de la Comisión Federal de Electricidad (presidente).
- **Enrique Ruschke Galán**, presidente de la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (secretario).
- **Andrés Antonius González**, subsecretario de Política y Desarrollo de Energéticos de la Secretaría de Energía.
- **Oswaldo Gangoiti Ruiz**, director de operación de la Comisión Federal de Electricidad.
- **Manuel Betancourt García**, director general de Política y Desarrollo de Energéticos de la Secretaría de Energía.
- **Raúl Fuentes Samaniego**, subdirector técnico de la Comisión Federal de Electricidad.
- **Eduardo Arriola Valdés**, subdirector de Programación de la Comisión Federal de Electricidad.
- **Raymundo Campos Milán**, subdirector de Transmisión, Transformación y Control de la Comisión Federal de Electricidad.
- **Alfonso Caso Aguilar**, director general de Luz y Fuerza del Centro.
- **Guillermo Haro Morales**, comisario público propietario del Sector Energía y Electricidad de la Secretaría de la Contraloría y Desarrollo Administrativo.
- **Juan Edmundo Granados Nieto**, comisario público suplente de Sector Energía y Electricidad de la Secretaría de la Contraloría y Desarrollo Administrativo.
- **Juan Ramón de la Fuente Ramírez**, rector de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Diódoro Guerra Rodríguez**, director general del Instituto Politécnico Nacional.
- **José Luis Gázquez Mateos**, rector de la Universidad Autónoma Metropolitana.
- **Jorge Collard de la Rocha**, director general de Programación y Presupuesto de Energía e Infraestructura de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- **Carlos Bazdresch Parada**, director general del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- **Odón de Buen Rodríguez**, director general de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (invitado).
- **Francisco Paniagua Sánchez**, Despacho Suárez del Real y Galván Flores, S.C. (invitado)

Comité Técnico Operativo

- **Manuel Betancourt García**, Secretaría de Energía (presidente).
- **Oswaldo Gangoiti Ruiz**, Comisión Federal de Electricidad.
- **Guillermo Haro Morales**, Secretaría de la Contraloría y Desarrollo Administrativo (comisario).
- **Juan Edmundo Granados Nieto**, Secretaría de la Contraloría y Desarrollo Administrativo (comisario suplente).
- **Jorge Collard de la Rocha**, Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- **Juan Ramón de la Fuente Ramírez**, Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Diódoro Guerra Rodríguez**, Instituto Politécnico Nacional.
- **Fernando A. Kohrs Aldape**, Instituto de Investigaciones Eléctricas (secretario técnico).

Comité Editorial

Fernando A. Kohrs Aldape
Ángel Fierros Palacios
Salvador González Castro
Roberto Canales Ruiz
José M. González Santaló
Víctor M. Arellano Gómez
Gerardo Pérez-Ramírez García

Jefa del Departamento de Difusión
Gladys Dávila Niñez
Cuidado de la edición
Fernando F. Cárdenas Peña

Diseño
Edgar E. Flores Alarcón
Diagramación y formación
Verónica García Rodríguez
Alejandro Olguín Herrera

Fotografía
Sergio Ortega López

Distribución
Ana María Sámano Ramírez

Edición, redacción y coordinación editorial de este número especial
Gabriel Nagore Cázares

Agradecemos la colaboración de la Comisión Federal de Electricidad, de Luz y Fuerza del Centro, de la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas y de Petróleos Mexicanos.

Avenida Reforma 113, colonia Palmira, 62490 Temixco, Morelos, México.
Teléfono (7) 3 18 38 11, extensiones 7187 y 7637.
Fax (7) 3 18 25 27
Internet: <http://www.iie.org.mx>
Correo electrónico: gdavila@iie.org.mx

Boletín iie es una publicación bimestral, su distribución es gratuita. Aparece la última semana de cada bimestre. Editada por el Departamento de Difusión de la División de Planeación y Apoyo Técnico del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores. El material de este Boletín sólo puede reproducirse, parcial o totalmente, con la autorización escrita del IIE. Certificado de licitud de título 1077. Franqueo pagado, publicación periódica, permiso número 002 0583, características 319 321412, autorizado por Sepomex.

Impreso en los talleres de Dicograf, S.A. de C.V. Poder Legislativo 304, colonia Prados de Cuernavaca, 62239 Cuernavaca, Morelos, México.

Efervescencia



Mesa redonda sobre la TRIIE.

El periodo de efervescencia que se inició en 1977 aún no terminaba a principios de 1981. En esos días el cuerpo de investigación ascendía a cerca de 300 elementos. Cuando un visitante pasaba por los edificios, observaba una gran agitación: muchos investigadores hablando en los pasillos, caminando por los jardines, llamándose de un edificio a otro, separados por pocas decenas de metros. La atmósfera estaba impregnada de ideas, discusiones apasionadas, planes, acuerdos. Los desafíos eran considerables para todos, pero en especial para Electrónica y Simulación.

Las remotas: los "ojos y manos" de un sistema de control supervisorio

En el *Boletín IIE* de agosto de 1981 se narraban las opiniones de una mesa redonda sobre las terminales remotas en la que participaron investigadores del Departamento de Electrónica y el ingeniero Eduardo Lobatón, en ese tiempo director de la División de Equipos. El doctor José Albarrán, jefe del proyecto, opinaba:



Investigadores del Departamento de Electrónica durante la mesa redonda.

El proyecto de las unidades terminales remotas se inició a mediados de 1977. Su desarrollo está estrechamente ligado a la historia de todo lo que es actualmente el Departamento de Electrónica. Está lleno de anécdotas, de cambios, de vicisitudes. Son muchos los investigadores que trabajaron en él, aunque algunos de ellos colaboraron sólo en etapas determinadas. Actualmente el grupo de investigación se ha multiplicado debido al amplio campo que se ha abierto con respecto a su realización [...]

El desarrollo de terminales remotas tiene tres etapas principales: la primera, que podríamos denominar la etapa de la fe, que se caracteriza por la necesidad de demostrar que podíamos, en principio, hacer algo parecido a una terminal remota [...]

Posteriormente, viene la etapa que podríamos llamar de la esperanza, en el sentido de que la seguridad de los primeros pasos fortalecieron nuestra convicción de que podía lograrse un equipo fabricable [...]

La tercera etapa, en la que actualmente nos encontramos, es de consolidación, puesto que en ella se aprovecha la experiencia desarrollada.



Primera terminal remota del IIE.

El proyecto de las unidades terminales remotas surgió como consecuencia de la relación que el doctor Víctor Gerez Greiser había establecido con el Centro Nacional de Control de Energía (Cenace) de la Comisión Federal de Electricidad. Cuando se definían los requerimientos de equipos para el

Efervescencia

sistema de información y control que dicho centro planeaba instalar, se consideró la posibilidad de fabricar en el Instituto los prototipos de las remotas.

Estos equipos constituyen los “ojos y manos” de uno de los medios más utilizados en la telemetría y el telecontrol: un sistema de control supervisorio. Éste se compone de una computadora maestra que está en comunicación permanente con un grupo de unidades terminales remotas situadas en puntos específicos de una red distribuida geográficamente. Las remotas se instalarían en subestaciones eléctricas por todo el país para captar, procesar, almacenar y transmitir información relevante al sistemas como mediciones, estados, valores acumulados, etcétera. Ejecutarían también comandos de control como abrir o cerrar interruptores, y subir o bajar la generación de una central, entre otras funciones. Era una proyecto de una enorme importancia.

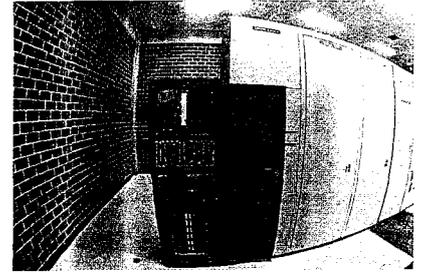
La TRIIE, como se le llama a la terminal remota del Instituto, se basaba en la tecnología de microprocesadores e incluía varias características que la situaban en la punta de lanza de la tecnología mundial de esa época: programable, inteligente, modular, diagnosticable y confiable. Un aspecto tecnológico fundamental en el diseño de este equipo era el protocolo de comunicaciones, puesto que no se sabía con qué marca de equipo se iba a conectar. El grupo optó por un diseño flexible que permitía la comunicación con cualquier protocolo, definiéndose en un principio tres distintos (los que más se utilizaban). A petición del Cenace, el primer prototipo, con el que se demostró que estos equipos podían diseñarse en el Instituto, se tuvo que integrar en cuatro meses e instalar y probar en la subestación Hermosillo II, en Hermosillo, Sonora. En este logro resultó de suma trascendencia la asesoría y experiencia en la fabricación de equipos electrónicos del ingeniero Herbert Redd, de la Universidad de Utah.

En un recuadro del *Boletín IIE* citado, se destacaba una decisión clave:

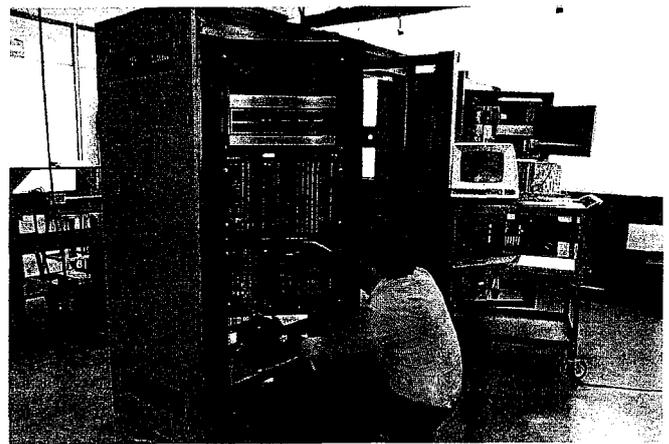
El principio del proyecto fue realmente un desafío, ya que no existía experiencia interna. En esa primera etapa nos enfrentábamos a la necesidad de seleccionar un modelo de equipo, utilizando lógica cableada, conjunto de circuitos digitales y analógicos interconectados, o microprocesadores de reciente aparición y desarrollo tecnológico.

... se optó finalmente por los microprocesadores, con un grado de tecnología más acorde con nuestras necesidades [...] (Jorge Zavala)

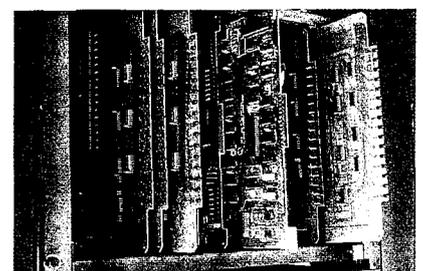
Difícilmente podríamos afirmar que la decisión se tomó por sugerencia del Instituto, pero nuestros criterios en favor del em-



Primera versión de la TRIIE instalada en la subestación eléctrica de Hermosillo.



Segunda versión de la TRIIE.



Tarjeta de la línea SAC.

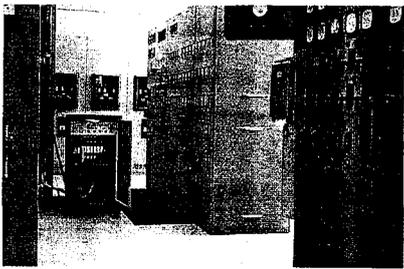


Línea de ensamble de las TRIIE.

pleo de microprocesadores permitieron influir en la gente del Cenace para que se inclinara hacia este campo. Influyó además el hecho de que otras empresas proveedoras estaban evolucionando hacia el empleo de microprocesadores. (Eduardo Lobatón)

Las terminales remotas se transfirieron a dos fabricantes nacionales. Se fabricaron dos generaciones de remotas, la TRIIE-V3 y la TRIIE-V5, y en total se instalaron 350 equipos en subestaciones tanto de la CFE como de Luz y Fuerza del Centro. Actualmente, en las subestaciones del sistema interconectado nacional se están incorporando equipos más modernos, pero casi todas las remotas construidas hace 15 años se han mantenido en funcionamiento.

El ingeniero Cesar Chávez, investigador del Departamento de Electrónica entre 1979 y 1983 y actual director de la empresa Desarrollo Tecnológico en Electrónica, ubicada en la ciudad de Chihuahua y que desarrolla y fabrica equipos de control supervisorio aplicados a los sectores hidráulico y eléctrico del país, comentaba en la mesa redonda:



Cosex instalado en una hidroeléctrica.

