

ETOE-mx--99717754

IIE Bulletin.
Selected articles from 1986 issues of 'boletin iie'

DISCLAIMER

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

artículos técnicos

Análisis y adaptación de un modelo matemático de predicción de radiación solar

Lorenzo Zambrano

Existe una fuente de energía abundante, confiable, gratuita, cuyo uso puede planearse y, además, es prácticamente inagotable: la solar. En México constituye un recurso importante, por la posición geográfica del país; por eso es fundamental conocerlo bien, ya mediante mediciones realizadas durante algunos años, ya mediante modelos matemáticos. Estos últimos predicen, con datos de variables meteorológicas, los valores de la radiación solar con precisión aceptable. En el IIE se estudia un modelo de predicción de radiación solar para adaptarlo a las condiciones locales de México. Se usa en estudios de simulación del funcionamiento de plantas helioeléctricas y otros sistemas solares.

Introducción

La energía solar (radiación solar) es abundante, confiable y gratuita. El Sol ha entregado su energía sobre la Tierra por más de 4 000 millones de años y continuará así por varios miles de millones de años más. La inconstancia del Sol es regional y estacional; no es arbitraria ni política; por tanto, su utilización puede predecirse y planearse. En México, existe el recurso solar en forma abundante, ya que estudios realizados en el país sobre la cantidad de radiación solar aprovechable muestran que este recurso es grande, con una radiación solar promedio observada de las más altas del mundo, principalmente por la ubicación que tiene nuestro territorio nacional en el globo terrestre. Además, en nuestro país existen grandes extensiones de superficies con zonas desérticas y semidesérticas y está posibilitada la captación de radiación solar a gran escala, sin originar problemas respecto a la utilización de superficies donde se instalarían los diferentes sistemas solares como pueden ser plantas helioeléctricas de receptor central, fotovoltaicas y/o estanques solares.

Por ello, el conocimiento del recurso solar local es determinante para el dimensionamiento de los diferentes sistemas solares. Existen dos vías de conocimiento, la primera es realizar mediciones de radiación solar durante un tiempo razonable, de uno a tres años mínimo, y la segunda es predecir los valores de radiación solar con modelos matemáticos. Puede resultar mejor la primera opción; sin embargo, el tiempo necesario la hace inoperante, pues no siempre se podrá disponer de los instrumentos de medición requeridos. La segunda, permite efectuar rápidamente los cálculos, y con suficientes datos de variables meteorológicas es posible predecir con precisiones adecuadas los valores de radiación solar. Estas características despertaron el interés por conocer la radiación solar cuantitativamente a través de modelos matemáticos en países donde no se cuenta con suficientes datos derivados de mediciones de radiación solar, tal es el caso de México. Diferentes investigadores han propuesto varios modelos matemáticos de predicción de radiación solar en sus diferentes tipos (directa, difusa y global). Algunos de estos modelos son los de Allen,¹ Atwaler y Ball,² Majumdar,³

Watt,⁴ Douglas V. Hoyt,⁵ Hottel,⁶ S. Barbaro,⁷ etc. La mayor parte de los modelos considera un cielo claro y limpio y han sido validados con datos experimentales en algunos lugares de estudio. La complejidad matemática de los modelos depende del tipo y número de parámetros que involucren. Estos parámetros dependen de los factores astronómicos, geográficos, geométricos, físicos o atmosféricos.^{8,9} La selección de los modelos más viables debe realizarse considerando sus criterios y su complejidad matemática, así como la instrumentación necesaria para medir los diferentes tipos de parámetros o variables que involucre el modelo. De esto dependerá la precisión esperada. (Si se necesita un análisis detallado de estos modelos y de otros más pueden consultarse en las Refs. 4 y 8.)

Modelo seleccionado

Para adaptar un modelo de predicción de radiación solar a otros lugares diferentes a donde se desarrolló, generalmente es necesario modificar algunos de sus parámetros. El modelo aquí presentado es el primero que se estudia en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y predice radiación solar directa de incidencia normal. Se utiliza en estudios de simulación del funcionamiento de las plantas helioeléctricas de receptor central y fotovoltaicas⁹ y de otros sistemas solares. Se seleccionó el modelo de C.W. Allen por las razones:

1. Predice radiación solar directa de incidencia normal instantánea.
2. Es relativamente sencillo implantarse.
3. Requiere de variables meteorológicas que pueden obtenerse fácilmente.
4. Fue validado contra mediciones de varios años.

El modelo original de predicción instantánea de radiación solar directa de incidencia normal propuesto por Allen se expresa mediante la ecuación:

$$RSDN = I_0 \left(1 - 0.263 \left(\frac{W + 0.272}{W + 0.500} \right) \cdot M^{\frac{0.267 \cdot W + 1.153}{W + 0.788}} \right) W/m^2$$

donde:

$$M = Mr \frac{P_b}{P_o}$$

$$Mr = \left(\left(\frac{R}{H} \sin \theta_e \right)^2 + 2 \frac{R}{H} + 1 \right)^{1/2} \frac{R}{H} \sin \theta_e$$

$$\theta_e = \sin^{-1} (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \tau)$$

$$\delta = 23.45^\circ \sin 360 \left(\frac{284 + N}{365} \right)$$

$$\tau = |12 - Ts| 15$$

Siendo RSDN la radiación solar directa normal; I_0 , la constante solar ($1\,353\text{ W/m}^2$); W , el vapor de agua condensable contenido en la atmósfera (cm); M , las masas de aire locales; Mr , las masas de aire relativas al nivel del mar; P_b , la presión atmosférica local (mmHg); P_o , la presión atmosférica a nivel del mar 760 mmHg; R , el radio medio de la Tierra 6 370 km; H , profundidad del aire (8.430 km a 15°C) requeridos para producir una P_o de 760 mmHg; θ_e , el ángulo de elevación solar; ϕ , la latitud local; δ , la declinación solar; τ , el ángulo horario;⁸ N , el día del año solar de 1 a 365 días y Ts , la hora del día en tiempo solar.

Descripción del modelo y estimación de los parámetros

La ecuación original de Allen puede representarse como:

$$Z = P_1 \cdot M^{P_2}$$

donde:

$$Z = 1 - \frac{RSDN}{I_0}$$

$$P_1 = K_1 \left(\frac{W + 0.272}{W + 0.500} \right)$$

$$P_2 = K_2 \left(\frac{W + 1.153}{W + 0.788} \right)$$

que puede linealizarse como:

$$Y = a + bX$$

donde:

$$Y = \text{Log } Z$$

$$X = \text{Log } M$$

$$a = \text{Log } P_1$$

$$b = P_2$$

Para la obtención de los parámetros de K1 y K2 se aplica el método de regresión lineal, obteniéndose:

$$K1 = \frac{\text{antilog}(a)}{\left(\frac{W + 0.272}{W + 0.500}\right)}$$

$$K2 = \frac{(b)}{\left(\frac{W + 1.153}{W + 0.788}\right)}$$

a y b son los valores estimados de la pendiente y la ordenada al origen.

Modelo de Allen modificado

Datos meteorológicos locales:

- lugar: Cuernavaca, Morelos (Palmira, IIE)
- latitud (ϕ) = 18.88° norte
- altitud (A) = 1 350.0 metros sobre el nivel del mar
- longitud local = 99.23° este
- longitud de referencia = 90° este

El modelo de Allen requiere de Pb y de W. El cuadro 1 muestra los datos mensuales de Pb: humedad relativa, Hr, y temperatura, T, obtenidos del *Atlas del agua de la República Mexicana*¹⁰ y del Servicio Meteorológico Nacional;¹¹ se proporcionan también los datos de la presión parcial del vapor de agua Pw contenido en la atmósfera y de la presión de saturación Ps. W se calcula como:

$$W = 01.7 Pw$$

$$Pw = Hr \cdot Ps$$

$$Ps = \text{Exp} \left(\frac{5416}{To} + 26.23 \right) \text{ N/m}^2$$

CUADRO 1

Variables meteorológicas medidas en Cuernavaca, Morelos, Palmira (IIE) en 1980

Mes	Pb (mmHg)	Hr (%)	T (°C)	Ps (N/m ²)	PW (mb)	W (cm)
Enero	641.86	45	18.9	2177.35	9.7967	1.665
Febrero	641.86	40	20.2	2363.84	9.4542	1.607
Marzo	641.86	30	22.2	2678.62	8.0346	1.365
Abril	641.86	40	23.4	2884.92	11.5388	1.961
Mayo	641.86	40	23.2	2849.59	11.3975	1.937
Junio	641.86	50	21.9	2629.14	13.1450	2.234
Julio	641.86	50	20.9	2470.04	12.3492	2.099
Agosto	641.86	50	20.8	2454.61	12.2719	2.086
Septiembre	641.86	60	20.2	2363.84	14.1819	2.416
Octubre	641.86	50	19.9	2319.58	11.5975	1.917
Noviembre	641.86	40	19.8	2305.00	9.2129	1.567
Diciembre	641.86	45	19.1	2205.16	9.9220	1.686

Pb, Presión atmosférica local; Hr, humedad relativa; T, temperatura; Ps, presión de saturación del vapor de agua; Pw, presión parcial del vapor de agua, y W, vapor de agua condensable contenido en la atmósfera.

Ps debe sustituirse en mb y Hr en fracciones de por ciento To en grados Kelvin a partir de, T, temperatura.

En el IIE se realizaron mediciones cada hora de radiación solar directa y global, y de algunas variables meteorológicas como temperatura y humedad durante 8 meses de 1980 a 1981, en algunos días sólo se realizaron mediciones matutinas y en otros todo el día, principalmente de radiación solar. El cuadro 2 muestra los datos medidos de radiación solar directa de mediodías típicos.

CUADRO 2

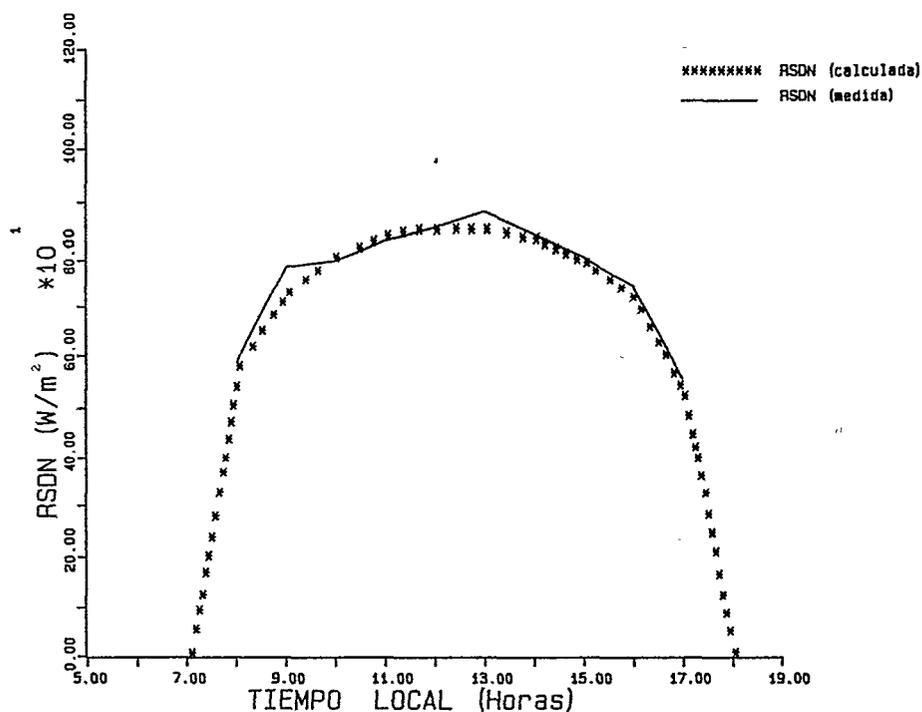
Valores de radiación solar directa normal medidos en Cuernavaca, Morelos, Palmira (IIE) en 1980

Radiación solar directa normal (RSDN) (W/m ²)								
Hora	4 de jul. 1980	21 de ago. 1980	19 de sep. 1980	2 de oct. 1980	26 de nov. 1980	19 de dic. 1980	7 de ene. 1981	4 de feb. 1981
8:00	735.85	721.02	763.42	636.19	587.41	534.39	286.28	381.71
9:00	829.16	816.44	805.84	721.02	790.99	727.37	564.08	695.56
10:00	850.37	848.25	831.28	827.04	797.35	810.08	687.08	776.15
11:00	890.66	858.85	827.05	867.45	835.53	860.47	778.27	928.83
12:00	850.37	869.46	844.01	805.84	858.85	873.70	801.60	907.63

Se muestra un medio día típico de cada mes con condiciones de cielo despejado (claro y limpio).

FIGURA 1

Comparación de radiación solar directa normal (RSDN) medida y calculada por el modelo de Allen para un día con cielo despejado claro y limpio



Con los datos de radiación solar y meteorológicos disponibles, se aplicó al modelo de Allen el análisis de regresión lineal, obteniendo los parámetros de $K1 = 0.406694$ y $K2 = 0.326598$ y un coeficiente de regresión lineal de $CRL = 0.954$ con una desviación estándar de 0.041 para $K1$ y una desviación estándar de 0.084 para $K2$.

Validación del modelo

Para los días diferentes a los seleccionados en la adaptación de los parámetros del modelo, se compararon las mediciones de RSDN contra las predicciones del modelo modificado. La figura 1 muestra un ejemplo gráfico de los valores de RSDN medida y calculada por el modelo modificado y el error promedio diario en este caso es de -3.9% . En el cuadro 3 se muestran los promedios mensuales y anuales de la RSDN medida y calculada, así como el error promedio mensual y anual. Se puede observar que el error promedio anual es de $+1.366\%$ con una desviación estándar del error de $\pm 3.54\%$. Los resultados obtenidos son bastante aceptables si consideramos que el pirheliómetro (instrumento con que se mide la RSDN) tiene una precisión de $\pm 5\%$, especificada por el fabricante. Es decir, no puede esperarse una mejora notable del error promedio de medición al readaptar el modelo con un mayor número de mediciones pues su

valor es del mismo orden que el de la precisión de medición. Quizá lo que sea posible mejorar es el error instantáneo pues se nota mayor error en las primeras y últimas horas del día que en las horas cercanas al mediodía.

CUADRO 3

Promedios mensuales y anuales de radiación solar directa normal (RSDN) medidos y calculados (por el modelo de Allen) en el lugar de experimentación: Cuernavaca, Morelos, Palmira (IIE) en 1980

Fecha	Promedio mensual de RSDN medida (W/m^2)	Promedio mensual de RSDN calculada (W/m^2)	Error (%)
Julio de 1980	808.189	819.537	+ 1.40
Agosto de 1980	813.686	807.081	- 0.81
Septiembre de 1980	768.728	795.255	+ 3.45
Octubre de 1980	778.862	792.476	+ 1.74
Noviembre de 1980	796.579	745.198	- 6.45
Diciembre de 1980	696.698	730.460	+ 4.84
Enero de 1981	729.214	737.460	+ 1.15
Febrero de 1981	723.097	763.691	+ 5.61
Promedio anual	764.382	773.718	+ 1.36

Conclusiones

Se presentó una metodología para adaptar un modelo matemático de predicción de radiación solar directa de incidencia normal a condiciones locales, esta metodología es una regresión lineal simple. Es importante mencionar que esta metodología puede utilizarse para la adaptación de parámetros de otros modelos de predicción de radiación solar, siempre y cuando pueda obtenerse una forma lineal del mismo. Los resultados obtenidos por el modelo modificado ya validado (Allen) son bastante satisfactorios y alentadores, pese a los pocos datos de radiación solar directa normal disponibles, pues se obtuvo un error promedio anual de +1.366% con una desviación estándar de $\pm 3.54\%$. Además la precisión del pirheliómetro con que se realizaron las mediciones de RSDN es de $\pm 5\%$, lo que indica que los resultados obtenidos por el modelo adaptado, al estar dentro de este intervalo, no son imprecisos, ya que difícilmente un modelo podrá predecir mejor que la precisión del instrumento. Para mejorar aún más el modelo se recomienda:

- Obtener datos de radiación solar directa normal continuos durante todo el año y por varios años, de tal modo que la validación estadística sea más confiable.

- Realizar mediciones precisas de presión atmosférica local, temperatura y humedad para conocer el vapor de agua condensable contenido en la atmósfera (W).