En este momento resulta difícil determinar exactamente el porcentaje de contenido nacional de las unidades terminales remotas. Los estudios que hemos realizado con base en datos disponibles en la actualidad, son del orden de 70 a 75 por ciento. Son porcentajes que pueden optimarse y será una tarea fundamental para la empresa receptora de la tecnología.



El controlador programable de secuencias (CPS).

Desafortunadamente, a pesar de la capacidad de la TRIIE, las empresas receptoras de la tecnología no produjeron nuevas generaciones de remotas. Entre las razones, se cuenta la apertura comercial, junto a la decisión de los fabricantes de no seguir apostando por un producto con posibilidades de aplicarse competitivamente en otros procesos industriales. A este respecto, recuerda José Albarrán: “El enorme reto que enfrentábamos no era la tecnología, sino transferir la TRIIE a un sector de electrónica industrial prácticamente inexistente en nuestro país”. El actual director de Planeación y Desarrollo Organizacional de Ingenieros Civiles Asociados (ICA), desvía súbitamente sus recuerdos: “Integramos un equipo de investigación con miembros destacadísimos; recordarlos me provoca siempre una sonrisa. Nunca he sentido tan intensamente lo que es trabajar en equipo como en esos años”.

“La actitud ante el reto fue la razón del éxito”, es su respuesta a la pregunta del porqué de los buenos resultados que logró el grupo que él encabezó durante tres años. “Fabricamos diversos productos entre los que destacó un controlador programable diseñado para automatizar las secuencias de arranque y paro de las hidroeléctricas (Cossex) y el controlador programable de secuencias (CPS); incluso se creó la empresa Simex, la cual continúa operan-

“La actitud ante el reto fue la razón del éxito”, es su respuesta a la pregunta del porqué de los buenos resultados que logró el grupo que él encabezó durante tres años. “Fabricamos diversos productos entre los que destacó un controlador programable diseñado para automatizar las secuencias de arranque y paro de las hidroeléctricas (Cossex) y el controlador programable de secuencias (CPS); incluso se creó la empresa Simex, la cual continúa operan-

do hasta ahora. El grupo se desintegró con el paso de los años: afectó el enorme esfuerzo sostenido y además algunos necesitábamos buscar nuevos desafíos en el exterior. Sin embargo, en el IIE se continuaron varios de los caminos abiertos entonces, entre ellos la línea SAC (sistema de adquisición y control), misma que se aplicó en una amplia gama de equipos que diseñó y construyó el Instituto.”

Los simuladores, un proyecto de gran alcance

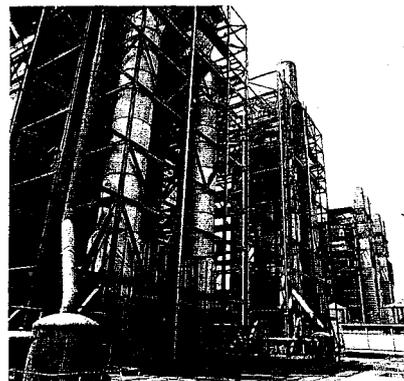
A finales de la década de los setenta se vislumbraba un considerable crecimiento de centrales termoeléctricas. De acuerdo con el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico, se estimaba para el periodo 1981-1990 la construcción de 25 mil MW de capacidad termoeléctrica, lo cual preciaría de 700 operadores con excelente preparación. Por varias razones, esta tarea no podía llevarse a cabo en las propias instalaciones: se ponía en riesgo la seguridad de las mismas y era difícil y poco factible repetir algunos procesos y fenómenos de operación, entre otras. La solución residía en construir un simulador de adiestramiento de operadores, similar a los que se usan para adiestrar a los pilotos de aviones.

Varios fabricantes se acercaron a la CFE para ofrecer sus equipos. Ésta, sin embargo, decidió contratar con el Instituto el diseño, la construcción y la puesta en operación de un simulador de alcance total. Para aprovecharlo al máximo, paralelamente construiría el Centro de Adiestramiento de Operadores en Ixtapantongo (CAOI), en Valle de Bravo, Estado de México, cuna de la CFE.

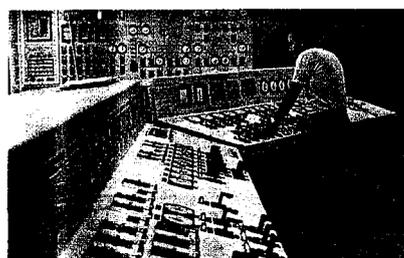
“En ese tiempo lo que más impulsamos fue el diseño de los simuladores para capacitación de operadores” -recuerda Alberto Escofet, director de la Comisión Federal de Electricidad de 1980 a 1982. “Fueron dos las razones: confiar en la capacidad del Instituto y asignar recursos para que los operadores de la Comisión participaran en el diseño. Resultó un éxito, no en virtud de que yo haya sido uno de los promotores, sino porque los beneficios son testimonio de la capacidad que tenemos para abordar proyectos de gran alcance.”

Ingeniero Escofet, ¿se dice que había presión de los fabricantes de simuladores? “Sí -responde-. Cuando la CFE buscó cómo mejorar la capacitación en centrales térmicas, ya que se iniciaba la construcción de las de 350 MW de capacidad y se construía la nucleoelectrica de Laguna Verde, se presentaron muchas ofertas de simuladores extranjeros. Siempre las acompañaban una serie de invitaciones, de ... *cookies*, para decirlo en términos actuales. Decidimos cortar por lo sano y contratar al Instituto”.

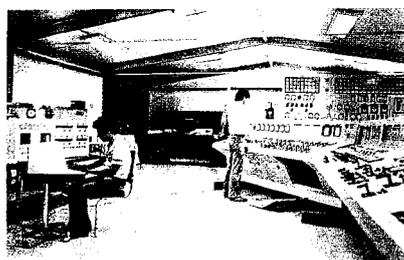
El diseño se basaría en una unidad en operación, la de Tula. La participación de personal de operación con experiencia era muy importante porque de ese modo la CFE se impregnaría del desarrollo. Un grupo de 14 ingenieros de operación, encabezado por el ingeniero Gilberto Muñoz Arango, que a la par coordinó la construcción del CAOI, se instaló en Palmira y durante dos años participó intensamente en el proyecto.



Central termoeléctrica de Tula.



Consola y tablero de control del simulador.



Tablero del simulador.

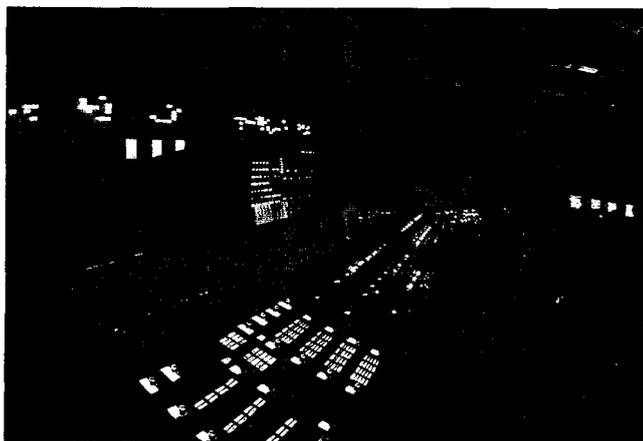


Consola del instructor.



Explicando el funcionamiento del simulador.

“El simulador que se construyó –añade el ingeniero Escofet– reproduce la operación de la unidad 1 de la central termoeléctrica de Tula, su tablero e incluso los ruidos ambientales. Se terminó en el plazo estipulado y se inauguró a fin del sexenio. Nunca tuve duda de que íbamos a lograrlo.”



Prender foquitos con computadoras.

A principios de 1979, el doctor Víctor Gerez Greiser se topó con uno de sus investigadores en el elevador de las oficinas del Instituto en las calles de Shakespeare, en la colonia Anzures. Le dijo emocionado: “Gaudencio, tenemos que construir un simulador para adiestrar a los operadores de termoeléctricas de la CFE”.

Así recuerda el doctor Gaudencio Ramos el inicio del proyecto del simulador en 1979 y añade: “Lo primero que hice fue investigar qué era un simulador”. Al término de varios meses, después de análisis, investigaciones bibliográficas exhaustivas y visitas a

varios simuladores en el mundo, el doctor Ramos junto con el doctor Luis Barrero elaboraron la propuesta inicial.

“Víctor Gerez me preguntó –cuenta Gaudencio Ramos–: –¿Qué especialidad piensas que debe tener el jefe del proyecto?–. Sin pensarlo, dije: Un experto en modelación matemática de procesos de transferencia de calor.”

Prender foquitos con computadoras

El doctor José Miguel González Santaló, ingeniero mecánico electricista de la UNAM, obtuvo su grado de doctor en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). De 1971 a 1975 fue gerente en diseño y modelación de reactores nucleares en General Electric, en California. Había regresado a México en 1975 para dirigir el Departamento de Energía y luego la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. A partir de enero de 1980 encabezó el Departamento de Simulación del IIE. Su meta era diseñar y construir un simulador en el mismo tiempo, dos años y medio, y al mismo costo, cuatro millones de dólares, que los ofrecidos por los proveedores extranjeros.

¿No le preocupaba un proyecto tan ambicioso, nunca realizado en México, en un área en la que unos cuantos países se habían embarcado y con la presión de producir los mismos resultados que los ofrecidos por las firmas comerciales? “No –responde con seguridad José González Santaló–. Guillermo Fernández de la Garza, Víctor Gerez y yo acordamos que nuestra primera meta debía ser prender foquitos con computadoras. Es decir, lograr activar las alarmas del tablero de los operadores mediante programas de computadora. Éstos representarían los modelos matemáticos que teníamos que crear para reproducir los fenómenos relativos a la operación de una termoeléctrica.”

Detrás de esa meta se perseguía aumentar el índice de disponibilidad y confiabilidad de centrales termoeléctricas: capacitar con rapidez y



Transporte del simulador al CAOI.

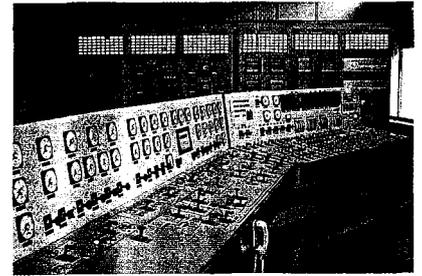
Efervescencia

eficiencia a sus operadores; mejorar los procedimientos de operación; mejorar los diseños de dichas centrales; promover la investigación en el país; y contar con tecnología nacional en el área de simulación.

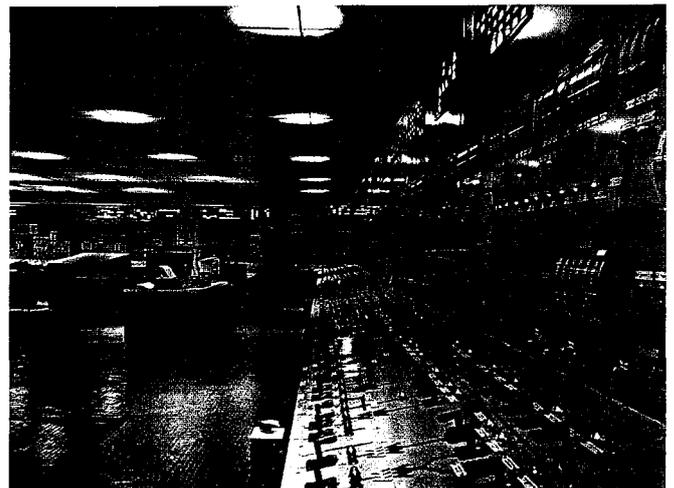
El Departamento de Simulación llegó a contar en poco tiempo con alrededor 60 investigadores que participaban en su totalidad en el proyecto del simulador. Colaboraban también investigadores de otros departamentos, como los de Instrumentación y Electrónica. Igual de grandes fueron los beneficios que aún sigue ofreciendo este proyecto. Hasta la fecha se han construido siete simuladores, que actualmente se encuentran en operación: el Termos I, con el que se inauguró el CAOI; el simulador de la nucleoelectrica de Laguna Verde; el simulador de los operadores de línea del Sistema de Transporte Colectivo Metro; el simulador de rodado de turbina; el emulador de máquinas síncronas; el simulador de operadores de centrales geotermoeléctricas y el simulador de operadores de centrales de ciclo combinado (concluido en mayo del 2000).

Posteriormente, el CAOI encargó la construcción del Termos II, un simulador que construyó una empresa mexicana con la tecnología del Instituto. Con sus dos simuladores, el CAOI estima haber capacitado hasta ahora del orden de 7580 operadores (incluido reentrenamiento). Asimismo, se calcula que el beneficio económico del simulador Termos I corresponde en promedio a 4500 dólares por año por MW de capacidad. Esta cifra equivale aproximadamente a cerca de 850 millones de dólares en los 18 años de operación de este simulador. Actualmente la lista de espera de este centro de adiestramiento abarca hasta el año 2002 y en ella esperan turno operadores de México y Latinoamérica.

“Tuvimos varias ventajas –recuerda el doctor Santaló—. Por un lado, el empuje y conocimiento del grupo de operación de la CFE, encabezado por el ingeniero Gilberto Muñoz Arango (director del CAOI desde su creación hasta 1998). Sin las sugerencias ni modificaciones de estos ingenieros que conocían a la perfección todos los procesos de las termoeléctricas, difícilmente hubiéramos terminado con éxito y a tiempo la construcción del simulador. Por otro lado, contar con asesores de primera línea a escala mundial y con el apoyo para conocer a fondo la tecnología de simuladores, la cual se había enfocado principalmente en los de nucleoelectricas, nos permitió implantar un gran número de mejoras con respecto a lo que existía hasta ese momento. En mi opinión, el Termos I era el simulador de mayor alcance y calidad del mundo cuando lo terminamos.”



Simulador de operadores de centrales geotermoeléctricas.



Simulador de Laguna Verde.

Credibilidad

pesar de la intención institucional de buscar áreas de innovación tecnológica que abrieran una amplia gama de oportunidades, no todos los grupos de investigación lograron en los primeros años de los ochenta resultados tan vertiginosos como los de electrónica y simulación: algunos construyeron paso a paso la credibilidad en los clientes.



Pablo Mulás (primero a la izquierda) durante una presentación.

“Cada grupo de investigación tenía sus propias características distintivas y creció de modo diferente en función de la demanda”, cuenta el doctor Pablo Mulás del Pozo, director de la División de Fuentes de Energía de 1976 a 1990 y director ejecutivo del IIE de 1991 a 1996. “La credibilidad —añade— se logró a distinto ritmo. Los investigadores del grupo nuclear, por ejemplo, contaban con muy buena capacidad. Sin embargo, en 1977 se reiniciaba la construcción de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde y no hubo actividad de innovación en ese periodo. Se había planteado que no duplicaríamos esfuerzos con el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y que no íbamos a realizar servicios rutinarios. Por otro lado, a pesar de que el grupo de fuentes no convencionales se acababa de formar y no tenía ninguna experiencia, en marzo de 1977 obtuvo el primer contrato en la historia del Instituto, el número 001, que correspondía a un estudio para la Comisión Federal de Electricidad sobre la aplicación de las fuentes no convencionales en el medio rural.”



Determinación de la viscosidad de combustóleos.

El reto para el grupo de combustibles fósiles, encabezado en 1977 por la maestra Ana María Martínez Leal (†) y poco después por el doctor Alejandro Peraza, se vislumbraba enorme y fascinante. A finales de la década de los setenta, la capacidad instalada en el sistema eléctrico nacional ascendía a cerca de 11 000 MW, de los cuales cerca de 66% correspondían a plantas termoeléctricas que quemaban combustibles fósiles, en su mayor parte combustóleo (nombre que se da en México al combustible pesado proveniente de los residuos del petróleo). Además de que este combustible resulta

difícil de quemar por sus características propias, las mismas ni siquiera estaban registradas en ese tiempo en la literatura técnica internacional, pues en los países desarrollados, donde se generaban y publicaban ese tipo de datos, se utilizaban combustibles menos pesados. De tal modo, una de las primeras actividades fue determinar analíticamente las características del combustóleo mexicano.

El Departamento de Combustibles Fósiles integró la capacidad analítica y experimental para determinar esas propiedades y analizar también la mejor forma de quemar este combustible que era mucho más viscoso, incluía un mayor contenido de asfaltenos y de azufre que los utilizados en termoeléctricas europeas y estadounidenses.



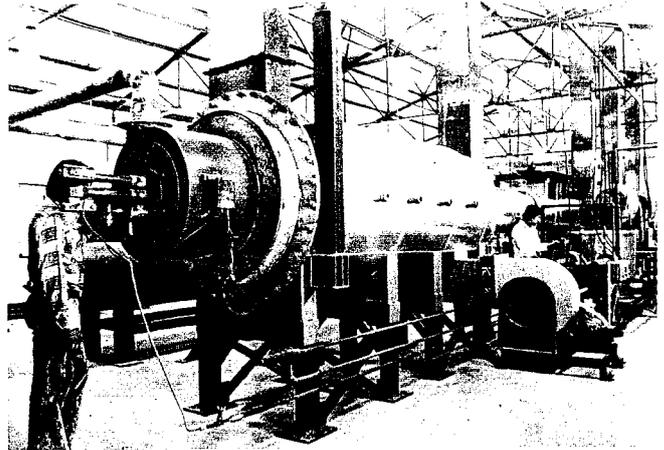
Laboratorio Químico.

En el año de 1978 se inició la construcción del Laboratorio de Análisis Químicos y poco después, con la asesoría del doctor Donald Anson de la Central Electricity Generating Board (CEGB), de Inglaterra, el del Laboratorio de Combustión, que contaría con la cámara de combustión y el banco experimental de atomización. Éstas constituyeron las principales instalaciones para estudiar y determinar experimentalmente las características de los combustóleos y el comportamiento del mismo en la combustión, con el propósito de sugerir mejoras en su quemado. Lo anterior era importante porque resultaba evidentemente más económico quemar con mayor eficiencia el combustible, se emitirían menos compuestos contaminantes a la atmósfera y se dañarían en menor grado los tubos metálicos por el efecto de compuestos como el azufre y el vanadio, presentes en este aceite residual del petróleo, en especial los que conducen el agua que se transforma en el vapor mediante el cual se acciona la turbina para generar la energía eléctrica.

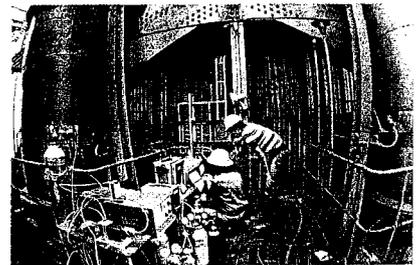
El doctor Mulás cuenta que penetrar en esta área resultó difícil: “En los primeros años nos costó mucho trabajo lograr credibilidad entre los grupos de producción, ya que éstos se preocupan, como debe ser, en resolver sus problemas cotidianos y no todos se convencen fácilmente de los beneficios de un posible desarrollo tecnológico a un plazo más largo”. Añade que los proyectos de investigación se deciden por la credibilidad y no por el costo. “Un usuario que mide el riesgo con la certeza de que va a resolver el reto tecnológico, sabe perfectamente que los beneficios casi siempre son mucho mayores que los costos del proyecto.”

Para convencer a los responsables de la operación de las termoeléctricas, el Departamento de Combustibles Fósiles contó con un excelente aliado: el ingeniero Carlos Rodríguez Rivero. Era un técnico de la CFE con gran experiencia en calderas de vapor y con conocimiento de todos sus problemas. Incluso sabía, o intuía en muchos casos, las causas de las fallas de equipos diseñados para combustibles de otras características. Gracia a él, los investigadores del Instituto entraron por primera vez dentro de la caldera de una termoeléctrica de la CFE. Cuentan que en esa ocasión, el ingeniero Rodríguez Rivero señaló una caja de aire de un quemador que estaba totalmente destruida y lo que dijo fue una clara muestra de su conocimiento: “Se queman muy seguido por la recirculación de gases de combustión a muy alta temperatura”.

En 1983, el Instituto ya había aplicado en las calderas de la CFE una metodología para la puesta a punto de la combustión, que años después (1987) se transferiría a la Gerencia de Generación y Transmisión. Para ello, cerca de 125 ingenieros, provenientes de todas las regiones de generación, participaron en cursos intensivos impartidos en las instalaciones del Instituto en Cuernavaca.

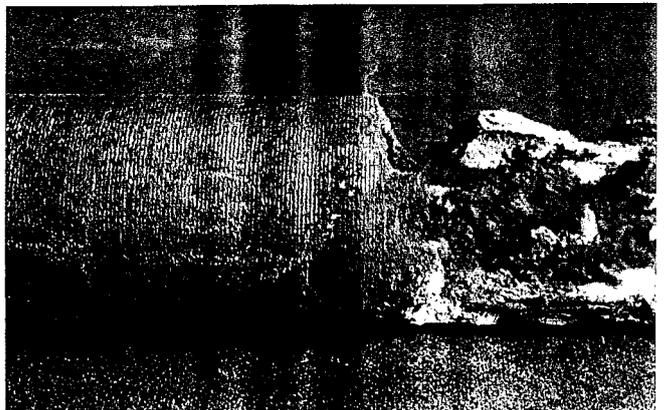


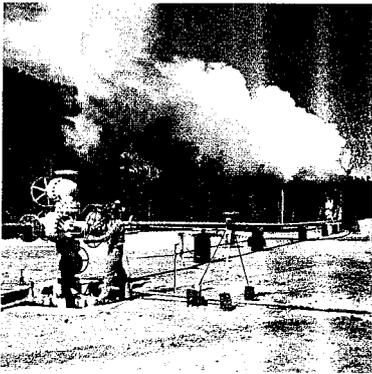
Pruebas de quemado de combustóleo en la cámara de combustión.



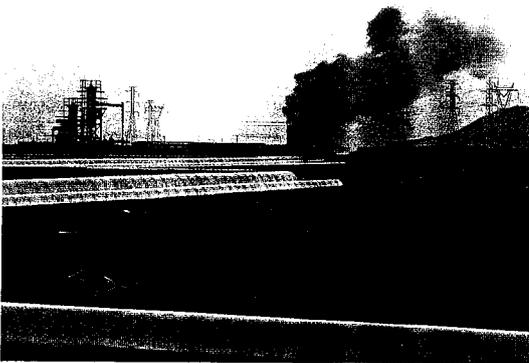
Diagnóstico de combustión en calderas.

Porción de tubo con y sin recubrimiento formulado en el IIE.

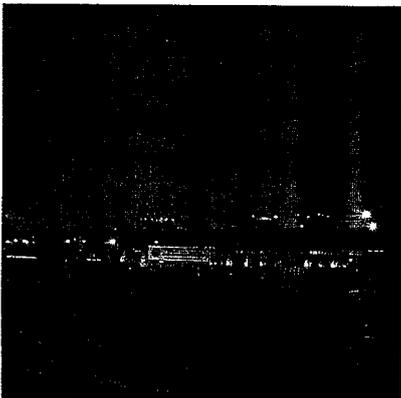




Descarga lateral de pozo geotérmico de Los Azufres.



Tuberías de conducción de vapor y separadores en el campo geotérmico de Cerro Prieto.



Central geotermoeléctrica de Cerro Prieto.

Mediante esa metodología, en cierto modo equivalente a la afinación de un automóvil, se mejoraba la combustión para incrementar tanto la eficiencia como la disponibilidad de las unidades de las centrales termoeléctricas; asimismo, se propuso un diseño de quemador que resolvió el problema aerodinámico señalado por el ingeniero Rodríguez Rivero, además de que se trabajó en diversas áreas, entre ellas la caracterización de los materiales de las tuberías y recomendaciones como los recubrimientos para resolver las fallas que ocurrían en las mismas.

“Sin el ingeniero Rodríguez Rivero –señala el doctor Mulás– no hubiera existido el puente de comunicación que nos permitió vincular los problemas de las plantas con las soluciones que podíamos ofrecer para resolverlos y lograr que el personal de las termoeléctricas creyera en nosotros.”

El exdirector del IIE y actual director de Programas Universitarios de la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM, indica que el mismo caso se dio en geotermia. “El ingeniero Mercado, jefe en ese entonces del Departamento de Geotermia, había trabajado en el Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica (IIIE) y tenía muy buena relación con la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, a cargo del ingeniero Héctor Alonso. Éste nos encargó diversos estudios y proyectos de campo. A principios de la década de los ochenta, la geotermia recibió un gran impulso que colocó a la CFE como líder mundial en esa especialidad”.

Entre los proyectos que se realizaron se incluyeron los estudios de incrustaciones de tuberías por la salmuera de los fluidos geotérmicos, la caracterización de yacimientos para mejorar su explotación, así como las actividades de diseño llevadas a cabo por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Ingeniería, entre las que sobresalen equipos de superficie como los silenciadores o la unidad 5 de Cerro Prieto, con la cual se amplió en 20% la capacidad de la planta sin que fuera necesario perforar más pozos, ya que se utilizaba el fluido geotérmico de desecho que había pasado por las otras cuatro unidades.