Referencias

1. American Section International Solar Energy Society and Solar Energy Society of Canada Inc., *Joint Conference: Sharing the Sun*, vol. 1, 1976.
2. Atwater, M.A. y J.T. Ball, "A Numerical Solar Radiation Model based on Standar Meteorological Observations", *Solar Energy*, vol. 21, núm. 13, pp. 163-170, 1978.
3. Majundar, N.C., B.L. Mathur y S.B. Kaushik, "Prediction of Direct Solar Radiation for Low Atmospheric Turbidity", *Solar Energy*, vol. 13, núm. 3, pp. 383-394, 1972.
4. Bird, Richard y Roland L. Hulstrom, *Direct Insolation Model*, Solar Energy Research Institute, 1980 (SERI/TR-335-334).
5. Hoyt, Douglas V., "A Model the Calculation of Solar Global Insolation", *Solar Energy*, vol. 21, núm. 1, pp. 27-35, 1978.
6. Hottel, Hoyt C., "A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation through Clear Atmospheres", *Solar Energy*, vol. 18, núm. 2, pp. 129-134, 1976.
7. Barbaro, S., S. Coppolino, C. Leone y E. Sinagra, "An Atmospheric Model for Computing Direct and Diffuse Solar Radiation", *Solar Energy*, vol. 22, núm. 2, pp. 225-278, 1979.
8. Zambrano, L., *Análisis de modelos matemáticos de predicción de radiación solar* (tesis profesional), ENEP-Aragón, UNAM, México, 1982.
9. Gleason, E., C. Ramos y M. Acosta, *Informe Anual 1980*, "Sistema fotovoltaico", (vol. 1) y "Sistemas de receptor central" (vol. 2), (IIE/FE-A6/1344/2).
10. Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Atlas del agua de la República Mexicana*, 1976.
11. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Dirección General de Geografía y Meteorología del Servicio Meteorológico Nacional, *Normales climatológicas*, 1976.



Lorenzo Zambrano

En 1980, terminó la licenciatura en ingeniería mecánica y eléctrica en la Escuela Nacional de Estudios Profesionales-Aragón, de la UNAM. En 1981, ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas como investigador del Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía y, actualmente, forma parte del Grupo de Estudios Oceanográficos, del Departamento de Energía Nuclear, donde colabora en el campo de hidrodinámica computacional, desarrollando estudios sobre el análisis numérico de bases de datos vectoriales.

mx 9800256

Ventajas de la técnica sintética para realizar pruebas de corto circuito a interruptores

Henry Sibilski *
Rubén Ochoa Vivanco **

En este artículo se describe el principio de operación de la prueba sintética; específicamente del circuito de inyección de corriente en paralelo. Se destaca su utilización en la investigación y desarrollo de nuevos modelos de interruptores y sus amplias posibilidades en cuanto a características de prueba.

Asimismo, se describen las diferentes pruebas que pueden realizarse mediante la técnica sintética.

Por último, se destaca la importancia de las pruebas sintéticas para el desarrollo de tecnología propia en el área de equipos de interrupción, y se hace notar que en países desarrollados, esta técnica es práctica común.

Introducción

Cada día, con más frecuencia, se recurre a la técnica sintética para efectuar pruebas a equipos de interrupción, cuya capacidad interruptiva supera la posibilidad de cualquier laboratorio de corto circuito.

Asimismo, paulatinamente se generaliza el empleo de pequeños laboratorios sintéticos para realizar investigación y desarrollo de equipos de interrupción, estudios profundos de física del arco y experimentación de equipo que se utilizará en laboratorios sintéticos de alta tensión.

* En 1954, se recibió de ingeniero eléctrico, en la Universidad Técnica de Gdansk; obtuvo su maestría en ciencias, en la Universidad Técnica de Varsovia, y el doctorado en el Instituto Electrotécnico de Varsovia. En este mismo instituto realizó estudios sobre métodos de pruebas sintéticas de 1975 a 1977. Ha publicado más de 30 artículos científicos y técnicos en diferentes revistas especializadas y un libro editado por la Academia Polaca de Ciencia. Actualmente, trabaja en el Instituto Electrotécnico de Varsovia.

Actualmente, diversos grupos de investigadores de diferentes organizaciones mundiales, tales como CIGRE, IEC y ANSI, llevan a cabo estudios en torno a la técnica sintética, depurando las técnicas de prueba, proponiendo otros circuitos que cubran nuevos requerimientos, etcétera.

Técnica de la prueba sintética

Durante los últimos años, se ha incrementado considerablemente el interés por las pruebas sintéticas en media y alta tensión, por las grandes ventajas que ofrecen. La técnica sintética dismi-

** Estudió la licenciatura en ingeniería mecánica y eléctrica, en la Universidad Nacional Autónoma de México, y la maestría en ingeniería eléctrica de potencia, en el Rensselaer Polytechnic Institute, de Estados Unidos. Además, ha tomado diversos cursos sobre diseño en equipos de interrupción y de plantas generadoras. Tiene amplia experiencia profesional y docente. En 1981, ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas, donde colabora como investigador en la División de Equipos.

nuye las necesidades de la alimentación de potencia de siete a diez veces de la requerida en una instalación de prueba directa; sin embargo, aumenta la complejidad del sistema de adquisición de datos y de control de la prueba, por lo que es necesario tener un gran conocimiento del fenómeno de extinción y de los transitorios del sistema. Esta técnica permite conocer con profundidad, la física del arco en la cámara de extinción, así como los esfuerzos que se producen con diferentes condiciones de corriente y tensión.

La prueba sintética se basa en el hecho de que el fenómeno de interrupción se presenta en dos periodos subsecuentes. El primero, de alta corriente y baja tensión, se refiere al momento de circulación de corriente de corto circuito, durante el cual sólo se requerirá suficiente potencia para alimentar el arco que se presenta en el equipo de interrupción; por esta razón, se requiere una fuente hasta diez veces más pequeña que en la prueba directa, esto depende del medio de extinción. El segundo, se da en el momento de interrupción, presentándose la tensión transitoria de restablecimiento, etapa en la que son necesarias baja corriente y alta tensión. El problema radica en definir la equivalencia entre las pruebas directas y las sintéticas. Esta equivalencia la determinan los requerimientos de la publicación IEC-427 (que actualmente es una recomendación) y CIGRE WG 13-04 (véanse las Refs. 2, 3 y 4).

En las últimas reuniones de los grupos de trabajo de IEC y CIGRE se han analizado nuevos requerimientos para interruptores de media y alta tensión. Dichas modificaciones se publicarán próximamente.

Estos nuevos requerimientos se deben básicamente a:

- El incremento de capacidad interruptiva.
- Especificación de nuevas pruebas, resultado de la experiencia de las pruebas sintéticas, con base en investigaciones teóricas.
- Desarrollo de nuevos equipos que por sus características sea necesario modificar sus requerimientos de pruebas (interruptores más rápidos, con mayor periodo sin mantenimiento, etcétera).

Una importante ventaja en la aplicación del circuito sintético es que al someter a prueba un modelo muy costoso, no se dañará a pesar de que falle, porque el interruptor auxiliar desconecta el circuito de corriente en el cruce de la corriente por cero, donde se espera la interrupción y sólo queda conectada la fuente de tensión que provocará la falla; si es el caso, la energía es mucho menor, incapaz de destruir dicho interruptor; por tal razón, el método sintético se utiliza en el desarrollo de interruptores.

Procedimiento de prueba sintética

Descripción del circuito

Existen varios métodos de prueba sintética; el más común en los laboratorios del mundo es el circuito Weil-inyección de corrien-

te. En este método, la corriente de corto circuito la suministra un generador o bien, la red eléctrica, y la tensión transitoria de restablecimiento (TTR), un banco de capacitores.

El circuito de corriente (véase la Fig. 1) consta básicamente de un interruptor de respaldo (I_r) para proteger la instalación; el interruptor de sincronización (I_s) para ordenar el cierre del circuito, controlando la asimetría de la corriente de prueba; un transformador de corto circuito (T_{cc}) que tiene como función variar la tensión de prueba, capacitores (C_p), y resistencias (R_p) con objeto de amortiguar la tensión transitoria de restablecimiento del circuito de corriente, y así proteger el transformador de sobretensiones peligrosas. En algunos casos, se utiliza el circuito de reignición (UP) con objeto de prolongar la corriente un semiciclo más, esto para el caso de interruptores de velocidad baja de interrupción. El interruptor auxiliar (I_a), mostrado en el circuito, muy importante en la operación de la prueba sintética y su accionamiento, es simultáneo al del interruptor bajo prueba (I_p). Además, se requiere un "shunt" para medir la corriente (M) y detectar el momento adecuado para disparar el trigatrón (T) y que la sincronización sea adecuada.

El circuito de tensión consta básicamente de un banco principal de capacitores (C_h) que almacenará la energía necesaria para producir la tensión transitoria de restablecimiento.

Este banco se carga, por el generador (G) antes de iniciar la prueba. La inductancia (L_h) controla la frecuencia y la magnitud de la corriente de inyección. El trigatrón (T) tiene como función disparar el circuito de tensión en un tiempo predeterminado que será habilitado por la señal del "shunt" para obtener una sincronización adecuada. Finalmente, el banco de capacitores (C_1) y la resistencia (R_1) controlará la tensión transitoria de restablecimiento.

Secuencia de prueba

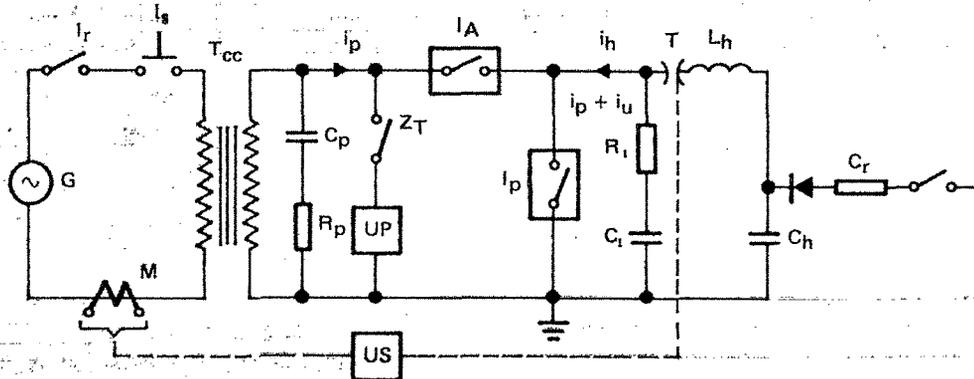
Al realizar una prueba sintética en el circuito ya descrito (véase la Fig. 1), se carga con corriente directa el banco de capacitores (C_h) a un cierto nivel de tensión; se cierra el interruptor bajo prueba (I_p), al igual que el interruptor auxiliar (I_A); se ajusta la tensión de prueba en el transformador; se ajustan los valores del circuito a valores previamente calculados; se abre el interruptor de sincronización (I_s), y se cierra el interruptor de respaldo (I_r). En este momento el circuito está preparado para iniciar la prueba.

La prueba se realiza a partir de este momento a través de un programador de secuencias ajustado previamente, que se encargará de realizar todos los eventos.

La primera acción que efectúa es cerrar el interruptor de sincronización (I_s) en un determinado instante con objeto de controlar la asimetría de la corriente. Después de transcurridos algunos ciclos, se ordena abrir el interruptor bajo prueba (I_p) y el interruptor auxiliar (I_A), en el tiempo T_1 (véase la Fig. 2), se dispara el trigatrón (T) inyectando una cierta corriente que se suma a la corriente de 60 Hz; esta corriente es controlada en magnitud y frecuencia por C_h y L_h . Comúnmente, esta frecuencia se encuentra entre 250 y 1 000 hertz y la magnitud es del orden de 10% del pico de la corriente de prueba. Esta corriente

FIGURA 1

Circuito prueba sintética

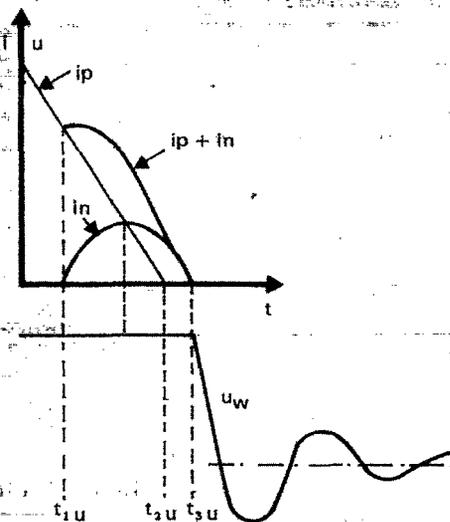


- G = Generador de corto circuito.
- I_r = Interruptor de respaldo.
- I_s = Interruptor de sincronización.
- T_{cc} = Transformador de corto circuito.
- C_pR_p = Control de TTR del circuito de corriente.
- U_p = Circuito de reignición.
- I_A = Interruptor auxiliar.
- I_p = Interruptor bajo prueba.
- R₁C₁ = Control de la TTR del circuito de tensión.

- T = Trigatrón.
- L_h = Inductancia control de la frecuencia de inyección.
- C_h = Banco principal de capacitores.
- G₁ = Fuente de corriente directa.
- C_r = Resistencia protección del generador de corriente directa.
- i_p = Corriente de corto circuito.
- i_n = Corriente de inyección.
- M = "Shun" medidor de corriente.

FIGURA 2

Corriente de inyección y de 60 hertz



- t_{1u} = Momento del disparo del trigatrón.
- t_{2u} = Momento de interrupción del interruptor auxiliar.
- t_{3u} = Momento de interrupción del interruptor bajo prueba.
- i_p = Corriente de prueba a 60 Hz.
- i_n = Corriente de inyección.

inyectada provoca que el interruptor auxiliar (I_A) interrumpa la corriente de 60 Hz en el tiempo T₂ (véase la Fig. 2) y se desconecte el circuito de corriente, dejando el interruptor bajo prueba (I_p) conectado exclusivamente al circuito de tensión. En el tiempo T₃ (véase la Fig. 2), la corriente de inyección se interrumpe y la tensión transitoria de restablecimiento se presenta instantáneamente sin retrasos, condición fundamental para que la prueba tenga validéz.

Durante la operación de interrupción, los esfuerzos producidos en el interruptor bajo prueba pueden dividirse en tres etapas:

- De alta corriente
- De interacción
- De esfuerzos dieléctricos.

Periodo de alta corriente

Durante el periodo de alta corriente es necesario controlar la amplitud y duración de la corriente con objeto de suministrar energía suficiente al arco durante todo el periodo de arqueo.

Debido a que la tensión del circuito de corriente es relativamente baja en comparación con la usada en la prueba directa,

la deformación de la onda de corriente puede resultar mayor y calcularse utilizando la ecuación:

$$i_1(t) = I | \text{sen}wt - m_1(t - T) |$$

$$m_1 = \frac{V_{\text{arc}}}{V_{\text{cc}}}$$

$$A = m_1(t - T)$$

donde:

V_{arc} = Tensión de arco.

V_{cc} = Tensión circuito de corriente.

T = Momento en que los contactos se separan.

A = Deformación de la corriente.

Con esta ecuación es posible determinar la deformación de la corriente en prueba directa o sintética, y puede controlarse con el uso adecuado de los parámetros componentes del circuito de prueba. Cuando el tiempo de arqueo es mayor que un semiciclo de corriente, el cálculo debe extenderse y la deformación del último semiciclo se determinará con la ecuación:

$$i_2(t) = I \text{sen}wt_2 - \text{sen}wt_1 + m_2w(t_2 - t_1)$$

$$m_2 = \frac{V_{\text{arc}}}{V_{\text{cc}}}$$

donde:

t_1 = Cruce por cero después de la separación de contactos.

t_2 = Segundo cruce por cero.

m_2 = Valor relativo de la tensión de arco en el segundo cruce por cero.

Periodo de interacción

Este periodo es el más delicado para la prueba sintética, ya que de la apropiada interpretación de los fenómenos que suceden en este punto dependerá la aprobación del interruptor bajo prueba. Las normas expresan los requerimientos para la prueba sintética, debido a que al efectuar una prueba a menor tensión será necesario asegurar que las condiciones de energía se satisfagan. La inyección de corriente cubre este periodo, por lo que será necesario seleccionar adecuadamente los elementos usados en el circuito de tensión; la selección de la frecuencia ajustará la pendiente de la corriente de inyección por medio de la reactancia (L_h) y la capacitancia (C_h).

A lo largo de este periodo, suceden eventos decisivos en la cámara interruptiva, que deberán estudiarse y analizarse cuida-

dosamente durante las diferentes condiciones de prueba. La interacción entre la tensión de arco, el medio aislante y el circuito de corriente se intensifica cerca del cruce por cero, cuando la conductividad del arco decrece y se incrementan los esfuerzos dieléctricos entre los contactos. Una vez que se ha interrumpido la corriente, se inicia una carrera entre la recuperación de la rigidez dieléctrica del medio aislante que está en función del enfriamiento de dicho gas y la tensión transitoria de restablecimiento que significa un incremento de la corriente de posarco, presentándose una situación de energía aplicada contra una energía de disipación. En caso que la energía de disipación no sea suficiente, se presentará una reignición, lo que significa que el interruptor falló. En caso de la prueba sintética será necesario analizar las condiciones de prueba del interruptor cuando esto suceda, por ejemplo, la posición de los contactos, la magnitud del cambio significativo de la tensión de arco, la pendiente real de la tensión transitoria de restablecimiento, el semiciclo en que se inició el arco, etcétera.

La duración de este periodo de interacción varía de interruptor a interruptor, en términos generales es de 100 microsegundos.

Periodo de esfuerzos dieléctricos

La tensión transitoria de restablecimiento (TTR) está dada por las normas de la prueba directa, que deberán cubrirse en la prueba sintética.