“Sin embargo –señala el doctor Mulás–, es igual de importante mantener la credibilidad, pues reconstruirla representa un esfuerzo enorme; un cliente, al brindar su confianza, pone en juego la adecuada operación de las instalaciones bajo su responsabilidad.”

En materia nuclear, las oportunidades de innovación para el Instituto llegaron luego de la entrada en operación de la nucleoelectrica de Laguna Verde. De entre las áreas en las que se trabajó, el doctor Mulás subraya la tecnología propia que se logró conformar conjuntamente con la CFE para el diseño de los ciclos de combustible nuclear y los estudios para el análisis probabilístico de riesgos.

La cosecha

Luego de los periodos de planeación, efervescencia y construcción de la credibilidad, el Instituto empezó a cosechar frutos en muy diversas áreas en el periodo comprendido en la segunda mitad de los ochenta. En el transcurso, hubo

Credibilidad

que redefinir la cartera de proyectos a consecuencia tanto de la crisis económica que imperó en esos años como de la terminación de la política de sustitución de importaciones y la apertura de las fronteras a los equipos extranjeros.

A fines de los ochenta se habían transferido varios desarrollos tecnológicos al sector eléctrico, a la industria de manufacturas eléctricas, a otros sectores productivos, principalmente el petrolero, e incluso a empresas eléctricas de otros países.

El Departamento de Transmisión y Distribución había obtenido resultados relativos al estudio de los efectos de las descargas atmosféricas y la contaminación salina y urbana sobre las instalaciones eléctricas, así como en lo referente a los mejores esquemas de protección. Lo anterior dio lugar a las primeras guías de diseño que sobre este tema se formularon en México y que aún siguen utilizándose.

El Departamento de Análisis de Redes había terminado los programas de aplicación avanzada, que aplicaba el Centro Nacional de Control de Energía en la optimización económica de la generación y de la transmisión de la energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional. Asimismo, el Departamento de Telecomunicaciones había incursionado principalmente en el diseño y construcción de equipos optoelectrónicos.

Además de la TRIIE, el Departamento de Electrónica había creado la línea SAC (Sistema de Adquisición y Control), un sistema operativo que constituyó la base de varios de los equipos diseñados y construidos en el Instituto: los simuladores de Laguna Verde y del Sistema de Transporte Colectivo Metro, entre otros. A partir de esa misma tecnología, la empresa Simex había fabricado miles de tarjetas que se utilizaban en otros equipos.

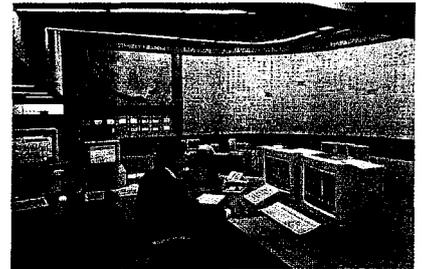
Además, con base en la misma línea SAC, se diseñaron el control lógico de quemadores de la termoeléctrica del Valle de México y los sistemas de control distribuido de la central de Dos Bocas en Veracruz y la de Gómez Palacio en Durango.

El Instituto había desarrollado tecnología para el diseño y la construcción de sistemas de apoyo para la supervisión del arranque y la operación de centrales eléctricas: el Sistema de Adquisición de Datos y Registro de Eventos (SADRE), por ejemplo, se transfirió a una empresa y se instaló en varias centrales. Con base en ésta y otras experiencias, a petición de la CFE, el IIE participó en la asimilación y ampliación de la tecnología del SIIP (Sistema Integral de Información del Proceso), con el cual se apoyan las actividades y operación normal y en emergencia de las unidades 1 y 2 de la nucleoelectrica de Laguna Verde.

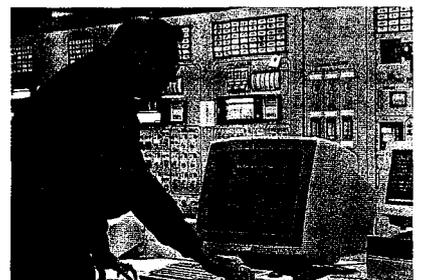
En la División de Estudios de Ingeniería, el Departamento de Ingeniería Civil, luego de coordinar a principios de los ochenta la primera actualización del Manual de Obras Civiles de la CFE (documento aún de consulta para los ingenieros civiles de todo el país), incorporó los avances más recientes a finales de esa misma década en los capítulos de diseño por viento y diseño por sismo; además, creó *software* especializado para el diseño estructural de torres de transmisión.



Descargas atmosféricas y líneas de transmisión.



El Cenace.



El SIIP en la central Laguna Verde.

Más allá de los resultados

Hemos dedicado un buen esfuerzo al desarrollo de técnicas matemáticas para establecer estrategias de control avanzado de diversos tipos de procesos, principalmente relacionados con la generación termoeléctrica. Ahora empezamos a ampliar nuestro mercado e incluso hemos establecido convenios con fabricantes de equipo de control. Ellos ponen sus controladores y nosotros el software de control. La combinación puede aplicarse en una gran variedad de procesos industriales.

Gerencia de Instrumentación y Control

Resultó clave el contrato que nos otorgó la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde para asimilar la tecnología de un sistema básico de supervisión que desarrolló la compañía General Electric. Esto nos permitió ampliar el alcance funcional hasta lograr el Sistema Integral de Información del Proceso (SIIP) e incluso desarrollamos funciones especiales que solicitó el personal de la nucleoeléctrica. Actualmente estamos apoyando en la modernización de dicho sistema, así como en su integración al simulador de dicha central.

Gerencia de Supervisión de Procesos

A finales de los sesenta la Comisión Federal de Electricidad apoyó la edición del Manual de Diseño de Obras Civiles, que desde su primera versión se convirtió en el documento de consulta obligado para la construcción de obras civiles, tanto en México como en Latinoamérica. Nos correspondió la primera actualización a principios de los ochenta y, veinte años después, actualizamos los capítulos de diseño por sismo y por viento. En ellos se incorporan los últimos avances de investigación, avalados casi siempre con resultados del "laboratorio natural" que conforman muchas estructuras instrumentadas sometidas a sismos y huracanes.

Gerencia de Ingeniería Civil

Después de un crecimiento acelerado de dos años, que culminó en la consolidación de la Red de Información Tecnológica del Sector Eléctrico, se optó en 1984 por un cambio en la organización que resultó trascendental para el logro de los objetivos y para la tónica de servicios preponderante durante los siguientes 15 años: una organización jerárquica netamente administrativa de los recursos bibliográficos fue transformada en una organización por especialidades temáticas. Esto permitió una riquísima interacción entre los usuarios y los ingenieros de la Gerencia de Información Tecnológica que atendían sus demandas.

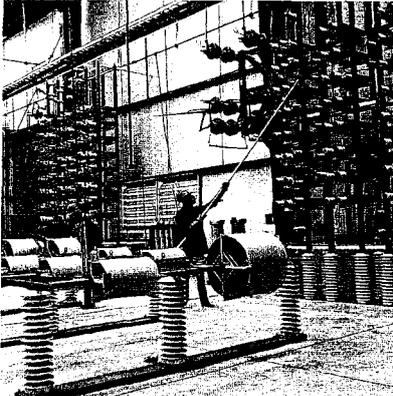
Gerencia de Información Tecnológica

Un aspecto que es importante destacar es la sistematización del desarrollo de sistemas informáticos basados en metodologías de ingeniería de software. Además, se han enfrentado retos interesantes en el desarrollo de sistemas informáticos de gran complejidad en los que el Instituto ha sido pionero en la aplicación de técnicas de cómputo novedosas (sistemas expertos, almacenes de datos, bases de datos distribuidas, tecnología *Web Multimedia*) y se ha creado una cultura de aseguramiento de calidad en el desarrollo de software.

Gerencia de Sistemas Informáticos

Empezamos realizando servicios de balanceo de rotores de turbinas y de diagnóstico de vibraciones. De manera simultánea, estudiamos los problemas más importantes relacionados con los grandes equipos rotatorios, como el deterioro del sistema de álabes y sellos, lo que nos permitió crear métodos de rehabilitación por soldadura para realizar reparaciones sin necesidad de comprar refacciones; también se han desarrollado varios programas de cómputo. Gracias a esas herramientas, nuestra capacidad ha crecido para enfocarse en el diagnóstico y la reconstrucción de turbomaquinaria. Los logros son de dos tipos: 1) ahorros considerables porque hemos recuperado gran número de equipos con componentes reparados y modificados a bajo costo y 2) recuperación de la eficiencia y potencia de las máquinas, lo cual se traduce igualmente en un enorme beneficio económico.

Gerencia de Turbomaquinaria



Laboratorio de cortocircuito de Salazar.

El Departamento de Equipos Rotatorios había creado herramientas de mantenimiento predictivo de equipos rotatorios, como el SIMPER y el SICAD, que detectaban, por anticipado, posibles fallas y resultaban muy útiles para programar los mantenimientos correctivos o preventivos de equipos muy costosos como las turbinas.

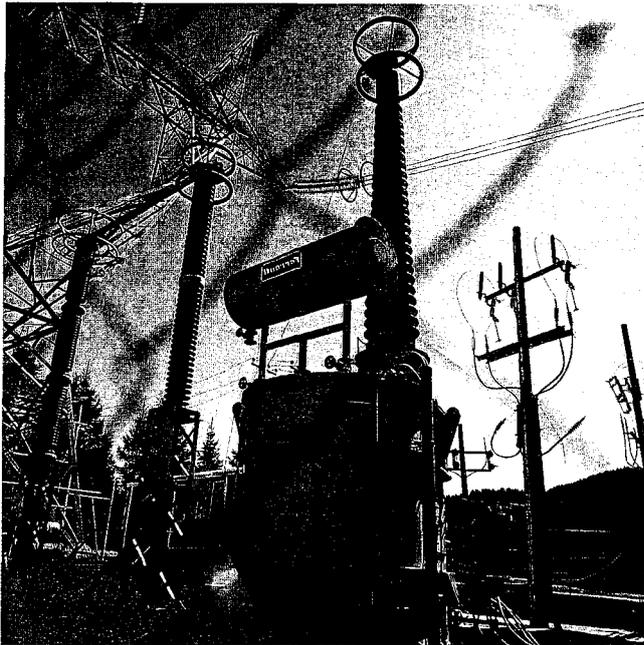
En el Departamento de Sistemas de Información se habían elaborado varios sistemas de información que empezaban a aprovechar las enormes capacidades de almacenamiento y de recuperación de los sistemas de cómputo. El SIPROCO, por ejemplo, era un sistema de información que utilizaba la CFE en el control de productividad y confiabilidad de centrales termoeléctricas.

Por otro lado, se había desarrollado tecnología para fabricar restauradores, dispositivos que permiten detectar e interrumpir corrientes de falla en las redes de distribución. Se había construido el Laboratorio de Salazar, en el Estado de México, para realizar pruebas especiales de alta tensión. Los aisladores de concreto polimérico ofrecían excelentes perspectivas económicas,

por lo cual se construyó una máquina para su producción a escala comercial. Igualmente se había incursionado en aisladores sintéticos, acero eléctrico y en la asimilación de tecnología de turbogeneradores geotérmicos a boca de pozo.

Se había conformado un grupo de especialistas que contaba con capacidad para diseñar y construir sistemas basados en fuentes no convencionales de energía (biomasa, eólica, solar térmica y fotovoltaica) para generar electricidad o apoyar actividades productivas.

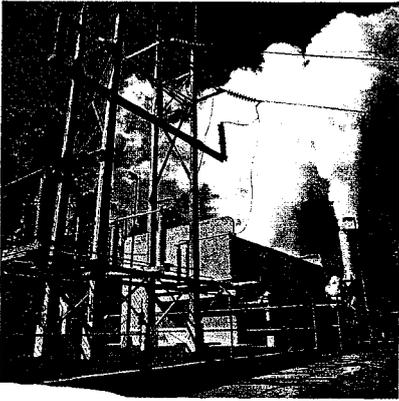
Por otro lado, el Instituto se preocupó desde su inicio por establecer servicios de información tecnológica que apoyaran tanto a los investigadores como a los ingenieros y técnicos del sector y la industria eléctricas. Al final de la década de los ochenta se ofrecían servicios a 3308 ingenieros de la CFE, y a casi 700 de Luz y Fuerza del Centro, así como a especialistas de empresas eléctricas de Latinoamérica.