La TTR para la prueba sintética se expresa:6

$$V(t) = V_h \left[\frac{\text{sen}wt}{a} e^{-\alpha t} \frac{(C_h + 2C_1)}{C_h + C_1} - \frac{C_h}{C_h + C_1} e^{-\alpha t} \coswt + \frac{C_1}{C_h + C_1} \right]$$

donde:

$$a = \frac{w}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L_h} \quad w = \frac{1}{L_h C} = \frac{R^2}{4L_h^2}$$

V_h = Tensión de carga del banco de capacitores.

w = Frecuencia natural del sistema.

C_h = Capacitancia principal.

C_1 = Capacitancia control de la TTR.

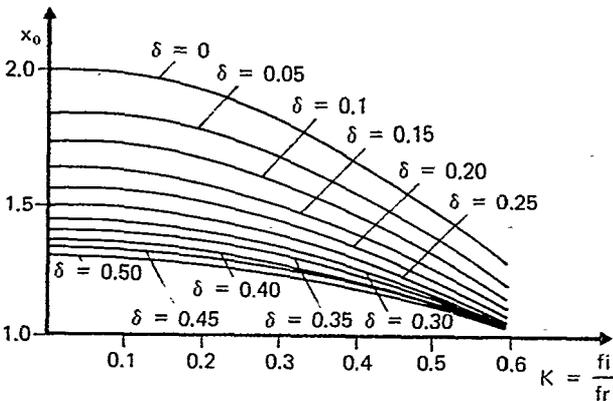
La diferencia de la TTR en prueba sintética y la prueba directa radica principalmente en la inclusión del banco principal

de capacitores (C_h) y en la compensación derivada de la corriente de inyección (i_n).

Para seleccionar los parámetros con el fin de satisfacer una TTR y una cierta frecuencia de inyección, puede partirse de la interacción del factor máximo de oscilación con la relación de frecuencia de inyección y frecuencia de la TTR (véase la Fig. 3). En esta figura, en el eje de las ordenadas está el factor de oscilación que teóricamente alcanza dos veces la tensión nominal; sin embargo, con valores de norma sólo se requiere 1.4. En el eje de las abscisas, se representa la relación de la frecuencia de inyección y frecuencia de la TTR (f_i/f_r). Puede observarse que cuando la frecuencia de la TTR es mucho mayor que la frecuencia de inyección de corriente, es despreciable el amortiguamiento de la TTR, y cuando la frecuencia de la TTR decrece el amortiguamiento aumenta. Este efecto puede compensarse aumentando la carga del banco principal de capacitores. Para obtener una aproximación de los parámetros que cubran la TTR normalizada, puede considerarse un interruptor ideal (interrumpe la corriente en un cero natural, sin tensión de arco ni corriente de posarco). En la situación real será necesario considerar los efectos de la operación del interruptor sobre la tensión y corriente cerca del cruce por cero. Por esta razón, será necesario compensar estos efectos, aumentando la tensión del circuito de corriente, disminuyendo la reactancia del circuito de tensión, etcétera.

FIGURA 3

Factor de pico de la TTR $X_0 = f(f_i/f_r)$ como función de la relación de frecuencia de inyección con frecuencia de la TTR



$$\text{Factor de amortiguamiento } \delta = \frac{R}{2 \frac{L}{C}}$$

Aplicación del circuito de pruebas sintéticas

No es posible realizar desarrollos de interruptores sin un laboratorio de potencia porque:

- Un desarrollo requiere de gran cantidad de pruebas.
- Las condiciones de prueba son muy variadas, tanto las normalizadas (IEC 56) como las especiales para comprobar ciertas partes o materiales.
- Los esfuerzos de la cámara interruptiva deben variar en una gama amplia.

El circuito sintético ofrece grandes ventajas para cubrir estos requerimientos. El hecho de tener dos circuitos independientes y manejar menor potencia, permite ajustar los esfuerzos en la cámara interruptiva a voluntad, de una forma económica y no destructiva. En el circuito sintético es posible realizar las pruebas de:

- Corto circuito en las terminales con dos o cuatro parámetros.
- Falla de línea corta.
- Fuera de fase.
- Cierre contra corto circuito.
- Interrupción de corriente asimétrica.
- Es posible controlar la TTRI (tensión transitoria de restablecimiento inicial).

Estas pruebas son los requerimientos fijados por las normas (ANSI, IEC, etc.) que un interruptor debe cumplir. Sin embargo, existe un extenso número de otras pruebas que son de gran utilidad en la etapa de diseño y de sustitución de partes.

Asimismo, ofrecen gran flexibilidad para aplicar diferentes TTR, lo que permite simular condiciones especiales, tales como interruptores alimentando hornos, interruptores enlazando un generador de una planta geotérmica con la línea, etcétera.

Es posible utilizar este circuito en la comprobación del diseño de las toberas para dirigir el flujo en los interruptores de gas. También será muy útil para obtener la aleación adecuada para los contactos en los interruptores de vacío.

Interrupción de falla en las terminales del interruptor

Esta condición es la que maneja máxima corriente. Con la TTR que fijan las normas, en las pruebas sintéticas es importante asegurar que el momento de interrupción se presente en el cruce por cero de manera similar al de la prueba directa. En caso de interruptores lentos de tiempo de arqueo largo, es necesario disponer de un elemento adicional para prolongar el arco. Esto se realiza modificando la pendiente de la corriente en los cruces por cero en que no se desea se interrumpa la corriente.

Interrupción de línea corta

Esta falla se presenta a una cierta distancia del interruptor (1 a 2 kilómetros), produciendo una TTR triangular de alta frecuencia como se muestra en la figura 4. En la prueba sintética se utiliza lo que se conoce como línea artificial, que es una serie de capacitancias, resistencias e inductancias (véase la Fig. 5), simulando la línea corta. Se han realizado programas de cómputo que permiten el cálculo para esta prueba.^{6,7} La TTR esperada se puede observar en la figura 6.

Fuera de fases

Esta falla se presenta en interruptores de enlace entre dos sistemas o un interruptor que protegen unidades generadoras. Las condiciones de esta prueba, con respecto a la corriente, es 25% de la capacidad interruptiva y la tensión para un sistema con el neutro aislado $U_c = 2.5a$. Estas pruebas se aplicaban a interruptores de alta tensión; sin embargo, en la última revisión de las normas IEC-16-2, modificación 3, se incluye para interruptores de media tensión entre 3.6 y 72.5 kilovolts.

Interrupción de corriente asimétrica

En el caso de las pruebas directas no se requiere ajustar los parámetros, ya que la forma de la TTR se ajusta al momento que la corriente sea interrumpida. Si la corriente se interrumpe después del semiciclo mayor (véase la Fig. 7), la TTR se superpone a la tensión decreciente del sistema, y en caso que la interrupción suceda después del semiciclo pequeño, la TTR se superpone a la tensión creciente del sistema, en ambos casos la situación de la TTR es diferente; por lo que será necesario calcular la TTR y ajustar el circuito para cada uno de los dos puntos, considerando que la pendiente de la corriente cerca del cero es diferente.

FIGURA 4

Circuito para la prueba de línea corta sintética

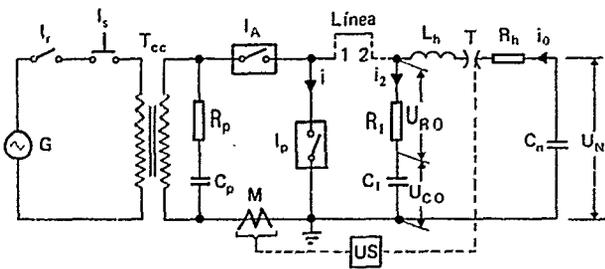


FIGURA 5

Línea artificial para ajustar TTR esperada

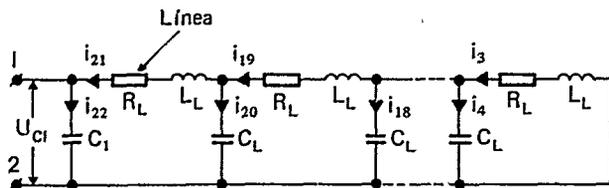


FIGURA 6

Tensión transitoria de restablecimiento para una interrupción de línea corta

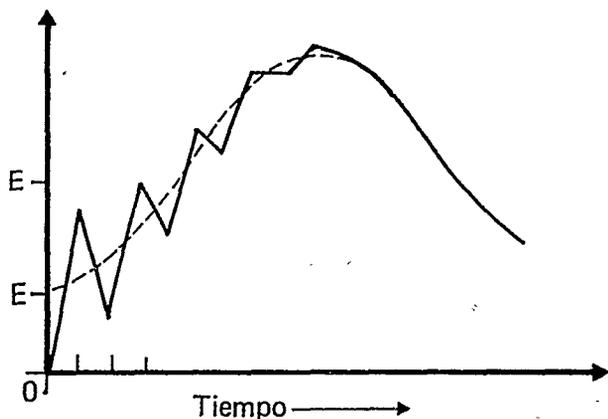
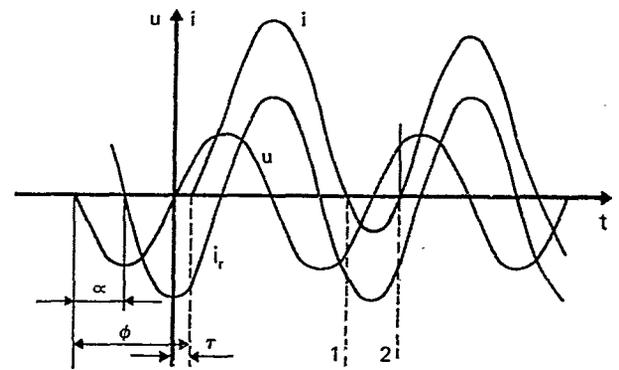


FIGURA 7

Interrupción de corriente asimétrica



1. Interrupción después del semiciclo mayor.
2. Interrupción después del semiciclo menor.

El grupo CIGRE WG-13-04, actualmente estudia diversos métodos de este cálculo.

Conclusiones

El circuito sintético es muy útil para realizar pruebas a interruptores de alta tensión de alta capacidad interruptiva, para las que las capacidades de los laboratorios no son suficientes. Asimismo, el método sintético nos permite realizar una serie de pruebas de prototipo que soporten el desarrollo de interruptores o de sustitución de materiales en interruptores importados. El manejo de baja potencia permite realizar modificaciones a los parámetros de prueba con cierta facilidad. Sobre todo, estas pruebas son no destructivas, obteniendo experiencia de los errores.

Actualmente, todos los laboratorios del mundo utilizan el método sintético para realizar desarrollos e incluso para probar sus interruptores; entre éstos pueden mencionarse Fuji Electric, KEMA, CESI e IREQ.

Bibliografía

1. IEC Publ. 56-2, Publ. 56-4.
2. CIGRE Study Committee No. 13 WG 13-04, "Synthetic Make Test Requirements. Circuit Breaker not Titted with Making Resistors", *Electra*, núm. 38, ene. de 1975.
3. CIGRE Study Committee No. 13 WG 13-04, "Synthetic Testing of Autoreclosing Duties for Circuit Breaker not Equipped with Parallel Resistor", *Electra*, núm. 54, oct. de 1977.
4. CIGRE Study Committee No. 12 13-04, "Synthetic Make Test Requirements. Circuit Breaker Titted Making Resistor", *Electra*, núm. 54, oct. de 1977.
5. Sibilski, H., "Über die Aquivalenz Zwischen Synthetischen und directen Prutungen. IPH", *Mitteilungen*, núm. 18, 1977.
6. Sibilski, H., *Direct and Synthetic Test of High Voltage Circuit Breaker* (in Polish), PWIV, 1983.
7. Sibilski, H., "Breaking of Short Line Fault Current by Means of Resistor Shuntes Circuit Breaker", documento presentado en Current Zero Club Meeting y publicado en *Proceeding of Electra Institute, IEL*, núm. 103, 1977.
8. IEC Publ. 427. 1973.
9. CIGRE 13-15 1970. Session 24 August-2 September. Recent Experience on the Evaluation of the Equivalence between Direct Full Power and Synthetic Test on H.V. Circuit-breaker. International Conference Session, 1970.
10. Consagrande, G., "La prova sintetica degli interruttori per alta tensione", *Estratto da «L'Elettrotecnia»*, vol. LII, núm. 8, 1965 (CESI-Pubb. 65/4).
11. IEC Publ. 56, 1982.
12. Rovelli S., "Lo sviluppo delle prove sintetiche in Italia", Conferenza tenuta alla Sezione di Milano il 6 maggio 1971 e alla Sezione di Torino il 26 maggio 1971.
13. Guy St-Jean, "A Method for Calculating Directly the Components of a Synthetic Circuit for the Testing of AC Circuit Breaker", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-93, núm. 5, ene./feb. de 1974, pp. 429-435.
14. Genest G., Pinault J.G., "The Synthetic Testing Circuit of the High Power Laboratoy, IREQ", Internal Report IREQ.
15. ASTA Publication, núm. 27, "Interim Rules for the Application of Synthetic Testing Methods to High Voltage A.C. Circuit Breaker", *ASTA Publication*, núm. 27, The Association of Short-Circuit Testing Authorities Inc., London.
16. Mazzoli B., Rovelli S., "Experiences Gained on Artificial Lines for Synthetic Testing under Short Line Fault Conditions", reimpr.: IEEE Conference Record of the International Symposium on High Power Testing 71 C 57-PWR.

BOLSA DE TRABAJO

51151

Ingeniero físico, 32 años, soltero, masculino, egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana (75-84).

Tema de tesis: "Simulación del primer núcleo de recarga de un reactor." Sin problemas de residencia, disponibilidad inmediata.

51146

Ingeniero industrial mecánico, 23 años, soltero, masculino, egresado del Instituto Tecnológico de Puebla (80-84).

Tema de tesis: "Estudio sobre cambiadores de calor de lecho fluidizado líquido-sólido." Sin problemas de residencia, disponibilidad inmediata.

50951

Ingeniero industrial, 21 años, soltero, masculino, egresado de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (79-84).

Tema de tesis: "Identificación de las especialidades tecnológicas." Sin problemas de residencia, disponibilidad inmediata.

50946

Química industrial, 24 años, soltera, femenina, egresada de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (79-83).

Tema de tesis: "Desarrollo del compuesto de carburo de silicio y de óxido de zinc para aplicaciones en apartarrayos." Sin problemas de residencia, disponibilidad inmediata.

Las solicitudes deberán dirigirse a:

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS
División de Información Tecnológica y
Desarrollo Profesional
Departamento de Relaciones con el Sector Educativo
Interior Internado Palmira
Palmira, Temixco, Morelos
62490, México
Tels. (9173) 143 811 exts. 3350 y 2094

artículos técnicos

Flujo en cascadas potenciales mediante el método del elemento finito

Rodolfo Sosa Cordero
Gonzalo Fernández V.

En este artículo se presenta un modelo matemático y su solución mediante el empleo del método del elemento finito con formulación aproximada de Galerkin, para el análisis del flujo en una cascada circular, en una superficie de corriente de revolución de una turbomáquina, que puede ser axial, mixta o radial. A la superficie de revolución se le aplica una transformación conforme para obtener un plano, eliminando de esta forma un término en la ecuación logrando evitar la solución iterativa. Asimismo, el método del elemento finito permite resolver la ecuación en derivadas parciales del tipo elíptico en su forma cuasiarmónica. Se presenta, además, el método seguido para introducir las condiciones de contorno; en especial, las condiciones de Kutta-Joukowski y la de periodicidad, que distinguen a este problema de los problemas clásicos de flujos ideales valuados en el contorno.

Introducción

La predicción de las condiciones del flujo en el interior de un rotor de una turbomáquina es esencial para lograr que un diseño logre características de operación sobresalientes. Problemas que afectan la eficiencia de la turbomáquina y/o que originan problemas operativos son la separación de capa límite y la cavitación. Estos problemas pueden eliminarse o minimizarse al ajustar adecuadamente la transferencia de energía en la cascada del rotor. El propósito del método que aquí se presenta es proporcionar una herramienta de análisis que permita incrementar el conocimiento del patrón del flujo en el interior de una turbomáquina.

Consideraciones preliminares

Para una condición de operación dada, el flujo en una turbomáquina depende de la geometría de la máquina (efectos tridi-

mensionales) y de las propiedades del fluido. Los efectos de la compresibilidad no se consideran aquí; sin embargo, puede introducirse este efecto sin un mayor esfuerzo.

Modelos rotacionales cuasi-3D

En todos los modelos para analizar flujos en turbomáquinas se supone que el flujo principal es fundamentalmente inercial y se desprecian los efectos de la viscosidad, para analizarlos después mediante la teoría de la capa límite. De esta forma, se considera que el flujo es potencial aunque rotacional.

Hasta la fecha, no se ha formulado un modelo tridimensional integral para el análisis del flujo rotacional en el interior de una turbomáquina. Los modelos existentes son muy complejos y requieren de la introducción de datos empíricos para lograr una solución aceptable. Además, el tiempo, extremadamente largo, que se requiere en cómputo los hace poco prácticos, en especial, para la labor de diseño.

yen las coordenadas r y z por m . De esta forma, el plano álabé-álabe queda definido por las coordenadas ortogonales, Θ , m .