Transformador de potencia.

Los cambios en el entorno

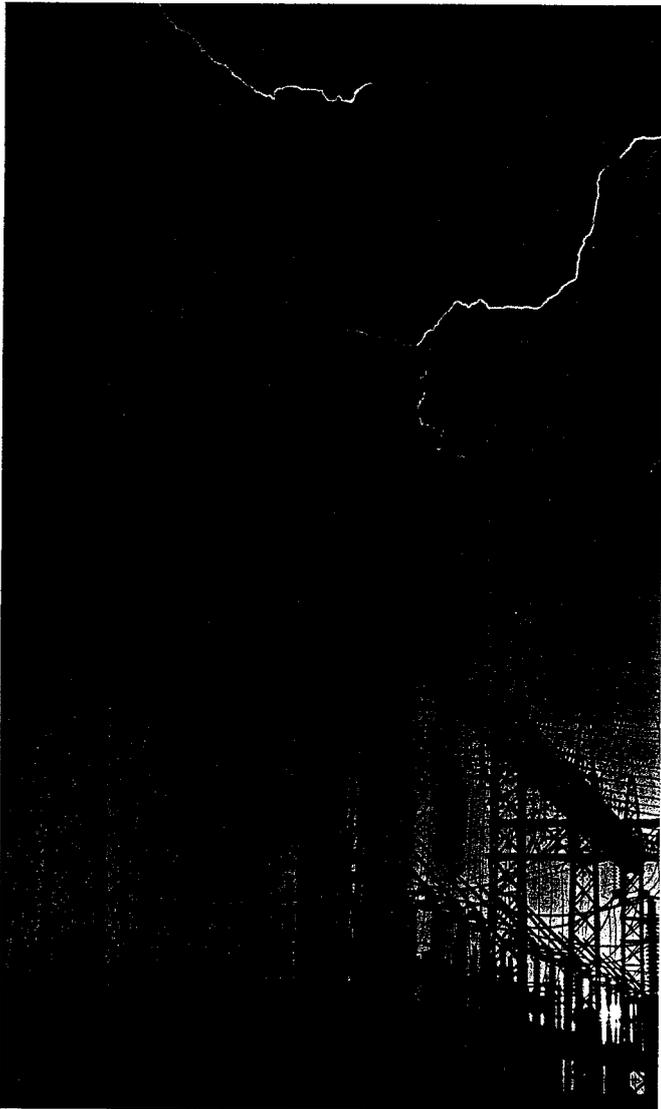
Algunas áreas, sobre todo las relacionadas con la fabricación nacional de equipos, enfrentaron serios problemas por el cambio de política relativa a la sustitución de importaciones (electrónica, entre ellas, como ya se señaló). Hubo un caso significativo. En 1985, el sector eléctrico decidió impulsar la creación de un grupo que asimilaría y adaptaría la tecnología de turbogeneradores geotérmicos a boca de pozo para transferirla a una empresa nacional. Las condiciones fundamentaban esa decisión: se pensaba que el desarrollo geotérmico del país implicaría pasar de 645 MW en 1985 a 2400 en el año 2000 y que la tecnología de los turbogeneradores a boca de pozo era la mejor para aprovechar los fluidos geotérmicos extraídos del interior de la tierra para producir electricidad.



Turbogenerador a boca de pozo.

El objetivo, sin embargo, no pudo cumplirse: al cambio en la política de fin de los programas de sustitución de importaciones se sumó la conclusión, a la que se llegó años después, de que no resultaba conveniente ampliar la capacidad geotermoeléctrica en el país, principalmente por los altos costos relativos a la exploración de los yacimientos y a la ubicación de los pozos.

No fue en vano todo el esfuerzo que se realizó para integrar el grupo mencionado. La experiencia sirvió, en parte, para fortalecer las áreas de equipos rotatorios y de equipos eléctricos. Éstas se han concentrado en el mantenimiento predictivo y en la reconstrucción de equipos, principalmente turbinas y generadores eléctricos: ambas áreas son actualmente las únicas en México con la capacidad de ofrecer servicios de diagnóstico, mantenimiento y reparación de estos costosos e importantes equipos en la generación eléctrica, e incluso ofrecen sus servicios a países latinoamericanos.



Anexo B

La Investigación
Eléctrica en México

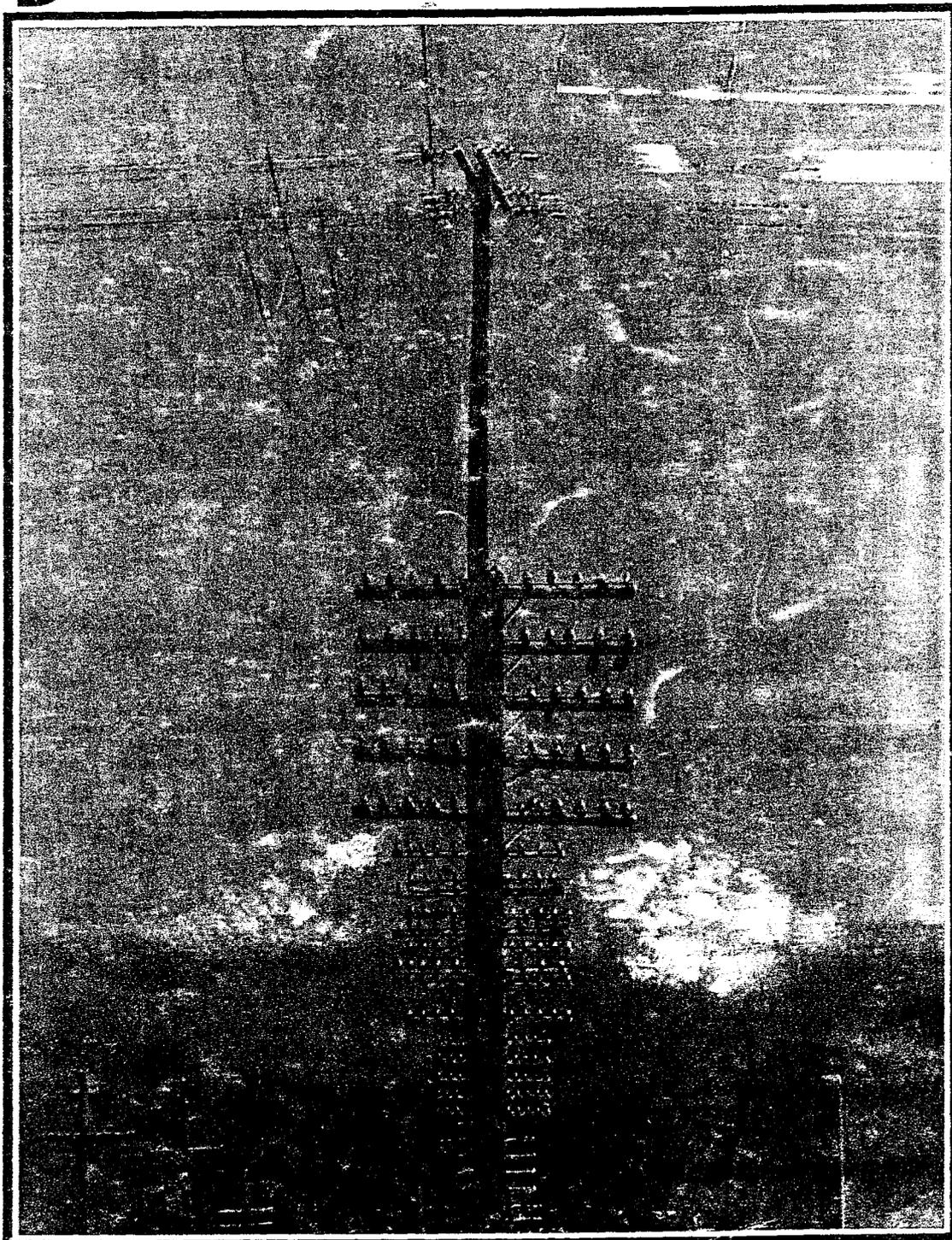
julio-agosto

1983

núm. 51

año IX

ciencia y desarrollo



Colombia 140 pesos /
Costa Rica 107.50 colones /
El Salvador 6.25 colones /
Ecuador 83.75 sucres /
EE.UU. 2.50 dólares /
España 135.00 pesetas /
Guatemala 2.50 quetzales /
Honduras 5.00 lempiras /
Nicaragua 25 córdobas /
Panamá 2.50 balboas /
Puerto Rico 2.50 dólares /
República Dominicana 2.50 pesos /
Venezuela 109.82 bolívares.



CONSEJO
NACIONAL
DE CIENCIA Y
TECNOLOGIA

\$ 60.00
MEXICO

Investigación y desarrollo tecnológico en el campo de las centrales termoeléctricas*

por Gabriel Nagore Cazares y Lucía González Meyenberg

En el campo de las centrales termoeléctricas México se libera de su dependencia tecnológica. Hoy se diseñan e instalan laboratorios experimentales de combustión y atomización; se investigan procesos específicos y el perfeccionamiento de máquinas, y se forman nuevos investigadores y técnicos, todo dentro de los últimos avances tecnológicos

Dado el papel que desempeñan los combustibles fósiles dentro del escenario actual y la alta disponibilidad y confiabilidad que exigen las centrales termoeléctricas, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) solicitó al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) concentrar esfuerzos con el propósito de aportar soluciones a los problemas inherentes a este tipo de centrales.

Durante los últimos años, conjuntamente con la CFE, se han identificado y definido los principales problemas y se ha desarrollado la infraestructura necesaria para encararlos; a la fecha se cuenta con resultados concretos, tanto en los estudios sobre el fenómeno de combustión como en los aspectos vinculados a la ingeniería, instrumentación y simulación de centrales térmicas.

Algunos conceptos básicos

Los combustibles fósiles constituyen en la actualidad los energéticos primarios a partir de los cuales se produce una gran parte de la energía que se consume en el mundo. Entre ellos se encuentran los carbones en sus múltiples variedades, el gas natural, el petróleo

* Este artículo fue redactado con la supervisión técnica de investigadores del Departamento de Combustibles Fósiles de la División de Fuentes de Energía del IIE.



Gabriel Nagore Cazares

y sus derivados. Todos se pueden utilizar en las máquinas térmicas, particularmente en las que se emplean para la generación termoeléctrica. Obviamente, en el proceso de transformación cada combustible presenta ventajas y desventajas que dependen particularmente del tipo de máquina térmica que se utiliza. Al descubrir la posibilidad de utilizar la energía proporcionada por estos combustibles, el hombre fue perfeccionando la máquina térmica, que tiene por objeto transformar la energía calorífica, producida durante el proceso de combustión, en energía mecánica.

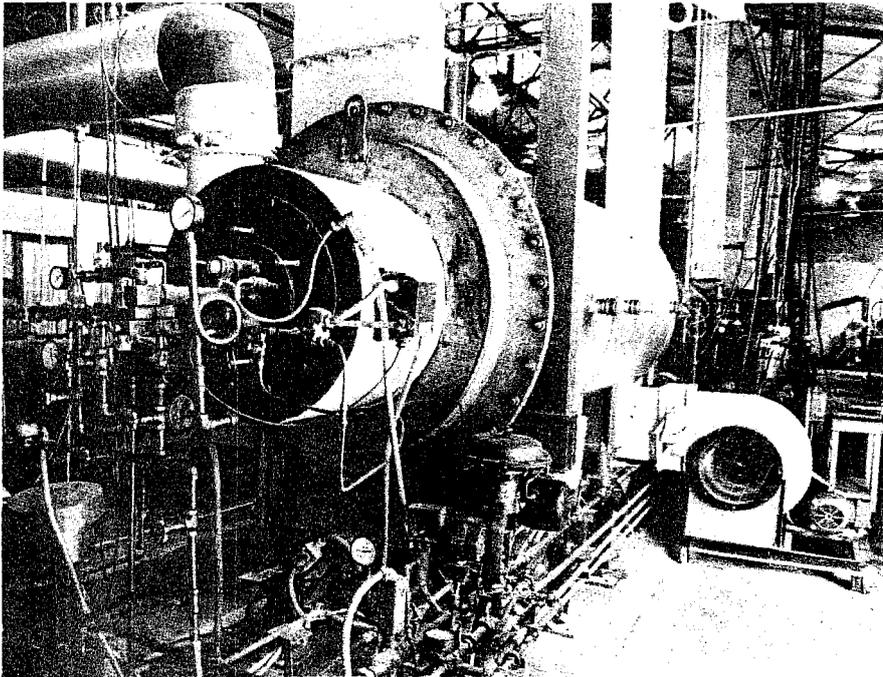
Las máquinas que realizan esta



Lucía González Meyenberg

transformación se clasifican, según la forma como se quema el combustible, en máquinas de combustión interna y máquinas de combustión externa. En las primeras el proceso se lleva a cabo en el interior de un cilindro; los gases liberados durante el mismo producen el desplazamiento de un pistón, cuyo movimiento puede aprovecharse para accionar sistemas mecánicos.

En las máquinas de combustión externa (las de mayor interés desde el punto de vista de la generación eléctrica en gran escala) el combustible se quema en un recinto denominado caldera y el calor producido se transmite a un circuito agua-vapor; en éste una



Fotos de Jesús Gallardo

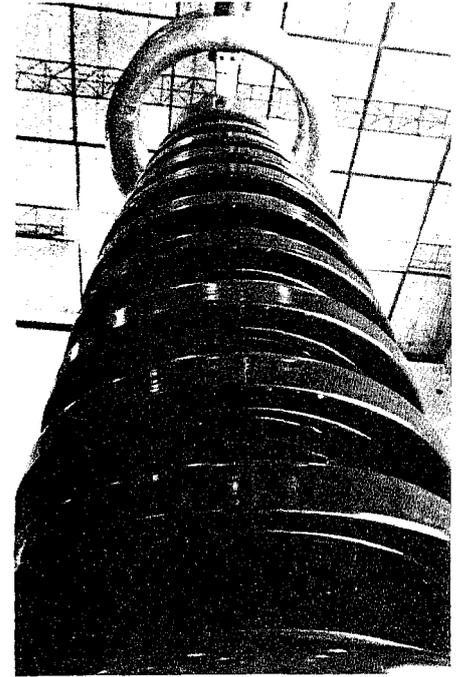
Simulador del comportamiento de las calderas de centrales termoeléctricas

parte del calor se utiliza para evaporar el agua y, posteriormente, la otra sirve para sobrecalentar el vapor producido. De este modo el vapor adquiere una gran cantidad de energía, que se traduce en el aumento de su presión y temperatura. Dicha energía se entrega en los alabes de una turbina, donde se transforma en energía mecánica que puede utilizarse, entre otras cosas, para mover el rotor de un generador eléctrico.

En el proceso de combustión se requiere cierta cantidad de oxígeno. Este se obtiene a partir del aire que, impulsado por un ventilador, llega a la zona de reacción (hogar) para

mezclarse con el combustible. Si la mezcla de aire y combustible ha alcanzado una cierta temperatura —denominada de ignición—, arde y libera la energía que se utiliza para producir el vapor de alta presión en un sistema que incluye diversos tipos de intercambiadores de calor.

El vapor mueve la turbina y ésta, a su vez, acciona un generador eléctrico constituido por un campo magnético que rodea a una bobina montada sobre el rotor del generador. En la bobina se induce una fuerza electromotriz, o diferencia de potencial eléctrico (voltaje), que se eleva mediante un transformador para facilitar



Transformador en el Laboratorio de Modelos del IIE

su transmisión a largas distancias. En los centros de consumo el voltaje se reduce a valores adecuados para su empleo industrial o doméstico.

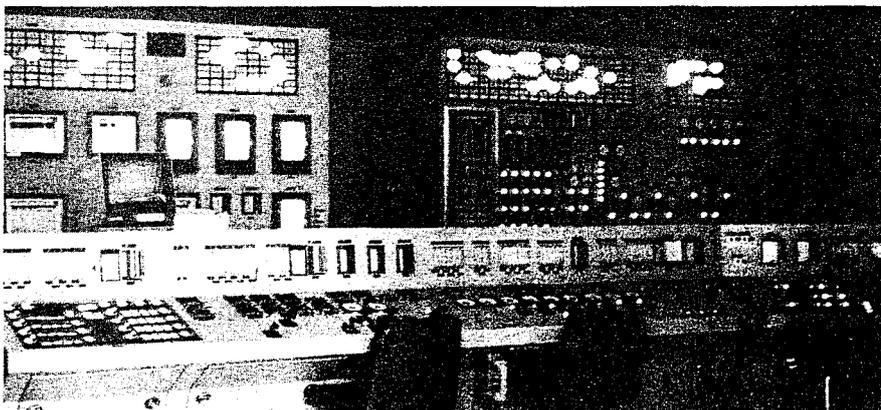
El conjunto formado por el generador de vapor, la turbina y el generador eléctrico integra la central termoeléctrica que transforma la energía calorífica en la electricidad que se consume cotidianamente.

Para producir calor, estas unidades termoeléctricas pueden utilizar los combustibles primarios mencionados: carbón, derivados del petróleo o gas natural.

El predominio de las centrales termoeléctricas

A través de la historia, la energía eléctrica ha producido cambios radicales en los procesos de producción y en los transportes. El desarrollo de la civilización está condicionado por un aumento en la disponibilidad de energía, por lo que es necesario hacer un uso racional y planificado de los recursos existentes, así como buscar fuentes alternas que aseguren el desarrollo en el futuro.

Para México la energía que se genera en centrales termoeléctricas es hoy determinante en su progreso y creci-



Simulador de centrales termoeléctricas para adiestramiento de operadores, situado en Valle de Bravo

miento industrial. Según los últimos datos oficiales publicados por la CFE, de los 67.9 TWh (1 TWh equivale a mil millones de kWh) que se generaron en 1981, 24.4 TWh se obtuvieron en centrales hidroeléctricas, en tanto que 43.5 TWh fueron generados por centrales termoeléctricas.

A pesar de los esfuerzos que se realizan para diversificar las fuentes de energía, los combustibles fósiles —especialmente el combustóleo— seguirán manteniendo su predominio como recursos energéticos. Por esta razón, los estudios orientados a mejorar el aprovechamiento de los combustibles fósiles revisten gran importancia.

Los problemas relativos a la combustión y las contribuciones del IIE para resolverlos

Las propiedades físicas y químicas de los distintos combustibles utilizados en la generación termoeléctrica dan lugar a diversos problemas que afectan la disponibilidad, eficiencia y confiabilidad de este tipo de centrales. En este sentido, el gas natural se podría considerar el más noble, ya que su combus-

ión se puede conducir fácilmente, en forma higiénica y sin dejar residuos que afecten las instalaciones. En cambio, tanto el combustóleo como el carbón contienen componentes indeseables que provocan problemas durante y después de la combustión.

En particular, debido a los crudos pesados que se utilizan en el país —los cuales contienen altas cantidades de azufre y metales— los combustibles residuales que se obtienen dan lugar a productos de combustión que afectan seriamente los componentes metálicos de los generadores de vapor. Entre los principales problemas que repercuten en la operación de las centrales termoeléctricas destacan la corrosión, la formación de depósitos e incrustaciones, la baja eficiencia térmica y las emisiones contaminantes.

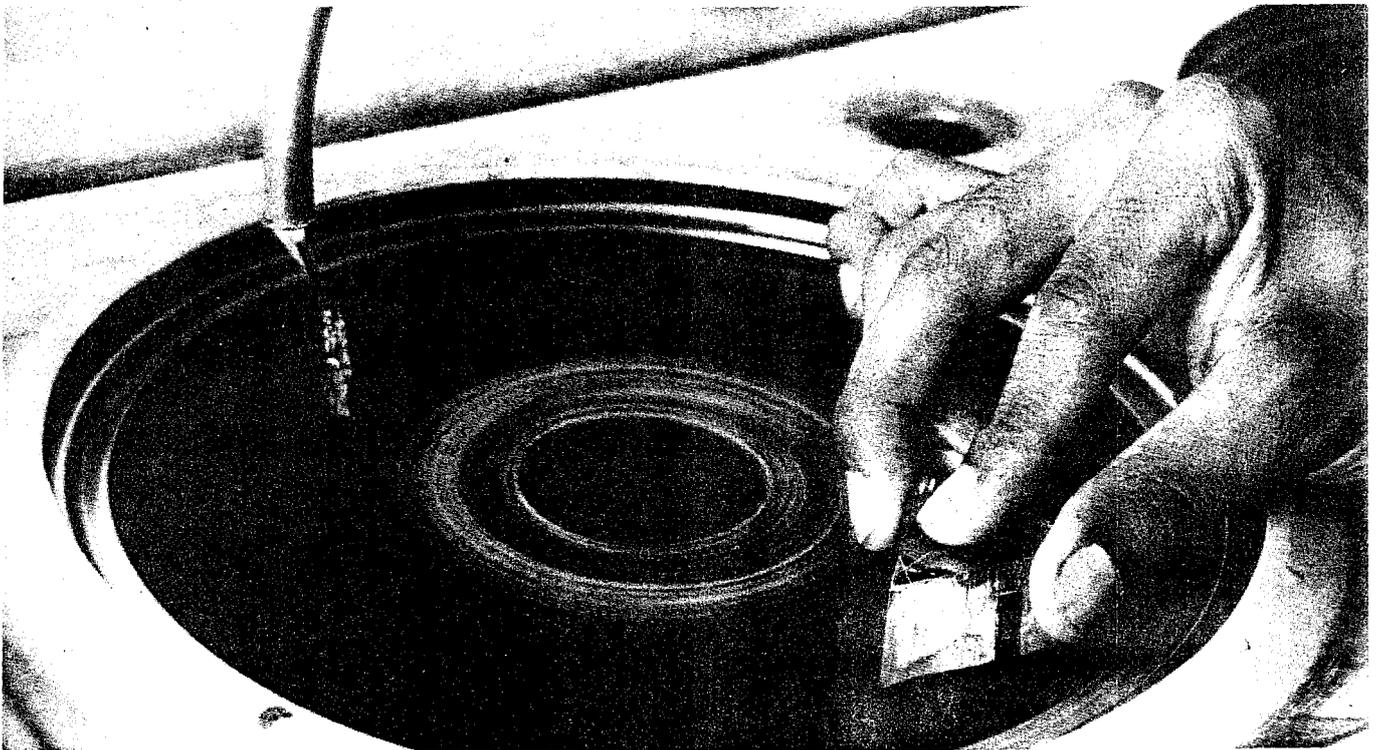
Por su parte, el carbón de Río Escondido utilizado en las unidades carboceléctricas mexicanas tiene un alto contenido de material inorgánico (cenizas) que provoca también serios trastornos de operación.

Consciente del papel que los combustibles fósiles tienen dentro de la política energética de crecimiento del país, el IIE ha dado especial importancia a los estudios orientados a resolver

los problemas inherentes al fenómeno de la combustión, así como al desarrollo de tecnología en este campo.

Con tal propósito se ha desarrollado una infraestructura de investigación, tanto en el aspecto material como en el humano, que permite encarar las soluciones a los problemas derivados de las características de los combustibles. Dichos problemas han sido identificados en estrecha colaboración con el personal de la CFE.