La relación entre m y r es:

$$\frac{\partial r}{\partial m} = \text{sen } \phi \quad [1]$$

Componentes de la velocidad

En el análisis se emplea un sistema rotatorio de referencia que gira alrededor del eje de la turbomáquina que se hace coincidir con el eje z . La velocidad relativa, W , de un observador que gira con una velocidad angular, ω , se relaciona con la velocidad absoluta, V , mediante las relaciones:

$$W_m = V_m \quad [2-a]$$

$$W_\Theta = V_\Theta - r \cdot \omega \quad [2-b]$$

Movimiento absoluto irrotacional

Al despreciar los efectos viscosos y considerar un fluido incompresible, el movimiento del fluido es en todas partes irrotacional, de esta forma, el valor de la circulación absoluta $d\Gamma$ debe ser nulo. Esto es,

$$d\Gamma = \frac{\partial}{\partial m} (rV_\Theta) \cdot d\Theta \cdot dm - \frac{\partial}{\partial \Theta} (V_m) \cdot r \cdot d\Theta \cdot dm \quad [3]$$

En términos de las velocidades relativas.

$$\frac{\partial (rW_\Theta)}{\partial m} - \frac{\partial (V_m)}{\partial \Theta} = - \frac{\partial}{\partial m} (r^2 \omega) \quad [4]$$

La ecuación de continuidad se satisface por la función corriente ψ de Stokes, y se define en este plano álabé-álabe por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial \Theta} &= BrW_m \\ \frac{\partial \psi}{\partial m} &= - BW_\Theta \end{aligned} \quad [5]$$

La ecuación resultante de combinar la función corriente con la de irrotacionalidad absoluta es:

$$\frac{\partial}{\partial m} \left(\frac{1}{B} \frac{\partial \psi}{\partial m} \right) + \frac{\partial}{\partial \Theta} \left(\frac{1}{Br} \frac{\partial \psi}{\partial \Theta} \right) = - \frac{\partial}{\partial m} (r^2 \omega) \quad [6]$$

Esta ecuación diferencial es no lineal y debería resolverse en forma iterativa. Sin embargo, puede introducirse la transformación,

$$d\xi = \frac{dm}{r} = \frac{dr}{r \cdot \text{sen } \phi} \quad [7]$$

que es conforme, ya que mantiene los mismos ángulos en la superficie mapeada y en el plano físico.

Para el plano transformado, se define la velocidad circunferencial como:

$$W_\theta = - \frac{1}{Br} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \quad [8]$$

Resultando finalmente la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{B} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \Theta} \left(\frac{1}{B} \frac{\partial \psi}{\partial \Theta} \right) = 2 \cdot r^2 \cdot \omega \cdot \text{sen } \phi \quad [9]$$

Esta ecuación es válida para cualquier tipo de flujo radial, mixto o axial; el término de la derecha es independiente de ψ y puede resolverse sin iteración. Sin embargo, las magnitudes $B(\xi)$ y $r(\xi)$ provienen de la solución en el plano meridiano. Asimismo, la solución en el plano meridiano requiere las distribuciones para las velocidades circunferenciales W_Θ y V_Θ y pueden transferirse de regreso a la solución meridiana con el fin de obtener nuevos valores de $B(\xi)$ y $r(\xi)$, así como nuevas condiciones de contorno. Este proceso iterativo entre los dos planos llevará a la convergencia a la solución cuasi-3D.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno para el flujo en el plano álabé-álabe son de tres tipos. La condición de Dirichlet se aplica a lo largo de las superficies del álabé, puesto que se conoce el valor de la función corriente. En el contorno aguas arriba de la cascada, se supone que el flujo es uniforme y que se conoce la dirección del flujo. Por tanto, se aplica la condición de Neumann como:

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{\tan \beta}{Sr} \quad [10]$$

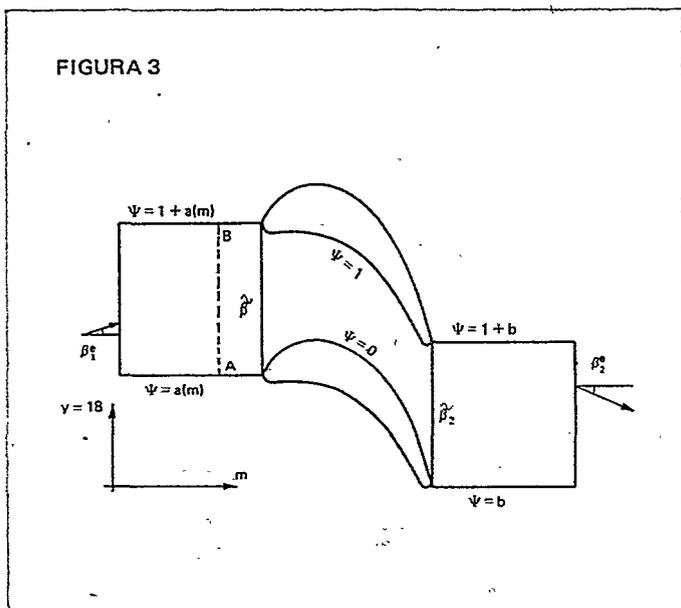
Para la salida, también se supone que el flujo es uniforme pero no se conoce *a priori* el valor del ángulo del flujo debido a que el álabé produce una desviación igual al valor de la circulación alrededor del álabé. Esta situación impone al problema de solución la necesidad de proceder en forma iterativa con el fin de calcular el valor de la circulación del álabé y, por tanto, del ángulo del flujo aguas abajo. En la primera iteración puede suponerse un ángulo y aplicar también la condición de Neumann.

Contrastando con el análisis de un único perfil, en donde el campo de flujo infinito debe resultar aproximado en un dominio de solución finito, el problema de flujo en cascadas posee contorno finito. Sin embargo, debido a la condición de periodicidad, éste no es un problema clásico de problema de contorno.

Matemáticamente, la condición de periodicidad se escribe como:

$$\psi(\Theta + S, m) - \psi(\Theta, m) = 1.0 \quad [11]$$

Los detalles de implantación se consideran más adelante.



Métodos de solución de la ecuación fundamental.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se ha experimentado con dos técnicas numéricas para la solución de problemas de flujos, en los que resulta una ecuación diferencial de Poisson o su versión simplificada de Laplace. La experiencia obtenida permite comparar los distintos métodos:

Método matricial

En este método se introduce la función corriente de Stokes resultando en una ecuación de Poisson que debe resolverse en forma iterativa. Esto se verifica mediante la aproximación en diferencias finitas; es decir, se aproxima la ecuación diferencial en forma puntual. Con este método se han logrado resultados satisfactorios en el análisis de cascadas circulares estacionarias y el flujo axilimétrico irrotacional en el plano meridiano. Sin embargo, presenta las siguientes complicaciones:

a) Es muy difícil representar adecuadamente los contornos de álabes y la geometría del plano meridiano con mallas de di-

ferencias finitas; en regiones con grandes gradientes de velocidad debe introducirse un gran número de "moléculas" de cómputo para obtener la exactitud deseada. Aun así, es muy difícil obtener las condiciones en el perfil que deben extrapolarse de las condiciones del flujo externo.

b) La ecuación diferencial debe escribirse en la forma de Poisson, de tal manera que los coeficientes de la matriz no son constantes en cada iteración y deben de recalcularse.

c) El posproceso se dificulta debido a la enorme cantidad de interpolaciones que deben de realizarse para obtener las líneas de corriente, por ejemplo.

Este método resulta inconveniente para implantarlo y usarlo repetidamente en el diseño.

Método del elemento finito

Este método se basa en la solución de las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el problema mediante la aproximación a la solución en una subregión. Su premisa básica es que la solución puede modelarse analíticamente al remplazarla con un ensamble de elementos finitos que pueden utilizarse para representar las geometrías más complejas.

La ecuación básica se obtiene también al introducir la función corriente; sin embargo, no es necesario escribirla en la forma de Poisson, debido a que mediante la formulación de Galerkin puede resolverse bajo su forma cuasi-armónica. Por último, debido a que en cada elemento se especifican las funciones de forma, es fácil interpolar durante la solución y durante el posproceso.

Finalmente, durante las iteraciones, la matriz de coeficientes nunca cambia. Esto permite emplear el método de reducción de Gauss a forma triangular y obtener la triangulación de la matriz una sola vez en el proceso. En las restantes iteraciones sólo debe de redefinirse el vector de "fuerzas", con base en los resultados obtenidos y las condiciones de contorno para obtener, en una fracción del tiempo, una nueva solución.

La desventaja más importante de este método es su reciente incorporación a problemas de mecánica de fluidos. El método está relativamente poco documentado y no existen programas comerciales disponibles para esta aplicación específica. Intentar modificar programas existentes para aplicarlos a análisis estructural puede resultar una tarea tan o más formidable que generar uno específico. Además, tendrá la ventaja de utilizar sólo aquellas rutinas que en verdad se requieren, reduciendo el *overhead* de la computadora.

Concluyendo, el método del elemento finito, a pesar de que es muy reciente su aplicación a problemas de mecánica de fluidos, es el más adecuado de los métodos numéricos de solución de la hipótesis cuasi-3D para flujos rotacionales en turbomáquinas.

Método de solución por elemento finito

La ecuación fundamental es de la forma:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \nu} \left(K' \frac{\partial \psi}{\partial \nu} \right) = \gamma (\xi, \nu, \psi) \quad [12]$$

tipo elíptico para flujos incomprensibles. Debido a que K varía en la región de la solución, la ecuación tiene forma cuasi-armónica. Gracias a la transformación se logra que γ no dependa del valor de ψ y se obtiene directamente la solución.

Formulación aproximada por Galerkin

Es posible formular el problema en forma variacional para obtener las ecuaciones de los elementos; sin embargo, mediante esta formulación no es muy clara la manera cómo pueden introducirse los gradientes de velocidad (o ángulo de flujo), en las condiciones de contorno. Por este motivo, se formula el problema directamente de la ecuación diferencial, empleando el método de Galerkin.

Este método permite obtener una solución aproximada a la ecuación diferencial, al prescribir que el error entre la aproximación y la solución real sea ortogonal a las funciones empleadas en la aproximación.

Si se tiene con una ecuación diferencial $Lu - f = 0$ (L es el operador diferencial) y se aproxima la solución por $u = \int N U$ entonces la solución $Lu - f = \epsilon$, en donde ϵ es un error residual debido a que la solución es aproximada. Una forma de lograr el objetivo es que para cada una de las funciones de base N, el valor de la integral $\int N \epsilon d\Omega = 0$. Esta integral establece que la función base debe ser ortogonal al error en la región de solución Ω .

La aplicación del método de Galerkin al elemento finito resulta en la ecuación:

$$\int [L(\psi)] N d\Omega = 0 \quad [13]$$

donde ψ es el parámetro desconocido que es aproximado por:

$$\tilde{\psi} = \sum N_{ii} \quad [14]$$

Para esta aplicación, la ecuación diferencial es:

$$L(\psi) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \nu} \left(K' \frac{\partial \psi}{\partial \nu} \right) - \gamma = 0 \quad [15]$$

Integrado por partes permite obtener, para el elemento, un sistema de ecuaciones simultáneas lineales de la forma:

$$[K] \{ \psi \} = \{ f \} + \{ g \} \quad [16]$$

Con

$$k_{i,j} = \int \left[K \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \frac{\partial N_j}{\partial \xi} + K' \frac{\partial N_i}{\partial \nu} \frac{\partial N_j}{\partial \nu} \right] d\Omega \quad [17]$$

$$f_i = \int \gamma N_i d\Omega \quad [18]$$

$$g_i = \int N_i \left(\frac{\partial \psi}{\partial \xi} n_\xi + \frac{\partial \psi}{\partial \nu} n_\nu \right) dS \quad [19]$$

Con dS diferencial de arco en el contorno.

El último término $\{g\}$ representa las condiciones de contorno de Neumann.

Las derivadas de la variable se evalúan por:

$$\frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \xi} = \sum \frac{\partial N}{\partial \xi} \psi ; \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \nu} = \sum \frac{\partial N}{\partial \nu} \psi \quad [20]$$

Elementos

Para la aplicación a la discretización del dominio, se emplearon elementos triangulares, cuadriláteros lineales y finalmente cuadriláteros "Serendipity" de ocho nodos isoparamétricos. De éstos, los últimos son los más efectivos debido a que permiten efectivamente aproximar contornos curvos con una función de interpolación bicuadrática y poseer variación lineal en las dos direcciones coordenadas para los gradientes. Como no es posible integrar en forma analítica cerrada las ecuaciones de los elementos, se emplea el método bidimensional de Gauss-Legendre con dos puntos de Gauss en cada dirección local ("integración mínima").

Se ha demostrado en aplicaciones del método del elemento finito en análisis de esfuerzos que los gradientes se calculan con más exactitud en los puntos de Gauss que en cualquier otro punto, dentro del elemento incluyen los nodos del contorno. Por este motivo, se calculan los gradientes en los puntos de Gauss y se extrapolan, mediante una técnica de suavización por mínimos cuadrados, a los nodos.

Condición de contorno periódica

No es tarea sencilla satisfacer adecuadamente la condición de periodicidad con elementos, en donde únicamente se garantiza la continuidad en la función corriente, no así en sus gradientes o componentes de la velocidad.

La condición de periodicidad para dos puntos A y B

$$\psi_B = \psi_A + 1; (W_m)_A = (W_m)_B; (W_\Theta)_A = (W_\Theta)_B \quad [21]$$

De estas relaciones, únicamente la primera puede emplearse de manera directa con elementos con continuidad sólo en ψ . Si la malla de elementos se selecciona de tal forma que los pares de nodos opuestos A y B estén idénticamente distribuidos, la primera condición de periodicidad puede remplazarse por

$$(\Delta\psi)_A = (\Delta\psi)_B \quad [22]$$

Esta condición satisface automáticamente la condición de periodicidad para el componente de velocidad circunferencial.

La periodicidad en la dirección meridiana se satisface en el sentido de valores de pesos, si se supone que:

$$\int (W_m)_A N_i ds = \int (W_m)_B N_i ds \quad [23]$$

Evidentemente, la condición de periodicidad rompe con la propiedad de la matriz global de coeficientes de simetría. Este es, desde el punto de vista computacional, un problema importante debido a que no pueden emplearse las rutinas más eficientes de eliminación de Gauss para matrices bandeadas y simétricas, lo que incrementa de manera considerable el tiempo de solución. Sin embargo, en las ecuaciones precedentes puede verse que la condición de periodicidad puede satisfacerse si "artificialmente" le damos, durante el proceso de ensamble de la matriz global, el mismo número de ecuación a los pares de nodos A y B. De este procedimiento resulta que se suman las filas y columnas, en tal forma que la contribución desconocida [23] desaparece; de esta manera, el único precio que tiene que pagarse es incrementar un poco el ancho de banda de la matriz global.

Dominio de la solución

En principio existen varias posibilidades para definir el dominio de cómputo de la cascada:

- El dominio rodea completamente un álabe.
- Dominio en un canal entre álabes.
- Dominio con cierto número de álabes y canales, sin considerar la condición de periodicidad.

En el tercer caso, la periodicidad sólo se satisface en la parte central del dominio, siempre y cuando las perturbaciones en los contornos laterales sean suficientemente pequeños. La región de solución y, por consiguiente, el esfuerzo computacional son demasiado grandes. Para el segundo caso, las regiones más sensibles del dominio que poseen gradientes en extremo grandes, específicamente en los bordes de ataque y de salida, se localizan

en los contornos del dominio. Además, la condición periódica para elementos únicamente continuos en ψ es muy difícil de satisfacer en todos los casos.

En el primer caso, las regiones con puntos de estancamiento están totalmente rodeadas por elementos en ambos lados, esto numéricamente está en ventaja con el caso (b), que es el que más frecuentemente se encuentra en la literatura. En el caso (a) deberá sin embargo representarse una región doblemente conexa pero que en realidad no representa una gran dificultad.

Modelado de la circulación

Cuando se emplea la función corriente para modelar flujos no viscosos con circulación en cascadas no se requiere desconectar la región biconexa de la solución. El valor de la distribución de ψ es estable e independiente de la solución. Sin embargo, aparece una condición de contorno que no es conocida de antemano: El valor de la función corriente a lo largo de la superficie del perfil $\psi = \psi_p$ y, por tanto, también de la línea de corriente de estancamiento.

El valor de ψ_p , especificado en la superficie del álabe, determina el valor de la circulación que rodea el álabe y, por consiguiente, el cambio en el ángulo del flujo entre la entrada y la salida. El valor de ψ_p y la circulación no pueden obtenerse únicamente por análisis de cascadas potenciales. Para cualquier valor arbitrario de la circulación o valor específico de ψ_p , se obtendrá una solución que satisfaga la ecuación diferencial y las condiciones de contorno. Con el fin de obtener una solución que corresponda a la realidad, se requiere información adicional sobre el borde de salida del perfil. Sólo si pudiera calcularse la transición de capa límite en estela y su desarrollo aguas abajo sería factible —mediante un cálculo entre la interacción no viscosa y viscosa— predecir la circulación del álabe y el ángulo de flujo.

Condición de Kutta-Joukowski

Generalmente, en las turbomáquinas se da la condición en que el perfil de la cascada se encuentra poco cargado en la vecindad de la región salida y en que sus capas límite están perfectamente adheridas, justificándose el empleo de la condición de Kutta: "Debido a que un fluido no puede forzarse a fluir alrededor del borde de salida con velocidad infinita, el punto de estancamiento deberá coincidir con un borde de salida agudo."

En el caso de bordes de salida industriales con configuración roma, se emplea la siguiente condición equivalente: "En aquellos puntos en flujos reales, en donde se produciría la transición de capa límite en estela, deberán tener la misma presión."

Para la implantación en computadora, se emplea una técnica de extrapolación para la presión superficial: Si las presiones extrapoladas linealmente en las caras de succión y presión del álabe desde el 85% de la cuerda son iguales en el borde de salida se satisface la condición de Kutta-Joukowski.

La distribución de presiones se calcula a partir de la ecuación de Bernoulli para un sistema rotatorio de referencia.

Implantación de las condiciones de contorno

De la condición del ángulo del flujo prescrito a la entrada se obtiene el gradiente de velocidades en la dirección ξ que se prescribe a la entrada.

$$\psi_e : \frac{1}{B} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} = - (rW_{\Theta})_e \quad [24]$$

En la salida, podría especificarse también el gradiente en ξ ; sin embargo, en el cálculo iterativo de la condición de Kutta es posible prescribir mejor una condición de Dirichlet, lográndose así un mejor control sobre la ecuación de continuidad en el dominio de la solución. Por tanto, se prescribe distribución lineal de ψ con

$$\frac{\partial \psi}{\partial \Theta} = (rBW_{\xi})_s = (rBW_m)_s \quad [25]$$

Resultados del análisis álabe-álabe

a) Distribuciones de velocidad y de presión, no sólo en el álabe sino en todo el campo de flujo.

b) Configuración geométrica de las líneas de corriente relativas, en particular en el borde de entrada.

El último punto es especialmente importante, ya que el análisis en el plano meridiano requiere de esta geometría. Además, la observación directa de la incidencia permite el análisis y la comprobación experimental de los resultados.

En la figura 4 se muestra la malla de elementos isoparamétricos y el dominio de la solución para la cascada circular del distribuidor de una turbina Francis. En la figura 5 se muestran las líneas de corriente en el plano transformado ξ, Θ . Finalmente, en la figura 6 se muestra el campo de velocidades vectorial alrededor del álabe.

FIGURA 4

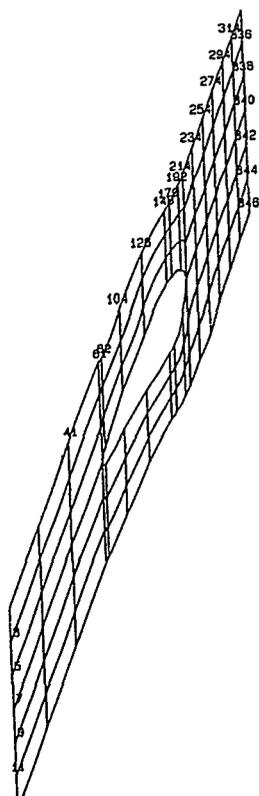


FIGURA 5

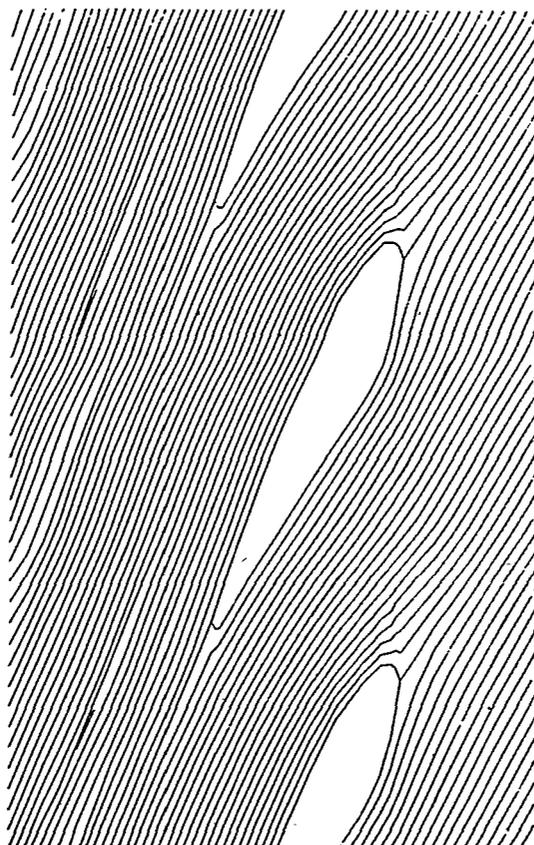
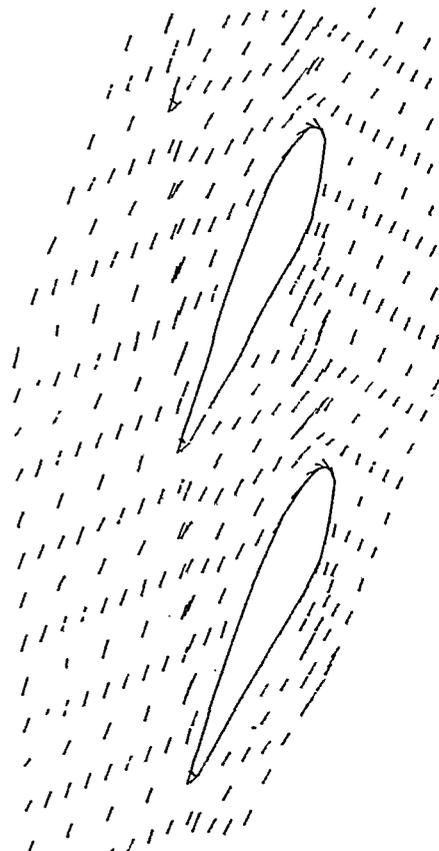


FIGURA 6



Conclusiones

Se ha presentado el modelo matemático y método de solución por elementos finitos del programa de computadora desarrollado en el Departamento de Hidromecánica, del IIE, para el análisis de flujos en cascadas circulares, estacionarias o rotatorias para una superficie de corriente de configuración arbitraria.

Este método se empleará junto con otro programa, también de elemento finito, que se encuentra en desarrollo para el análisis en el plano meridiano, con el propósito de obtener la meta final de la solución cuasi-tridimensional de flujo rotacional en una turbomáquina de configuración geométrica arbitraria.

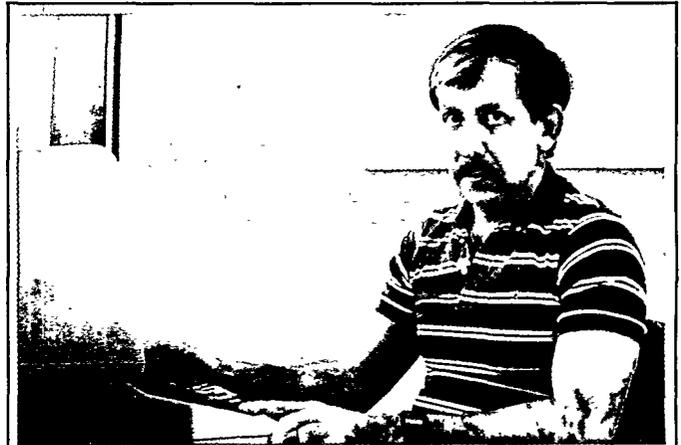
Simbología

- B = Espesor del canal de corriente en el plano meridiano.
- s = Paso de la cascada.
- H = Carga específica total.
- p = Presión estática.
- K = Matriz de rigideces o coeficientes.
- m = Coordenada meridiana.
- N = Funciones de forma.
- n = Número de puntos nodales en el elemento.
- γ = Parte derecha de la ecuación principal.
- r = Coordenada radial.
- Θ = Coordenada tangencial.
- z = Coordenada axial.
- V = Velocidad absoluta.
- W = Velocidad relativa.
- ω = Velocidad angular rad/s.
- β = Angulo del flujo.
- ψ = Función corriente.
- ξ, ν = Coordenadas ortogonales arbitrarias.
- ϕ = Angulo de la inclinación de la superficie de corriente.

Referencias

1. Wu, C.H., *A General Theory of Three-dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines on Axial, Radial, and Mixed Flow Types*, 1952, NACA TN 2604.
2. Senoo, Y. y Nakase, Y., "A Blade Theory of an Impeller with an Arbitrary Surface of Revolution", *Transactions of the ASME*, octubre de 1971, pp. 454-459.
3. Hirsch, Ch. y Warzee, "An Integrated Quasi-3D Finite Element Calculation Program for Turbomachinery Flows", *J. of Engin. for Power*, ASME, 101, pp. 141-148.
4. Holler, H.K. y H. Keck, "The Complete Finite Element Flow Computation in a Bulb Turbine from Inlet Trashrack to Runner Outlet", *IAHR-Symposium*, Tokio, 1978.
5. Hinton, E., F. Scott y R. Ricketts, "Local Least Squares Smoothing for Parabolic Isoparametric Elements", *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 9, pp. 235-256, 1975.
6. Huebner, K., *The Finite Element Method for Engineers*, John Wiley and Sons, 1977.
7. Bathe, K.J. y E.L. Wilson, *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, 1976.
8. Segerlind, *Applied Finite Element Analysis*, John Wiley and Sons, 1978.
9. Keck, H. y W. Haas, "Finite Element Analysis of Quasi-three Dimensional Flow in Turbomachines", *Finite Elements in Fluids*, vol. 4, John Wiley and Sons Ltd., 1982.

6. Katsanis, T., *Computer Program for Calculating Velocities and Streamlines on a General Surface of Revolution in Turbomachines*, abril de 1968, NACA TN D-4525.
7. Stanitz, J.D., y G.O. Ellis, *Two Dimensional Flow on General Surface of Revolution in Turbomachines*, marzo de 1952, NACA TN 2654.



Rodolfo Sosa Cordero

Es ingeniero mecánico, egresado de la Universidad Anáhuac. Realizó estudios de posgrado en el área de diseño hidráulico y mecánico de hidráulicas en la Mitsubishi Heavy Industries, en Takasago, Japón. Ha dirigido seis tesis de licenciatura y capacitado personal en el área de diseño de turbinas hidráulicas. Actualmente, es jefe del Departamento de Hidromecánica, de la División de Estudios de Ingeniería, del IIE, donde ha desarrollado diversos estudios sobre sistemas de simulación del comportamiento dinámico de centrales hidroeléctricas, el diseño de pozos de oscilación, la simulación de fenómenos de resonancia en centrales hidroeléctricas y el diseño de turbinas hidráulicas.



Gonzalo Fernández Valencia

Estudió la licenciatura en ingeniería mecánica y eléctrica en la Universidad Nacional Autónoma de México. Ha tomado diversos cursos de especialización y publicado trabajos de investigación, uno de ellos se refiere al sistema operativo para el control de procesos. Colaboró con Hecnie y Asoc., S.A., como diseñador de instalaciones hidráulicas, sanitarias y de aire acondicionado, y con el Instituto de Ingeniería, de la UNAM, donde desarrolló programas de Pascal para el subsistema de control de una planta experimental solar. Desde agosto de 1985, es investigador del Departamento de Hidromecánica, de la División de Estudios de Ingeniería, del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

MX9800258

El Anemodata 1-IIE

Sistema automático para la adquisición de datos de viento

Marco Antonio Borja
Pablo A. Parkman

Una fuente inagotable de energía es el viento. Estudiar su comportamiento para desarrollar proyectos de investigación y aplicar nuevas tecnologías vinculadas con su máximo aprovechamiento es una de las actividades que se realizan en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

Como parte de dichas actividades, se diseñó y construyó el equipo Anemodata-1-IIE para la adquisición de datos de velocidad y dirección del viento. El Anemodata-1-IIE es un resultado de los trabajos que el Departamento de Fuentes no Convencionales, de la División de Fuentes de Energía, lleva a cabo en torno al desarrollo de equipo eléctrico para anemometría.

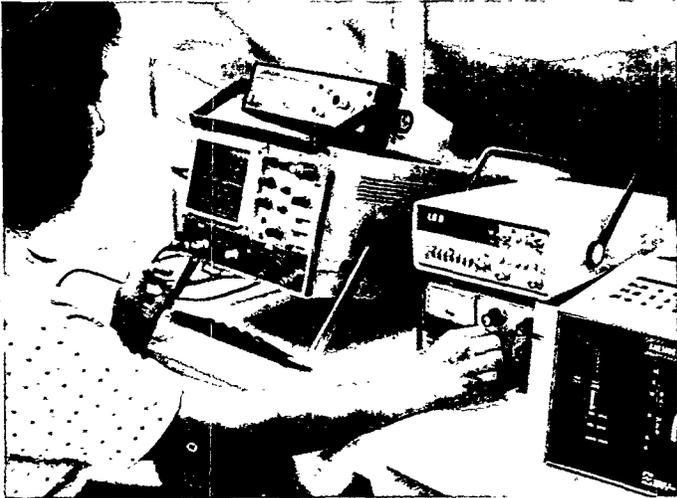
Conocer el comportamiento del viento a lo largo del día, mes y año, en cuanto a su magnitud y dirección se refiere, es indispensable para realizar diversos estudios de investigación y aplicación de nuevas tecnologías, tales como:

- La utilización de sistemas conversores de energía eólica tanto para la generación de electricidad como para el bombeo de agua.
- Estudios de dispersión de contaminantes.
- Cálculos para diseño estructural de torres de transmisión de energía eléctrica, chimeneas, puentes, etcétera.
- Información histórica para la operación y localización de aeropuertos.
- Estudios meteorológicos y otros más.

Los métodos de procesamiento de datos para los diferentes fines que se persiguen varían, dependiendo de los resultados que se desea obtener; sin embargo, los datos básicos a adquirir son, en general, la magnitud y la dirección del viento a lo largo del día, mes y año.

Los primeros anemómetros se construyeron a base de partes mecánicas de precisión, que movían a una velocidad constante un rollo de papel graduado sobre el cual se graficaban, por medio de una plumilla con tinta, la velocidad instantánea y la dirección del viento. Posteriormente, este concepto de diseño se siguió utilizando con ligeros cambios, tales como el uso de papel sensible a la presión para no utilizar plumillas con tinta.

La necesidad de conocer la distribución de la velocidad y dirección del viento a lo largo del día, originó el diseño de anemómetros que proporcionaran datos de velocidad media del viento y su dirección dominante asociada, en intervalos cortos de tiempo, por ejemplo, de 15 minutos o una hora. Para ello se utilizaba el generalizado método de distancia recorrida, que consiste básicamente en contar las revoluciones de un sensor anemométrico durante una base de tiempo, afectando el valor obtenido por una constante de proporcionalidad que relaciona las revoluciones por minuto del sensor con la velocidad del viento incidente sobre él. Dicho método se utilizó, ya que prácticamente es inapropiado e impreciso pretender obtener un valor de velocidad media del viento a partir de un gráfico de velocidad instantánea.



El Anemodata-1-IIE.

Sin embargo, aunque con los anemómetros de distancia recorrida por medio de graficadores se obtiene una mayor precisión en el valor de la velocidad media del viento, tienen la gran desventaja de que su lectura se realiza visualmente, generando errores de apreciación visual. Lo anterior, sumado a que, en general, el vaciado de datos de un gráfico se realiza en forma manual, para posteriormente transferirlo por medio del teclado a una computadora para su procesamiento, implica un número muy grande de horas-hombre. Esto hace que estos equipos sean obsoletos en una época en que las microcomputadoras han adquirido un importante lugar en el manejo y procesamiento de bases de datos y están al alcance de cualquier usuario que pretenda realizar estudios en torno al viento y a otras variables meteorológicas.

Es por estas razones que actualmente se requiere utilizar equipos anemométricos que obtengan los datos en forma automática y precisa y que su recuperación se realice, transfiriendo los datos adquiridos en forma automática y casi instantánea a una computadora, lo que minimizará el tiempo en horas-hombre y hará posible aprovecharlos para obtener resultados de interés.

El Anemodata

En el IIE se diseñó un equipo basado en un microprocesador, que adquiere los datos básicos de velocidad media y dirección dominante del viento en intervalos de 15 minutos,¹ almacenando los datos adquiridos en memorias electrónicas de estado sólido (EPROMS), en forma continua, durante un periodo desatendido de 30 días, lo cual implica 2 880 datos de velocidad, y 2 880 datos de dirección.

La velocidad media se calcula utilizando el método de distancia recorrida, que es prácticamente una integración de todas

1. El intervalo promedio se establece mediante programación (*software*) y puede modificarse en el caso de otras aplicaciones, desde segundos hasta horas.

las velocidades instantáneas presentes en un intervalo de tiempo dado, asegurando así la precisión y confiabilidad del dato.

La dirección dominante del viento se determina muestreando el valor presente cada cinco segundos y almacenándolo en ocho direcciones geográficas, para su comparación en cuanto a mayor frecuencia de ocurrencia al final de cada 15 minutos. Esto implica su cálculo a partir de 180 muestras igualmente espaciadas.