En este sentido se puede citar el laboratorio experimental de combustión y atomización que el IIE ha diseñado y construido con el objeto de simular y estudiar a escala experimental los fenómenos que se ha demostrado son relevantes en el funcionamiento de las unidades termoeléctricas. Entre otros estudios cabe mencionar los que se realizan para evaluar fenómenos de corrosión en tubos de caldera; los análisis sobre el comportamiento de aleaciones comerciales y de nuevas aleaciones propuestas; el estudio sobre las características del proceso de combustión de los diversos combustibles que se pueden producir en nuestro medio; el análisis del efecto de ciertos aditivos que se proponen para mejorar la combustión, y la evaluación de los sistemas



Pulimento de un óxido de un tubo de caldera en las centrales termoeléctricas

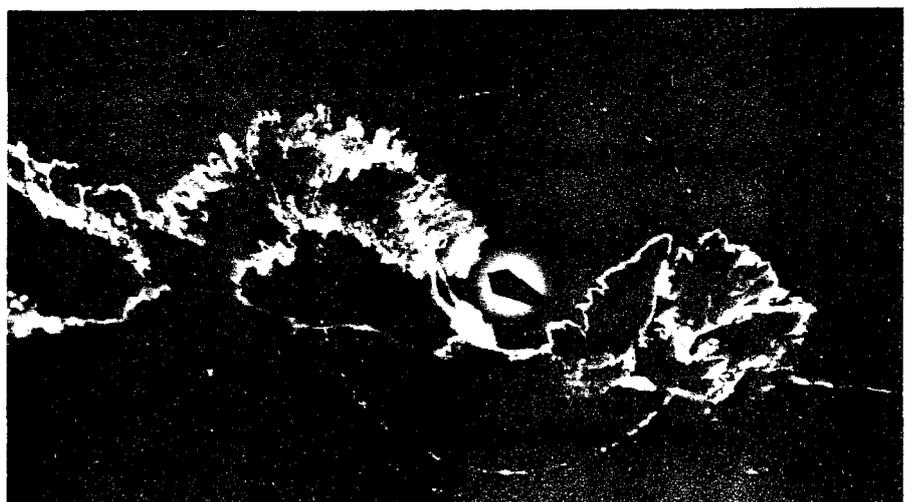
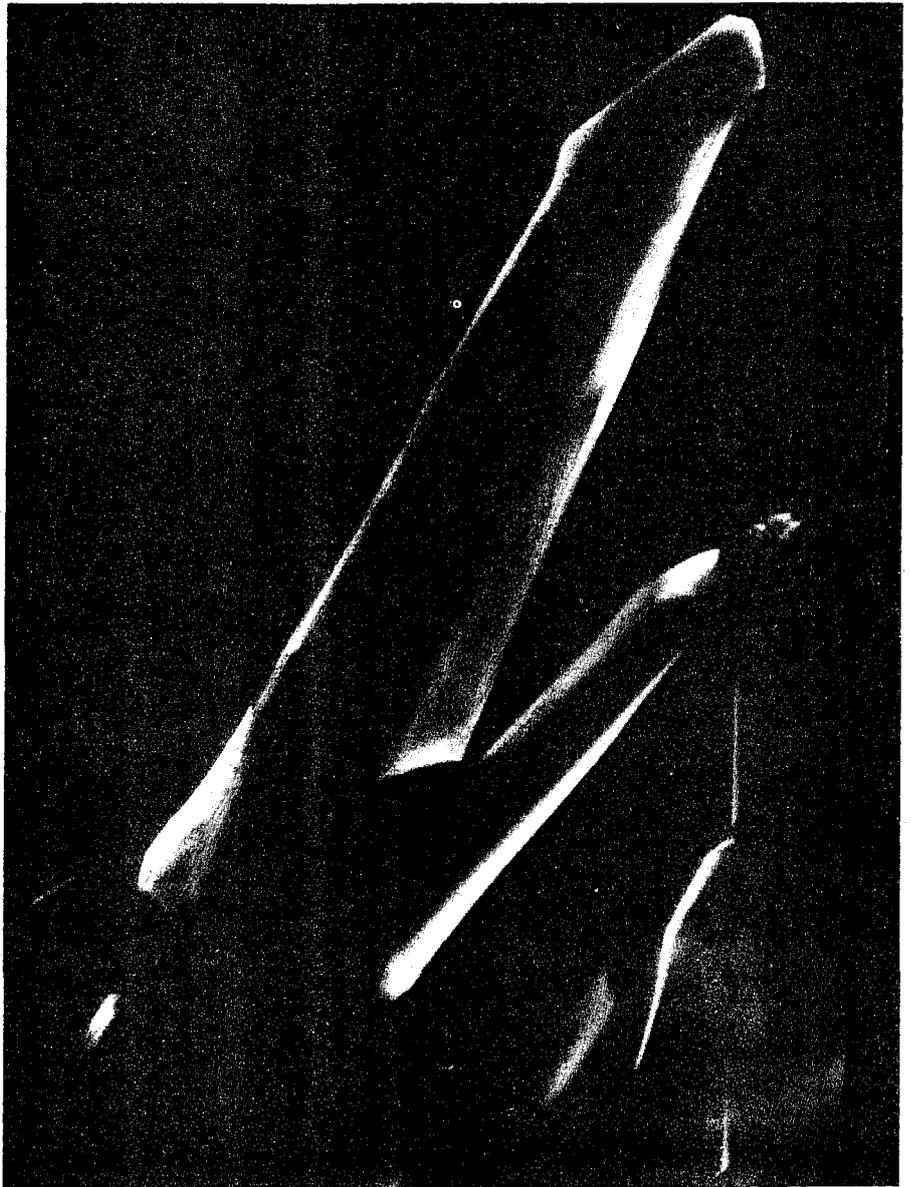
de atomización y aerodinámica de quemadores.

A través de estos estudios se ha adquirido capacidad para caracterizar los combustibles utilizados, determinar las condiciones óptimas de operación de los sistemas de atomización del combustible, diagnosticar la combustión y analizar y recomendar soluciones a los problemas provocados por las fallas de materiales.

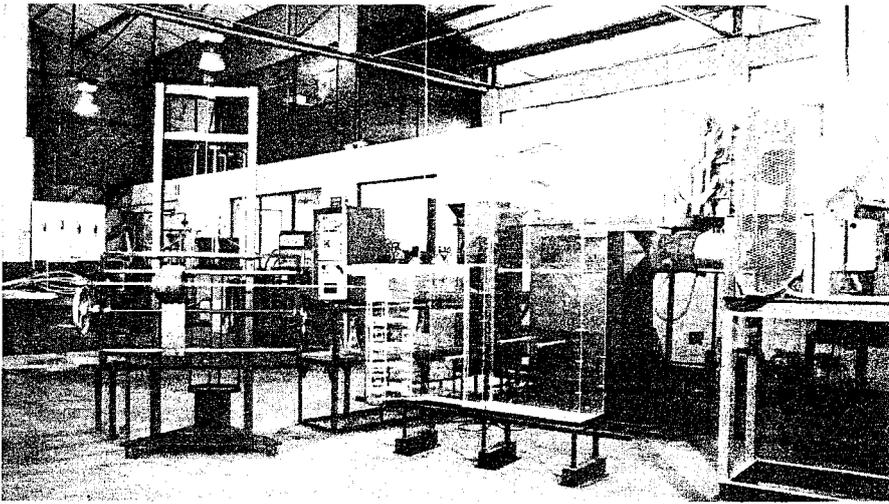
La caracterización del combustible mexicano ha permitido adquirir experiencia para estudiar cualquier tipo de combustible empleado en una central termoeléctrica. Esto permite prever el diseño más adecuado de la caldera desde el punto de vista de materiales, geometría y sistemas de manejo de combustible. En el caso de calderas en operación, la caracterización del combustible permite ajustar las condiciones de quemado, optimizando el proceso de acuerdo con el tipo de combustible disponible y tomar decisiones sobre el uso de aditivos y su dosificación. Para los estudios de atomización se dispone de bancos de prueba de atomizadores que utilizan fluidos simuladores con propiedades representativas de los combustibles. Con este sistema y con otras técnicas experimentales se determinan las características más adecuadas de atomización del combustible (presión, temperatura y flujo, entre otras) de acuerdo con las propiedades del mismo (viscosidad, tensión superficial y densidad). De este modo se selecciona el sistema de atomización más adecuado al combustible existente y se logra una combustión óptima que se refleja en la reducción de corrosión y emisiones indeseables.

En cuanto al diagnóstico de la combustión, la capacidad permite identificar aquellos subsistemas de la caldera que no operan correctamente y efectuar las modificaciones pertinentes. Así se logra ahorro en el combustible y un aumento en la disponibilidad de las unidades. En relación a las fallas producidas por la corrosión u otros fenómenos, el IIE está en capacidad de realizar estudios a partir de la toma de muestras representativas de las fallas hasta la presentación de conclusiones y recomendaciones para solucionar el problema.

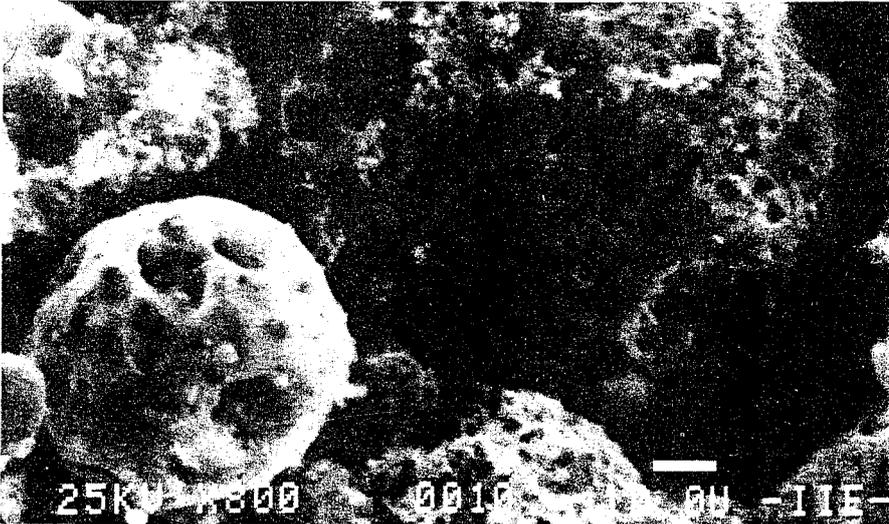
Estos trabajos han conducido a desarrollos tecnológicos que actualmente



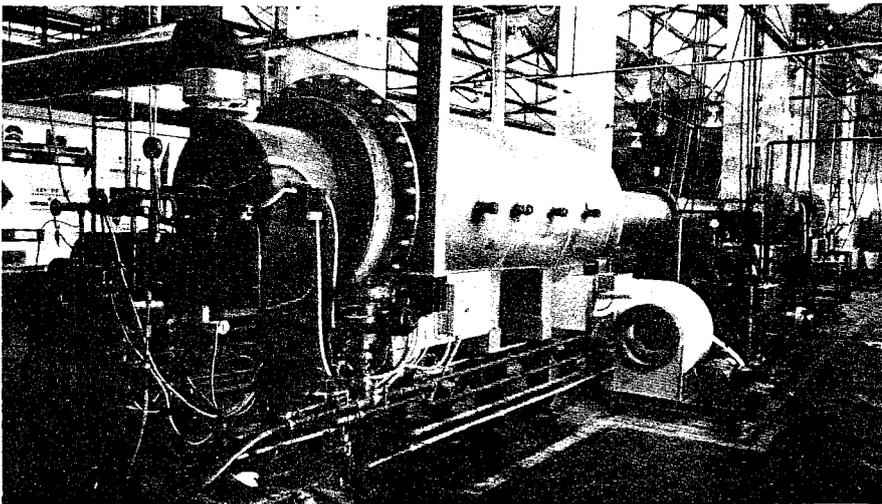
Cristales de óxidos tomados a través de un microscopio electrónico del IIE



Conjunto experimental del IIE



Microfotografía tomada en el Laboratorio de Combustibles Fósiles para analizar procesos de corrosión



Cámara de combustión que permite reproducir, en pequeña escala, algunas condiciones de operación de un generador de vapor y aislar ciertos fenómenos de interés

se aplican en México y que significan también un aporte a la solución de problemas similares que enfrentan otros países de latinoamérica.

Otros campos de acción

El Instituto ha realizado otros trabajos que le permiten brindar apoyo en la especificación y selección de equipos, y cuenta con tecnología experimentada en el diseño y operación de centrales, así como en la evaluación y adaptación de equipos avanzados. Dispone también de experiencia en el diseño de sistemas de instrumentación y control específicos para la protección de los dispositivos contra daños de operación.

En 1980, a solicitud de la CFE y con apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), el IIE incursionó en el campo de los simuladores de centrales termoeléctricas orientados al adiestramiento de operadores. Los simuladores de este tipo reproducen matemáticamente los procesos y acciones de control que ocurren durante la operación de una central termoeléctrica. Se componen de tableros de control idénticos a los de una central, de los modelos matemáticos y los programas de adiestramiento, así como del equipo de cómputo para ejecutarlos. De este modo los simuladores permiten adiestrar bajo cualquier circunstancia a los operadores, cuyo desempeño es fundamental para la correcta operación de la central.

Además de capacitar y adiestrar, la utilización de los simuladores permite aumentar la disponibilidad y confiabilidad de las centrales, mejorar los procedimientos de operación y analizar dinámicamente los sistemas de control. Sólo nueve países en el mundo han incursionado en el campo de la construcción de estos equipos. México es uno de ellos.

El simulador diseñado y construido en el IIE, con la participación de técnicos de la CFE, está instalado en el Centro de Adiestramiento de Operadores Ixtapantongo de la CFE y se encuentra en la etapa de pruebas de aceptación. La capacidad desarrollada y la experiencia adquirida en este campo abren grandes perspectivas de exportación de este equipo de avanzada tecnología. 🌀

Anexo C



Otorga el presente

DIPLOMA
COMO INSTRUCTOR

a FIS. GABRIEL NAGORE CAZARES

por su participación en:

TALLER DE REDACCION DE INFORMES Y ARTICULOS TECNICOS

Cuernavaca, Morelos, a 6 de mayo de 19 91


DIRECTOR EJECUTIVO
ING. GUILLERMO FERNANDEZ DE LA GARZA.