El Anemodata puede funcionar en dos intervalos de operación para velocidad media del viento en periodos de 15 minutos.

- a) 2 - 27 m/s con resolución de 0.108 metros por segundo.
- b) 2 054 m/s con resolución de 0.216 metros por segundo.

El usuario selecciona el intervalo, dependiendo del régimen de vientos que desea estudiar.

Los datos adquiridos por el Anemodata se graban en las memorias de estado sólido en forma binaria, esto implica que no se realiza ninguna conversión analógica o digital y por ello no requiere calibración, dependiendo la precisión de los datos adquiridos únicamente del comportamiento del sensor utilizado y la estabilidad de la base de tiempo del equipo. Esta se produce por medio de programas de cómputo (*software*), a partir de la frecuencia generada por un cristal de cuarzo, la que a su vez genera la señal de reloj al microprocesador.

Los datos se transfieren en forma hexadecimal a una computadora o microcomputadora, donde se les aplica el factor de proporcionalidad para convertirlos a cualquier tipo de unidades de velocidad.

El Anemodata puede aceptar la conexión de sensores anemométricos comerciales tales como el *maximum*² de reconocido prestigio, o bien sensores no comerciales y reproducibles como el XV-002-IIE, diseñado en el Instituto. En el primer caso, la constante de proporcionalidad entre las revoluciones por minuto del sensor y la velocidad del viento, proporcionada por el fabricante, fueron minuciosamente corroboradas en el túnel del viento del IIE y, en el segundo caso dicha constante se determinó en iguales circunstancias.

Operación

La operación e instalación del Anemodata son muy sencillas, ya que sólo se insertan las memorias limpias en bases especiales para su fácil instalación y recuperación; se enciende el equipo, el cual automáticamente realiza rutinas de autopruueba para verificar el estado correcto del sistema, indicando al operador su resultado, y se acciona el botón de inicio, dando comienzo a su secuencia de operación continua y autónoma hasta de 30 días.

La transferencia de la información almacenada en las me-

2. Marca registrada de Estados Unidos.

morias de estado sólido, hacia la computadora, se realiza utilizando un lector de EPROMS comercial de bajo costo, que se conecta a la computadora por medio de una interfaz RS-232 con la que actualmente cuentan casi todas las microcomputadoras.

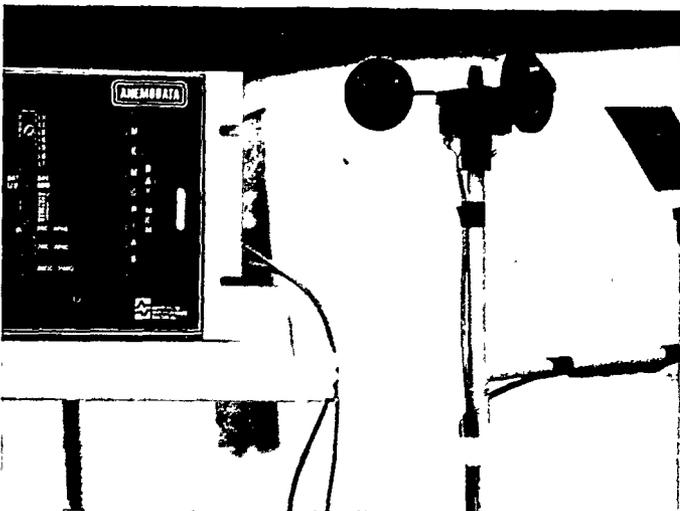
El procedimiento de recuperación de datos consiste en recolectar las memorias de estado sólido en el sitio de instalación del equipo (insertando en su lugar memorias limpias); insertarlas en el lector de memorias, y enviar comandos desde la computadora. La transferencia se realiza en menos de 60 s, quedando lista para su procesamiento computacional y la casi inmediata obtención de resultados.

Regeneración de las memorias

Es importante hacer notar que ya que los datos se transfirieron en su forma básica a la computadora, éstos pueden procesarse atendiendo a los diferentes métodos que desarrolle el usuario, a diferencia de equipos comerciales que procesan la información desechando los datos básicos y proporcionando al usuario únicamente resultados que pueden interesarle o no. Sin embargo, para aquellos usuarios que no deseen desarrollar su propia programación (*software*) de procesamiento de datos, el Anemodata cuenta con un soporte de programación (*software*) que proporciona la velocidad media diaria, la curva de frecuencia de velocidades, la rosa de los vientos, el patrón de distribución de velocidades de viento, el estudio del contenido energético del viento, la velocidad máxima (promedio en 15 minutos) con su hora y fecha de ocurrencia, el mayor periodo de calmas con su hora y fecha de ocurrencia, las velocidades máximas a nivel diario (promedio en 15 minutos) y un estudio probabilístico, a partir de la distribución de probabilidad de Weibull para pronóstico del contenido energético del viento.

Reproducción y factibilidad económica

El Anemodata es un equipo diseñado pensando en las necesidades actuales de instrumentación automatizada, tanto en nuestro país como en el extranjero, y satisface las necesidades



El Anemodata puede utilizarse con diferentes sensores anemométricos.

nacionales, ya que no existe equipo similar de fabricación mexicana. Además, tiene grandes posibilidades de competencia en el mercado internacional, debido a su bajo costo y alta tecnología, ya que los equipos más codiciados actualmente en los países desarrollados operan bajo principios similares que el Anemodata.

Su reproducción es sencilla, debido a que sólo lo integran dos pequeñas tarjetas electrónicas con baja densidad de componentes, careciendo de complejos partes mecánicas. Su costo directo de fabricación, a nivel de unidad en un proceso no industrial, se estima en 600 dólares, mismo que puede abatirse considerablemente en un proceso de reproducción industrial a mediana escala. Desde el punto de vista comercial, el dato anterior puede analizarse y compararse con los precios de equipos comerciales de fabricación extranjera, similares en cuanto al tipo de datos adquiridos y sistema de almacenamiento de información, cuyo precio de venta es de alrededor de 2 000 dólares.

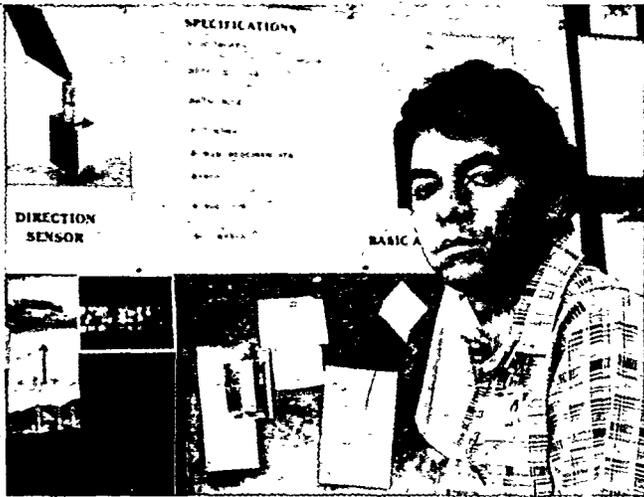
El Anemodata se diseñó de tal manera que sus pruebas iniciales, posteriores a su reproducción, son sencillas y rápidas, ya que el microprocesador cuenta con un programa de autopueba que verifica el correcto funcionamiento de cada uno de los módulos que componen el sistema, lo que también es una gran ventaja para su mantenimiento correctivo.

Flexibilidad

El Anemodata es en realidad un sistema de adquisición de datos de uso general, ya que acepta como dato de entrada un tren de pulsos (en el caso de viento, proporcionado por el anemómetro) y almacena el dato adquirido en forma binaria sin aplicar ningún factor de conversión. Esto implica que se le puedan conectar directamente sensores comerciales para la adquisición de datos de variables tales como:

- Precipitación pluvial;
- Flujo,
 - tuberías,
 - corrientes marítimas,
 - ríos,
 - canales;
- eventos en general, y con algunas modificaciones de la programación (*software*):
 - radiación solar,
 - presión atmosférica,
 - energía eléctrica, y en general cualquier variable para la que se disponga de un transductor con salida de frecuencia codificada. Para ello el Anemodata cuenta con un divisor de frecuencia desde dos hasta 2 048 en pasos de potencias de dos.

Dado que funciona con base en un microprocesador, gran parte de sus funciones pueden modificarse por programación (*software*), tal como la base de tiempo de muestreo, desde el orden de segundos hasta el orden de días.



MARCO ANTONIO BORJA

Ingeniero en comunicaciones y electrónica, egresado de la Universidad de Guanajuato, en 1977. En la misma universidad se desempeñó como catedrático en la Escuela de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica y en la Facultad de Ingeniería Química. Desde 1980, es investigador en el Departamento de Fuentes no Convencionales, en el área de energía eólica, donde es encargado de la sección de instrumentación y pruebas de sistemas conversores de energía eólica.

PABLO A. PARKMAN CUELLAR

En 1982, egresó de la Universidad Autónoma Metropolitana como ingeniero en electrónica e instrumentación y control. Trabajó como ingeniero en el Laboratorio de Metrología, del Centro de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones. Ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas a la sección de instrumentación, del Departamento de Fuentes no Convencionales, de la División de Fuentes de Energía, colaborando en el desarrollo y diseño de sistemas electrónicos, relacionados con el área de energía eólica.



De igual manera, si se pretende adquirir datos de otra variable como sólo precipitación pluvial, la capacidad de almacenamiento de datos se duplica; es decir, será de 60 días, ya que puede utilizar las localidades de memoria correspondientes a la dirección del viento.

Es importante hacer notar que lo anterior implica que el Anemodata puede comercializarse no sólo como un anemómetro, ya que con pequeños cambios podrá utilizarse para medir otro tipo de variables. Esta situación hace que el mercado de este equipo sea realmente amplio y variado.

Perspectivas

Debido a que se han detectado posibles usuarios del equipo, que además de requerir la información almacenada en forma continua, tal como lo realiza el Anemodata, requieren del monitoreo continuo de la velocidad y dirección instantánea de viento, actualmente se trabaja en el desarrollo de una tarjeta

adicional (opcional), para que con ella el Anemodata satisfaga estas necesidades.

Asimismo se pretende obtener apoyo para la realización de una tarjeta adicional que convierta señales analógicas a señales en frecuencia codificada; esto permitirá utilizar un amplio número de sensores comerciales para la medición de diferentes variables.

Actualmente, el anemodata es un producto totalmente terminado y documentado para su reproducción, instalación, operación y mantenimiento, y la tecnología para su fabricación está lista para transferirse.³

3. Las industrias interesadas en la adquisición de esta tecnología, en los avances logrados en este tema, así como en modificaciones para su uso en la adquisición de datos de otras variables, diferente tiempo de muestreo, otra presentación, etc., pueden solicitar informes al: Instituto de Investigaciones Eléctricas, At'n. Ing. Marco A. Borja Díaz, Apartado postal 475, 62000, Cuernavaca, Morelos, México, Tel. (73) 143 811; ext. 2092.

actividades del iie

Diseño de chimeneas industriales*

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), a través del Departamento de Ingeniería Civil, desarrolla, bajo contrato con la Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), un conjunto de métodos para el diseño de chimeneas, con el que se pretende resolver un problema inmediato: el diseño de las chimeneas de las centrales termoeléctricas que entrarán en operación durante los próximos años, en el país.

Generalidades

La función principal de una chimenea es dar salida a los gases producidos durante un proceso de combustión; para que la realice convenientemente, debe tener una altura suficiente para arrojar los gases en la atmósfera alta, evitando su dispersión al nivel de la superficie, básicamente con el propósito de evitar problemas de contaminación, ya que a mayor altura los gases se diluyen con más facilidad.

Las chimeneas se construyen principalmente con tres materiales: concreto, acero o mampostería; asimismo, son de diferentes tipos, que pueden clasificarse de acuerdo con los criterios: a) por el sistema que

se use para lograr la velocidad óptima de los gases dentro del fuste; b) por la forma en que se resistan las solicitaciones debidas a las principales fuerzas que actúan sobre el fuste, y c) por el número de ductos independientes alojados en una misma estructura.

La elección del tipo, las características geométricas de la chimenea y el material de construcción dependen de muchos factores. Principalmente se consideran los aspectos económicos y de operación de la estructura. Así, la determinación de las características generales de una chimenea se basa en evaluaciones económicas, condiciones de operación y límites de contaminación, básicamente.

Desarrollo de un conjunto de métodos para el diseño de chimeneas

En el Departamento de Ingeniería Civil, de la División de Estudios de Ingeniería,

se desarrolla un conjunto de métodos para el diseño de chimeneas asistido por computadora, con el que se pretende resolver un problema inmediato: el diseño de las chimeneas de las centrales termoeléctricas.

En primer término, se realizó una evaluación cuidadosa de la información sobre el tema, revisando las normas nacionales y extranjeras y, sobre todo, la literatura referente al tema, publicada en artículos técnicos de revistas extranjeras. Esto permitirá evaluar los principios en que se basan las normas, para que a partir de éstos se seleccionen los criterios más convenientes.

La mayor parte de las referencias consultadas corresponden a las normas y los reglamentos de diseño y análisis de chimeneas de concreto reforzado. Las normas más importantes y de las que se han derivado algunas otras son las *Especificaciones para el diseño y la construcción de chimeneas de concreto reforzado* del ACI, que mencionan las características de los

* Elaboró este artículo Luis Cacheux, del Departamento de Difusión Tecnológica, de la División de Información Tecnológica y Desarrollo Profesional, con la asesoría técnica del doctor Oscar Hernández Basilio, investigador del Departamento de Ingeniería Civil, de la División de Estudios de Ingeniería.

materiales, los requerimientos constructivos y las características de diseño para las solicitaciones más importantes, así como métodos para determinar los esfuerzos en el concreto y el acero de refuerzo.

Luego de revisar los avances teóricos en torno al diseño de chimeneas, en el IIE comenzaron a implantarse programas de análisis. Estos se proponen evaluar las fuerzas que actúan sobre las chimeneas y los esfuerzos internos en el material debidos a acciones externas, para después realizar el dimensionamiento, o la revisión, de las chimeneas.

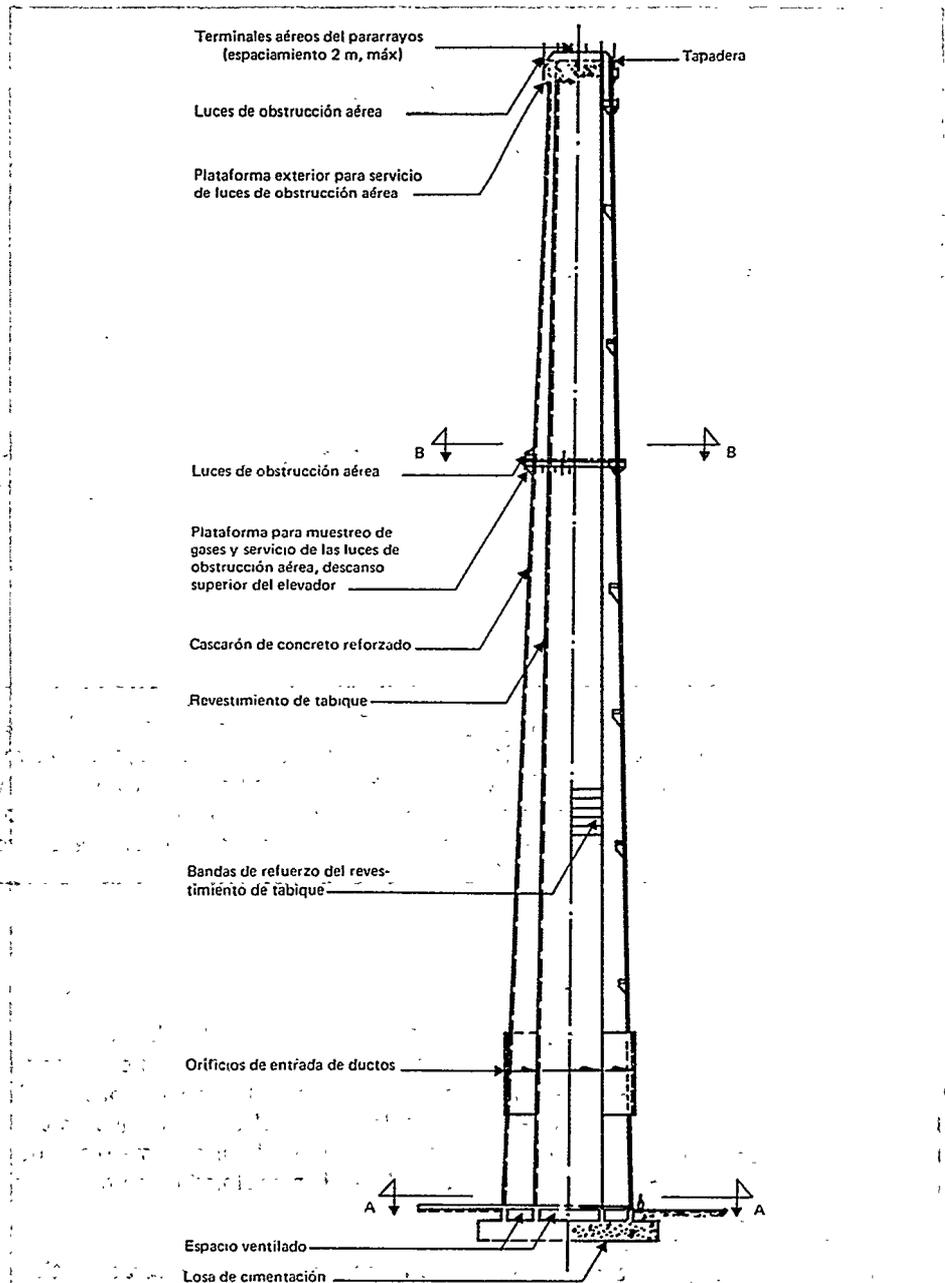
En el diseño de una chimenea se plantean múltiples cuestiones de índole mecánica y termodinámica. Este proyecto se ocupa sólo de los aspectos relacionados con la parte estructural, y su interés primordial es hacer que estas estructuras resistan las acciones que las soliciten. Entre éstas, merecen especial atención las originadas por sismo, viento y gradientes térmicos.

Para la etapa del análisis estructural se requiere evaluar la magnitud de las acciones a que están sujetas las estructuras, considerando además las cargas debidas al peso propio y a los accesorios, así como las posibles cargas vivas. Los procedimientos usuales para obtener la magnitud de las solicitaciones por viento y sismo se basan en estudios probabilísticos, ya que su ocurrencia y variación son aleatorias. Las cargas por peso propio son más fáciles de calcular, puesto que los valores de los pesos volumétricos de los materiales y las características geométricas de la estructura se conocen con mayor precisión.

A continuación se presenta un análisis somero de cómo afectan a las chimeneas los sismos, el viento y los gradientes de temperatura.

Sismos

Las chimeneas son estructuras muy sensibles al efecto de los sismos. Durante un sismo ocurrido en California, Estados Unidos, el 9 de febrero de 1971, de 375 chimeneas localizadas en una zona determinada 135 sufrieron daños; una investigación posterior mostró que las averías se debieron a los efectos combinados de la degradación de las estructuras debida al enveje-



Arreglo típico de una chimenea de concreto reforzado

cimiento de las mismas y a un diseño deficiente.

Para conocer la forma en que un sismo podría afectar una chimenea, existen diversos métodos descritos en manuales y reglamentos; por ejemplo, el *Manual de diseño de obras civiles de la CFE* considera dos métodos de análisis sísmico: el estático y el modal espectral. En términos generales, el primero puede usarse para chimeneas menores que 60 m, ya que es

relativamente fácil aplicarlo. El segundo, puede emplearse sin restricciones; sin embargo, se recomienda, para evaluar estructuras muy esbeltas—debido a que en éstas ocurren ciertos fenómenos—en cuyo caso, es necesario calcular varios modos de vibrar de la estructura.

El cálculo del periodo de vibración de estructuras convencionales es relativamente sencillo. Para fines de análisis, éstos pueden idealizarse como un sistema de

masa-resorte, en el que la masa es el peso de un entrepiso y el resorte la rigidez dada por los elementos resistentes (columnas y muros). Las chimeneas, en cambio, no pueden considerarse como sistemas de este tipo; tienen que tratarse como un elemento continuo cuya masa está distribuida de cierta manera a lo largo de la estructura.

Los análisis estáticos, por lo regular, llevan a calcular, para estructuras bajas, fuerzas mayores que las que se derivan de análisis dinámicos, y pueden considerarse por eso como más conservadores; sin embargo, no toman en cuenta los efectos dinámicos, cuya superposición puede invalidar las conclusiones a que conducen.

Viento

Cuando se analiza el comportamiento de las chimeneas frente a la acción de los vientos se hacen varias consideraciones. En principio, se tiene que considerar la importancia de la estructura, de la que depende la selección del viento de diseño. El viento de diseño, en casi todos los países, se escoge como el máximo que aparece en un lapso de 50 años. Una vez definido el viento de diseño, existe un conjunto de métodos más o menos estandarizado, para calcular los efectos del viento sobre la estructura.

Debido a que las chimeneas son estructuras esbeltas, el viento puede provocar que oscilen perpendicularmente a la dirección del fluido. Es importante tomar esto en cuenta, pues tales oscilaciones transversales, además de incrementar los esfuerzos en el fuste, pueden deformar —ovalizar— la chimenea, en particular cuando son de acero, material que se utiliza en espesores mucho menores que el concreto o la mampostería.

Como ocurre con los sismos, existen diversos criterios para evaluar los efectos que produce el viento en las construcciones que, aunque parten de diferentes hipótesis, establecen procedimientos semejantes para evaluar la respuesta de las chimeneas, tanto estática como dinámica. En general, distintos reglamentos establecen que una chimenea se analice, suponiendo que el viento actúa por lo menos en dos direcciones horizontales perpendiculares entre sí y considerando los efec-

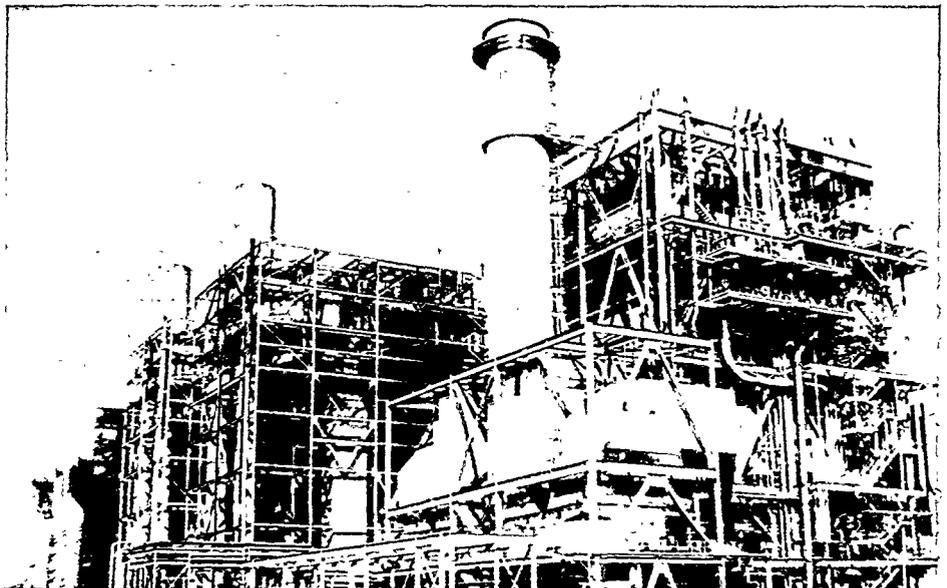
Minimizar la contaminación, un aspecto del diseño de chimeneas

La conversión de energía almacenada químicamente en un combustible a otro tipo de energía, por medio de la combustión, está acompañada por el desecho de energía inutilizable y de materia de desperdicio, que en la mayor parte de los casos se tienen que descargar en la atmósfera mediante chimeneas. A consecuencia de ello, el aire sufre una degradación que produce problemas de contaminación con repercusiones en la ecología. Esta contaminación potencial puede evitarse mediante un diseño adecuado de las chimeneas.

Los contaminantes de fuentes estacionarias de combustión se dividen en materiales gaseosos y en partículas sólidas y líquidas. Asimismo, los contaminantes que se originan en un proceso de combustión se clasifican en primarios —los que descarga directamente la chimenea— y secundarios —los que se forman en la atmósfera por medio de reacciones químicas a partir de los primarios—. La composición de estos elementos desechados se relaciona tanto con la composición del combustible quemado como con la intensidad de la combustión.

Para combatir este problema, se han establecido, por un lado, normas de calidad del aire, que definen las condiciones máximas permisibles de contaminantes en la atmósfera. Con base en estas normas, se estudian diversas acciones, una de éstas se vincula con las características y configuración de las chimeneas. Investigadores en el campo consideran que cuanto mayor sea altura de la chimenea tanto mayor será la facilidad de dispersión de contaminantes, siempre y cuando se analicen las condiciones meteorológicas del lugar. Por otro, se cuenta con programas de cómputo como auxiliares en el manejo del alto número de cálculos necesarios para determinar la precipitación de partículas sólidas y la emisión de gases en relación con los diferentes parámetros de la chimenea, tales como temperatura del gas, velocidad, peso de las partículas sólidas emitidas por hora y volumen de los gases. Asimismo, se analiza el comportamiento de las partículas una vez que salen de la chimenea. Lo anterior, se correlaciona, entre otros, con las condiciones de operación, el costo, la ubicación, el espacio, el uso y la altura de las chimeneas para seleccionar el tipo más adecuado.

El diseño de una chimenea es el resultado de un esfuerzo multidisciplinario, en el que se tienen que resolver diversos problemas, uno de ellos es minimizar la contaminación por este medio.





tos: a) arrastre estático; b) empujes dinámicos paralelos y transversales al flujo principal causados por turbulencia, y c) vibraciones transversales al flujo causada por vórtices alternantes.

El arrastre es la suma de empujes y succiones. Cuando un cuerpo se opone a un flujo, el lado que queda en contacto con el fluido sufre un empuje, en tanto que en el lado opuesto, al "escurrir" el flujo por las paredes se forma un vacío o presión negativa, llamado succión. La combinación de ambos esfuerzos tiende a desplazar la estructura en la misma dirección. A esta combinación de empuje y succión se le conoce como arrastre. Su efecto equivale a transformar la velocidad media del viento en presiones estáticas que actúan sobre el área proyectada de la chimenea en bandas de carga uniforme cuyo valor varía con la altura.

Una característica peculiar del viento es la ráfaga o turbulencia. Esta es una variación, en ocasiones violenta, de la velocidad del viento. Como éste no sopla todo el tiempo con velocidad uniforme sino que tiene variaciones en el tiempo y en el espacio, para tomar en cuenta su efecto se

introduce un factor, llamado de ráfaga, que considera el empuje de un viento no uniforme. Así, el efecto dinámico en la dirección del viento debido a las ráfagas puede calcularse como el que produciría un empuje estático, multiplicado por el factor de ráfaga.

Temperatura

La temperatura es quizá una de las sollicitaciones menos conocidas. Todos los estudios que se han hecho en torno a chimeneas relacionados con la temperatura se basan en consideraciones elásticas, que pueden resultar buenas para materiales con un determinado tipo de comportamiento; es decir, lo que funciona para el acero, no lo hace para la mampostería ni para el concreto, que difícilmente pueden considerarse materiales elástico-lineales. Esto ocasiona que en la práctica aparezcan en las chimeneas daños, que incluso se suponen normales, debidos a la acción de la temperatura, tales como el agrietamiento de paredes.

La diferencia de temperaturas que se tiene entre los gases que corren por el interior de la chimenea y el ambiente, resulta en una desigual dilatación térmica, de expansión o de contracción, que inducen esfuerzos que pueden agrietar tanto horizontal como verticalmente la mampostería y el concreto.

Las grietas en las chimeneas construidas con esos materiales son sumamente perjudiciales por varias razones. Las principales son la corrosión y el deterioro del refuerzo, en el caso de concreto reforzado o de mampostería con bandas horizontales de refuerzo en el exterior. Otros problemas causados por las grietas son la filtración de flujos de gases y el ataque ácido sobre estructuras exteriores a las chimeneas.

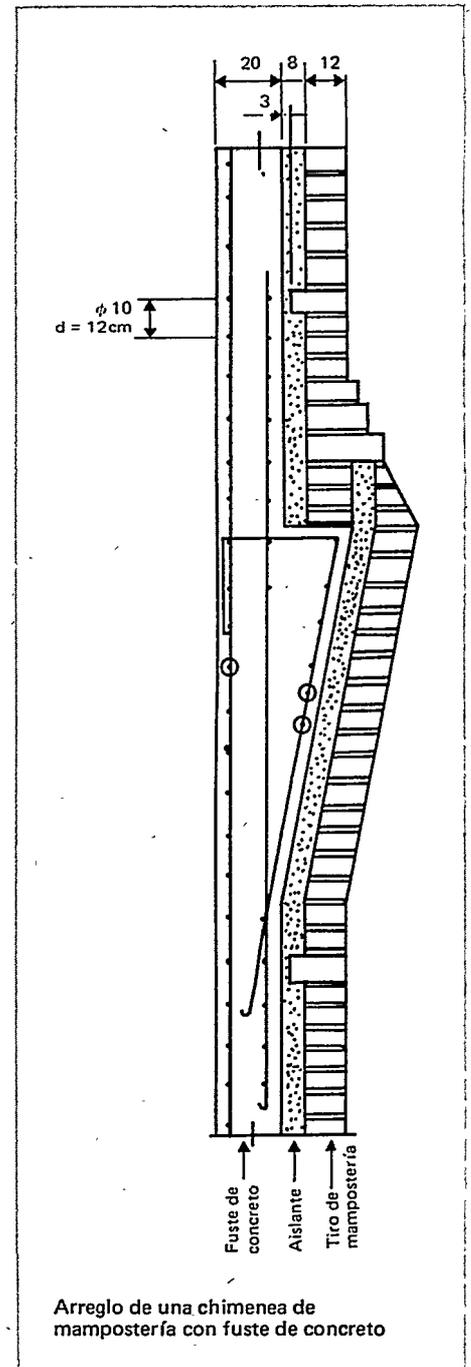
Para evitar estos daños es necesario lograr un buen diseño térmico de la chimenea, en especial en lo relacionado con la determinación de las dimensiones generales requeridas por el cálculo termodinámico y con la elección de un aislamiento adecuado.

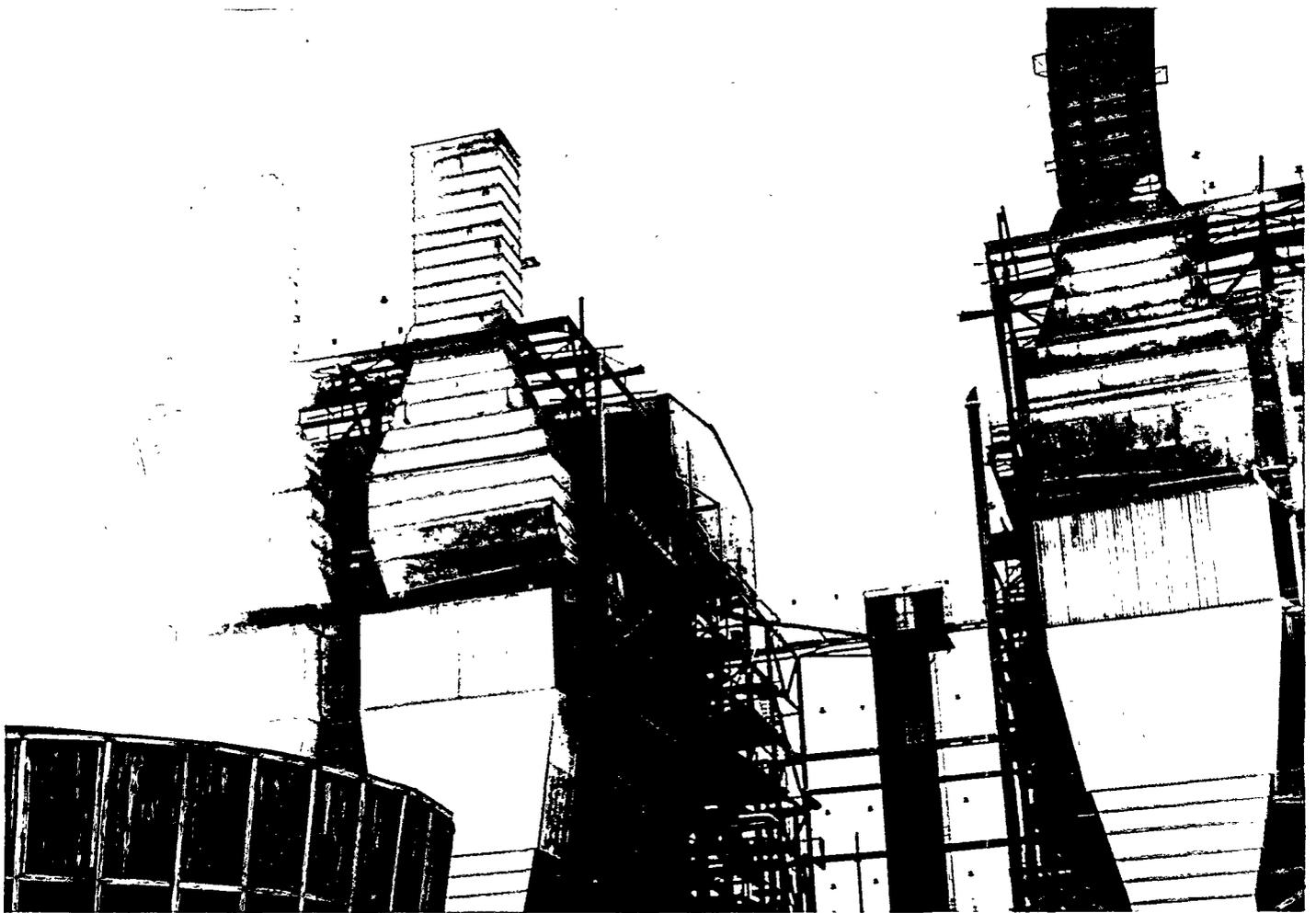
Materiales

Como se menciona en este artículo, existen básicamente tres materiales con los

que pueden construirse chimeneas (mampostería, concreto y acero). No necesariamente uno de ellos tiene más ventajas que los otros; lo que importa es determinar, para un caso concreto, cuál conduce a la solución más económica.