DIRECTOR DE DIVISION
DR. FRANCISCO PLATA OLVERA

CONSTANCIA COMO INSTRUCTOR

a *Fís. Gabriel Nagore Cazares*

por su participación en:

El Taller de Redacción de Informes y Artículos Técnicos (6 Horas)

Cuernavaca, Morelos, *Diciembre* de 1994



Dr. Pablo Mulás del Pozo

DIRECTOR EJECUTIVO



Dr. David Nieves Gómez

DIRECTOR DE DIVISION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

"60 ANIVERSARIO DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL"

La Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, expresa al **ING. GABRIEL NAGORE** un amplio reconocimiento por la presentación de la conferencia:

"PRESENTACIÓN POR ESCRITO DE UN TRABAJO DE DIFUSIÓN CIENTÍFICA"

con duración de dos horas, efectuada en el Seminario Departamental y de Tesis de la Coordinación de Ingeniería Eléctrica, Opción Potencia el día 19 de junio de 1996.

Se extiende la presente constancia en la Ciudad de México, Distrito Federal, a los diecinueve días del mes de junio de mil novecientos noventa y seis.

ATENTAMENTE.
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"




DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA CALDERÓN
JEFE DE LA SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN DE LA ESIME

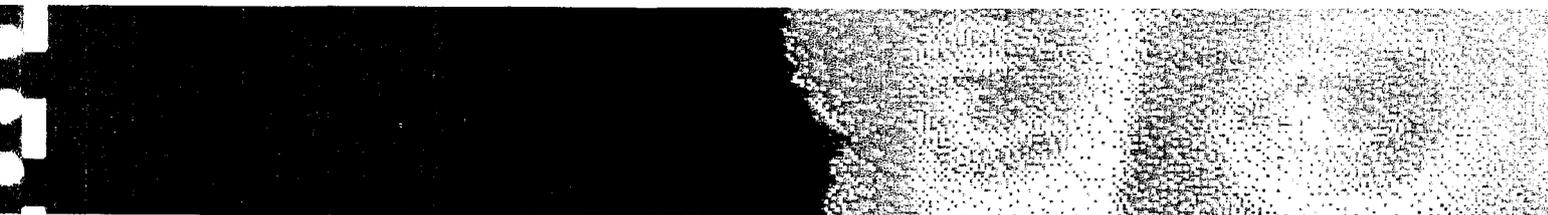

DR. FRANCISCO DE LEÓN
COORDINADOR DE LOS PROGRAMAS DE
POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

c.c.p. expediente de la S.E.P.I.
c.c.p. expediente de la C.I.E.
GUC*FD*sfl.

Anexo D

EL HOMBRE

que acercó las



Joseph von Fraunhofer.

A MEDIADOS del siglo XIX el telescopio, utilizado primero por Galileo hacia 1640, había alcanzado un considerable grado de perfección. La astronomía mostraba gran avance, pero al mismo tiempo parecía haber llegado a un callejón oscuro. A pesar de que los astrónomos habían catalogado decenas de miles de estrellas, seguían sin saber qué decir acerca de muchas preguntas: ¿qué eran?, ¿de qué estaban hechas?, ¿cómo se habían formado?, ¿el Sol era una de ellas? Todo indicaba que tendrían que resignarse a estudiar las estrellas como distantes puntos luminosos. Las respuestas se escondían en los colores.

Detrás del arcoiris

El fenómeno de los arcos de colores que se forman en el cielo siempre nos ha fascinado. Los científicos de la Edad Media ya sabían que cuando la luz blanca pasa por un prisma se descompone en los colores del arcoiris, es decir, se produce lo que en óptica se denomina un espectro. También llegaron a deducir que este mismo fenómeno se presenta cuando la luz solar atraviesa las gotas de lluvia, y que el color rojo del arcoiris se desvía más que el azul. Con los primeros telescopios las estrellas se veían con halos de colores debido a un defecto de las lentes, conocido como aberración

cromática. Era pues necesario perfeccionar las lentes y con ellas el telescopio. Con este propósito, Isaac Newton estudió el fenómeno del arcoiris y descubrió que la descomposición no se debía al prisma en sí, sino a que los colores son componentes naturales de la luz blanca —una de sus muchas aportaciones al campo de la óptica. No resolvió el problema de la aberración cromática e incluso concluyó, erróneamente, que era imposible lograrlo. Como ha ocurrido con otros grandes científicos, en sus estudios del espectro solar, ni Newton (quien no veía bien y necesitaba ayuda en sus trabajos experimentales), ni su asistente, observaron un curioso fenómeno: una serie de líneas oscuras que partían en franjas al espectro continuo de los colores que se proyectaba en la pared de su habitación en la Universidad de Cambridge. Estas líneas oscuras constituyeron, casi 200 años después, la clave para descifrar los secretos de las estrellas.

Las líneas oscuras del espectro solar se mantuvieron 130 años en el anonimato hasta que las descubrió el astrónomo inglés William Wollaston, al analizar la luz con un espectroscopio. En este instrumento se hace pasar la luz por una rendija y después los rayos se dirigen y se descomponen por medio de lentes y un prisma. Con el espectroscopio es posible determinar la posición de cada color en el espec-

estrellas

Gabriel Nagore



El Sol durante un periodo de poca actividad.

tro, la cual depende de una propiedad denominada longitud de onda. Wollaston, sin embargo, no dio importancia a las líneas oscuras, que después recibirían el nombre de líneas de Fraunhofer, en honor a quien las investigó.

La clave

Joseph von Fraunhofer nació el 6 de marzo de 1787 en Straubing, Alemania. A los 7 años quedó huérfano, por lo que enfrentó una infancia y una adolescencia difíciles. No tuvo oportunidad de asistir a la escuela y se vio obligado a trabajar como aprendiz de un fabricante de cristales ópticos. Pero un acontecimiento fortuito cambió su vida por completo: el edificio del taller donde trabajaba se derrumbó y cuando lo sacaban de los escombros, pasó

por el lugar el príncipe Maximiliano, quien más tarde sería rey de Prusia. El príncipe se compadeció del pequeño Joseph y le regaló 18 ducados, con los que el aprendiz se compró una máquina pulidora de lentes que le permitió independizarse.

Hacia 1814 ya era un calificado fabricante de telescopios y había aprendido física. Incluso llegó a convertirse en el encargado del Departamento de Física de la Academia Alemana de Ciencias y descubrió un método para fabricar lentes de mayor tamaño con una calidad óptica nunca antes lograda. Le interesaba fabricar lentes acromáticas (sin el defecto de aberración cromática) y para ello se dedicó a determinar el índice de refracción de distintos tipos de lentes, esto es, qué tanto se desviaba la luz al pasar por ellos. En sus trabajos descubrió un par de líneas brillantes amarillas en el espectro de la luz de una lámpara de aceite y encontró que se presentaban líneas similares en otras fuentes luminosas. Las líneas aparecían siempre en el mismo lugar y por ello serían útiles para determinar los índices de refracción.

Fraunhofer construyó un espectroscopio para mejorar sus mediciones. Luego estudió la luz solar con la intención de ver dónde aparecían las líneas: para su sorpresa, en vez de dos líneas brillantes, en el mismo lugar encontró dos líneas os-

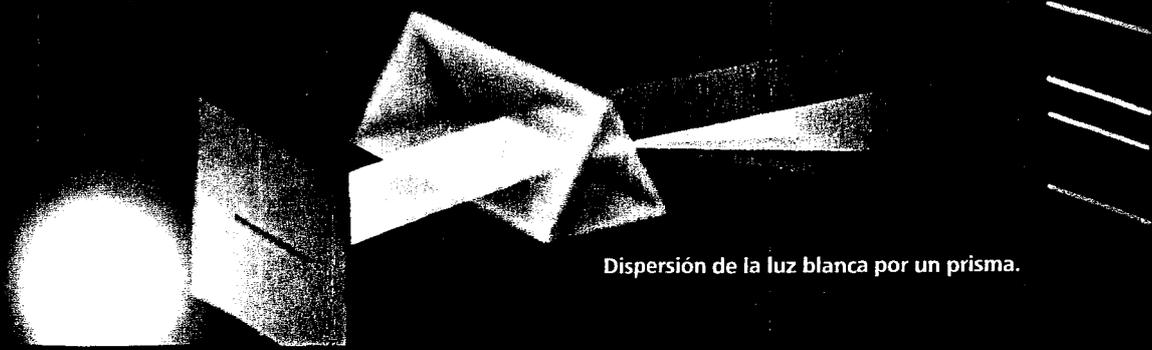


El Sol durante un periodo de máxima.

curas. Llegó a contar 754 líneas oscuras en el espectro solar y midió la longitud de onda de las más prominentes; les asignó letras y al par de líneas oscuras las nombró líneas D. Utilizó por primera vez una rejilla de difracción (placa delgada con rendijas paralelas, todas del mismo tamaño), lo que le permitió separar mejor las longitudes de onda y se percató, además, de que muchas líneas oscuras en el espectro del Sol se ubicaban en las mismas posiciones en las cuales el hierro emitía líneas espectrales brillantes cuando se calentaba y vaporizaba. Observó también que las líneas D aparecían en los espectros de otras estrellas como Venus y Sirio.

Fraunhofer estaba consciente de la perfecta coincidencia entre las líneas espectrales de vapores de elementos y las

Los espectros



Dispersión de la luz blanca por un prisma.

Longitud de onda en angstroms



El espectro continuo (la luz visible abarca desde el ultravioleta hasta el infrarrojo).

Absorción

Emisión

Emisión y absorción del espectro del sodio. Cada línea brillante del espectro de emisión se equipara con una línea oscura del espectro de absorción; es decir, se puede identificar a un elemento ya sea por sus líneas de emisión o absorción.

5890 Å — 5896 Å

Longitud de onda en angstroms

líneas oscuras del espectro solar, pero no pudo establecer la relación. Publicó sus resultados en 1814; entonces nadie entendió lo que significaban. La explicación tardó casi 50 años en llegar, hasta 1859, con los experimentos del físico alemán Gustav Robert Kirchhoff, quien pensó que intensificaría las dos líneas brillantes descubiertas por Fraunhofer, si colocaba vapor de sodio entre un espectroscopio y la luz solar. El resultado fue muy distinto: sugían dos líneas oscuras en el mismo lugar (iguales longitudes de onda) de las esperadas líneas brillantes amarillas. Kirchhoff tuvo la intuición para comprender lo que había descubierto: al ser atravesado por la luz solar, el sodio absorbía las longitudes de onda características (correspondientes al amarillo brillante) que emitía cuando era calentado con una flama.

Si el vapor de sodio podía absorber sus propias longitudes características, de igual

modo lo harían los elementos en la atmósfera del Sol. Las líneas de Fraunhofer serían entonces la prueba de que en el Sol había sodio y otros elementos, como el hierro. La suposición fue correcta. En 1868, en la India, una expedición encabezada por el astrónomo Pierre Jansen, obtuvo el espectro de luz de un eclipse solar. Todas las líneas oscuras que normalmente aparecen en el espectro de la luz del Sol se tornaron brillantes en el eclipse; eran las líneas de emisión de la atmósfera del Sol, fenómeno que sólo se puede detectar cuando la Luna bloquea el disco solar. Kirchhoff había encontrado la clave para determinar la composición del Sol y cualquier otra estrella, con lo que dio inicio a una nueva era en la astronomía. Posteriormente, el desciframiento completo de la información que encierran las líneas espectrales permitió a los astrónomos no sólo conocer la composición de los

cuerpos celestes, sino también otras características: la temperatura, la velocidad, la proporción de elementos que existen en ellos y, por si fuera poco, descubrir cómo nacen, viven y mueren las estrellas.

El desenlace de esta historia se produjo durante el primer cuarto del siglo XX con el modelo atómico de Bohr y los conceptos revolucionarios de la mecánica cuántica, disciplina que explica los fenómenos atómicos. Se confirmó que los átomos tienen huellas digitales: sus líneas de emisión y absorción. Las aportaciones de científicos como Joseph von Fraunhofer y Gustav Robert Kirchhoff resultan difíciles de ponderar. Posiblemente basten las palabras en latín grabadas en la tumba del primero: *Approximavit sidera* (Acercó las estrellas). ●

Gabriel Nagore es físico y desde hace varios años se dedica a la divulgación de la ciencia.