Para el diseño de chimeneas de cualquiera de los tres materiales mencionados, el Departamento de Ingeniería Civil, del IIE, ha propuesto procedimientos en los que se recomiendan, por ejemplo, méto-





dos para determinar los esfuerzos debidos a carga muerta, sismos, viento o gradientes de temperatura, y fórmulas para estimar las combinaciones de esfuerzos debidos a las acciones antes mencionadas. Todas esas recomendaciones se basan en hipótesis elásticas.

En el caso del acero, existen referencias que confirman el buen comportamiento de este material cuando se le da un mantenimiento preventivo conveniente y se revisa periódicamente. En chimeneas de acero se presenta con frecuencia el problema de la corrosión, por lo que se han propuesto algunas normas que toman en cuenta la naturaleza corrosiva de los gases.

Asimismo, se considera que si la mampostería tuviera suficiente resistencia, sería un material óptimo, porque se ha constatado que sería una buena solución para los problemas de corrosión y gradientes

de temperatura. Por estas razones, es importante realizar investigaciones en torno a este material para establecer un conjunto de métodos de diseño y construcción de chimeneas como una opción económica, aun ante la acción de viento y sismo.

Actualmente, la mampostería es uno de los materiales más usados con fines constructivos; sin embargo, en México no ha sido posible hacer extensivo su uso en estructuras especiales, como chimeneas, por la elevada sismicidad de muchas regiones, la acción de vientos intensos y porque no existe abundante información sobre nuevas técnicas de construcción ni en torno a las propiedades de materiales y morteros especiales.

Las chimeneas de concreto son las que más se han estudiado; sin embargo, no se han llegado a establecer procedimientos

que consideren el comportamiento real del material.

Conclusiones

El Departamento de Ingeniería Civil elaboró la versión final de programas de diseño asistido por computadora de chimeneas para centrales termoeléctricas, mediante los que el usuario podrá plantear diversas opciones y seleccionar la más adecuada, con base en los resultados que obtenga.

Asimismo, se han detectado varios campos en los que es posible realizar investigaciones adicionales que conduzcan a diseños más apegados al comportamiento real de los materiales. Se considera que el objetivo será llegar a establecer un diseño por estados límite que tome en cuenta el carácter aleatorio tanto de las acciones como de los materiales.

Modelado de los sistemas nucleares del simulador de adiestramiento de la central de Laguna Verde*

Paulatinamente, las centrales nucleares se impondrán como alternativa para sustituir otros tipos de centrales eléctricas convencionales. México decidió construir la primera central nucleoelectrica como resultado de diversos estudios técnico-económicos, cuya conclusión fue la competitividad entre los costos de generación nuclear y los costos de generación por medio de fuentes energéticas convencionales.

Además, la asimilación de esta nueva tecnología permitirá contar con un equipo humano capacitado para desarrollar futuros proyectos de independencia tecnológica. Un paso en esta dirección es el porcentaje de integración nacional alcanzado en la construcción y puesta en marcha de la central nuclear de Laguna Verde (CNLV), que es de un 53% aproximado, y que probablemente podrá rebasar el 70% para las próximas centrales nucleoelectricas.

En la actualidad, el proyecto de construcción y puesta en marcha de la CNLV tiene un avance de alrededor de 91% en la unidad 1, y de 42%, en la unidad 2. Se planea que la carga de combustible para la primera unidad se realizará en septiembre de 1986, iniciándose la fase operacional del proyecto. Con esto, el país tendrá en la energía nuclear un apoyo más para su desarrollo industrial.

Introducción

Desde el inicio de las actividades del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), en 1975, su Junta Directiva, presidida por el director general de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), señaló la necesidad de que el IIE apoyara, en los campos de su competencia, la realización del proyecto de la CNLV. A la fecha, su participación se ha concretado en diferentes actividades, entre las que destacan el diseño y la construcción del simulador para el adies-

tramiento de operadores de centrales nucleares, cuya instalación en Laguna Verde se prevé para finales de 1986.

La decisión de la CFE de solicitar al IIE su colaboración para el desarrollo del simulador se fundamentó, principalmente, en los resultados de diversos estudios que demostraban que era más económico contar con un simulador propio que realizar el adiestramiento y la capacitación de operadores en instalaciones del extranjero. Asimismo, era menos costoso construirlo en el país que importarlo.

Anteriormente, la colaboración entre el IIE y la CFE había hecho posible la construcción de un simulador para centrales termoeléctricas, el cual se encuentra en operación desde 1983. Esto permitió

crear las bases tecnológicas para desarrollar el simulador de una central nuclear, que comparado con el de una central termoeléctrica, es más complejo y varias veces mayor en cuanto a dimensiones físicas se refiere.

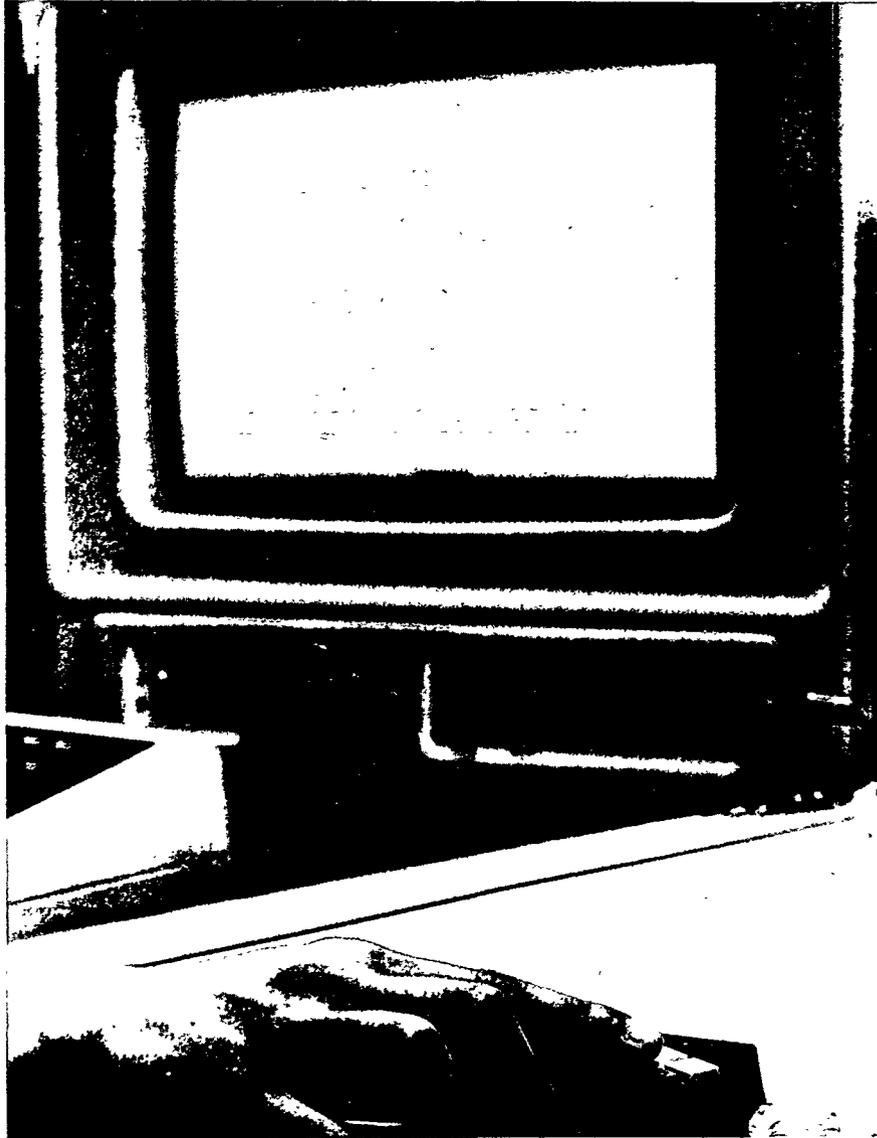
Un simulador de adiestramiento de operadores de una central nuclear de potencia consiste fundamentalmente en una réplica del cuarto de control de la central y de códigos numéricos instalados en una computadora, éstos generan señales que reproducen el comportamiento dinámico de los sistemas de la central.

Para el IIE, el simulador de la central nuclear es un esfuerzo interdivisional, en el que la responsabilidad recae sobre la División de Sistemas de Potencia. El De-

* Este artículo fue elaborado por Lucía González, del Departamento de Difusión Tecnológica, bajo la supervisión técnica del doctor Jaime Morales, investigador del Departamento de Energía Nuclear, de la División de Fuentes de Energía, del IIE.

MX9800260

proyectos especiales



Desarrollo de herramientas para apoyar
el diseño de estructuras de transmisión de
energía eléctrica

Sistema integral para el diseño asistido por computadora de torres de transmisión*

El aprovechamiento de las ventajas que ofrece el diseño asistido por computadora, a través del sistema integral para el diseño estructural de torres de transmisión (SIDETT), contribuirá a agilizar y mejorar el diseño de las estructuras que enlazan los centros de generación de energía eléctrica con los consumidores.

El incremento de la economía y de la calidad del servicio eléctrico constituye el objetivo fundamental de las empresas encargadas de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica. El diseño económico y confiable del gran número de torres de transmisión que se requieren para satisfacer las necesidades de energía de los usuarios contribuye de manera significativa al cumplimiento de ese objetivo. Hoy en día, los diseñadores disponen de programas de computadora que los auxilian en las tareas de análisis y diseño estructural y que les permiten lograr, en menor tiempo, torres de transmisión más ligeras y a la vez confiables.

Con el propósito de agilizar y mejorar aún más el proceso de diseño; aprovechando las ventajas que ofrece el empleo de las computadoras, el Departamento de Ingeniería Civil, de la División de Estudios de Ingeniería, elabora el SIDETT, que integrará todas las actividades que se requieren en el proceso de diseño de torres de transmisión y, en forma interactiva, permitirá analizar, en menor tiempo, un número mayor de opciones de diseño.

El doctor Vicente Guerrero, jefe del

* Este artículo fue elaborado por Gabriel Nagore del Departamento de Difusión Tecnológica, de la División de Información Tecnológica y Desarrollo Profesional, bajo la asesoría del doctor Vicente Guerrero Flores y del maestro en ciencias Julio S. Santana, ambos investigadores del IIE.

Departamento de Ingeniería Civil, de la División de Estudios de Ingeniería, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), explica las razones por las que se decidió desarrollar el SIDETT. "El Departamento ha colaborado en diversos proyectos con la Gerencia de Proyectos de Transmisión y Transformación (GPTT), de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en torno al diseño de torres autosoportadas y de retenidas. Durante el proceso de esos trabajos nos dimos cuenta que sería muy conveniente automatizar todo el proceso de diseño, desde las etapas de prediseño de la estructura hasta la elaboración de los planos de detalle, a fin de agilizarlo y de mejorarlo.

"En el Departamento de Ingeniería Civil —continúa— se han elaborado (en muchas ocasiones bajo el patrocinio de la GPTT) varios programas de computadora relativos al diseño de torres de transmisión, que son independientes y que se aplican en diferentes etapas del diseño. Entre otros, se cuenta con el programa 'Diseña-torres' que realiza el análisis y diseño estructural de torres autosoportadas y de retenidas, con un programa para el cálculo y diseño de cimentaciones, con otro para la estimación de los valores de las cargas sobre las estructuras, cuyos resultados alimentan el programa de diseño. Asimismo, se han elaborado programas que permiten calcular flechas y tensiones en los conductores de las líneas o bien, estimar las presiones de viento y

distribución de las mismas sobre la estructura, además, se cuenta con un programa que permite la elaboración de planos por medio de la computadora.

"Sin embargo —añade el Jefe del Departamento de Ingeniería Civil— la utilización de todos estos programas para llevar a cabo el diseño completo de una estructura implica un esfuerzo considerable por parte del diseñador, sobre todo si se considera la cantidad de información que debe pasarse de un programa a otro, etc. Por ejemplo, después de ejecutar el programa correspondiente al cálculo de cargas, se tiene que elaborar un modelo gráfico de la estructura sobre el que se anotan los valores calculados. Este modelo se utiliza después para realizar el análisis y diseño de la estructura. Estas 'interfases', que aún se requieren entre un programa y el siguiente en el proceso de diseño de una torre de transmisión, incrementan de manera significativa la posibilidad de que se cometan errores.

"El aspecto más importante del código SIDETT es que aprovechará todos los programas que hemos desarrollado para el diseño de estructuras de transmisión de energía eléctrica, para constituirse en un sistema adaptable de tipo CAD/CAE (Computer Aided Design/Computer Aided Engineering). Con este sistema se liberará al diseñador de tareas rutinarias que consumen demasiado tiempo; dichas tareas se

efectuarán en forma automática. Esto contribuirá a que el diseñador concentre sus conocimientos y experiencias en los problemas del diseño que sólo él puede resolver para lograr estructuras más económicas y confiables" concluye el doctor Guerrero.

Estructura del SIDETT

Este sistema incluirá un programa maestro que coordinará la ejecución eficiente de todos los programas independientes que permiten diseñar las estructuras de transmisión. Incluirá también una serie de subprogramas de enlace que, con apoyo en bases de datos (catálogos de torres, de perfiles disponibles en el mercado, valores de presión de viento, condiciones de los sitios de instalación, etc.), automatizarán los procedimientos manuales ("interfases") que es necesario realizar entre programa y programa. Estas bases de datos se formarán conforme se desarrolle el SIDETT y constituirán una fuente de información que el diseñador podrá consultar en forma automática. Apoyándose en ellos, será posible, por ejemplo, recuperar la información sobre un diseño anterior que se asemeje al que en ese momento se realiza, para tomarlo como base y ahorrar tiempo y trabajo.

Los diversos subprogramas conducirán, en forma interactiva, al diseñador en todas las fases de diseño, desde la configuración preliminar (silueta) de la torre hasta la elaboración de los planos de detalle de las estructuras. Dichos subprogramas permitirán el diálogo entre la máquina y el diseñador de manera que éste pueda seguir todo el proceso de diseño. Lo anterior caracteriza a los sistemas de diseño asistidos por computadora. El diálogo hombre-máquina contribuirá a que se logren diseños óptimos, aun cuando el diseñador no cuente con mucha experiencia, imprescindible cuando se efectúa el proceso en forma manual. Los principales programas del SIDETT se muestran en la figura 1.

Los programas "Flechas y tensiones", "Medio ambiente", "Cargas constantes" y "SIGRASITT" (sistema gráfico interactivo para el diseño geométrico de siluetas de torres de transmisión) definen la primera fase del diseño en la que se establece la configuración preliminar de la silueta, de acuerdo con las restricciones eléctricas y

contextos

Diseño asistido por computadora

Jorge Iván Vilar
Vicente Guerrero

La aparición de las computadoras revolucionó el mundo de la técnica y la ingeniería en general. Originalmente, estos equipos se concebían únicamente como máquinas para la automatización de cálculos. Conforme se fue ampliando su capacidad, su aplicación se esparció hasta llegar a límites no imaginados. El aumento en la memoria de estas máquinas y la posibilidad de manejar arreglos dio paso a la utilización de métodos matriciales de análisis que antes se habían desechado por su complejidad. En los años cincuenta, se utilizó por primera vez el método elemento finito en problemas de ingeniería, en la industria aeroespacial. A partir de ello, se han derivado numerosas aplicaciones técnicas.

Con el paso del tiempo, las computadoras se han hecho más complejas, en cuanto a capacidad y a equipos periféricos. La aparición de pantallas de rayos catódicos y dispositivos —que permiten un trabajo interactivo— incrementó grandemente la gama de aplicación de estas máquinas. La posibilidad de una comunicación visual facilitó la interpretación de los resultados obtenidos. Una primera aplicación de las gráficas por computadora consistió en desarrollar programas de dibujo. Uno de los pioneros en esta rama es Iván Sutherland, quien desarrolló un programa de *software* denominado "Block de dibujo". Este es el origen de una nueva época en la vida de las computadoras: la era CAD (dibujo asistido por computadora).

Han aparecido, con los años, nuevas disciplinas relacionadas con el diseño asistido por computadora. Hoy es común usar términos como CAE (ingeniería asistida por computadora), CAM (manufactura asistida por computadora), CADD (dibujo y diseño asistido por computadora), y otras más. Las

ramas con mayores desarrollos de este tipo de sistemas son la ingeniería civil, la arquitectura, la ingeniería eléctrica y la ingeniería mecánica. Algunas de las ventajas de la aplicación de los sistemas CAD se listan a continuación:

- a) Se acelera el proceso de diseño.
- b) Se mejora la calidad de productos.
- c) Se pueden solucionar problemas complejos.
- d) Se mejora el aprovechamiento de recursos humanos.
- e) Se reducen costos.

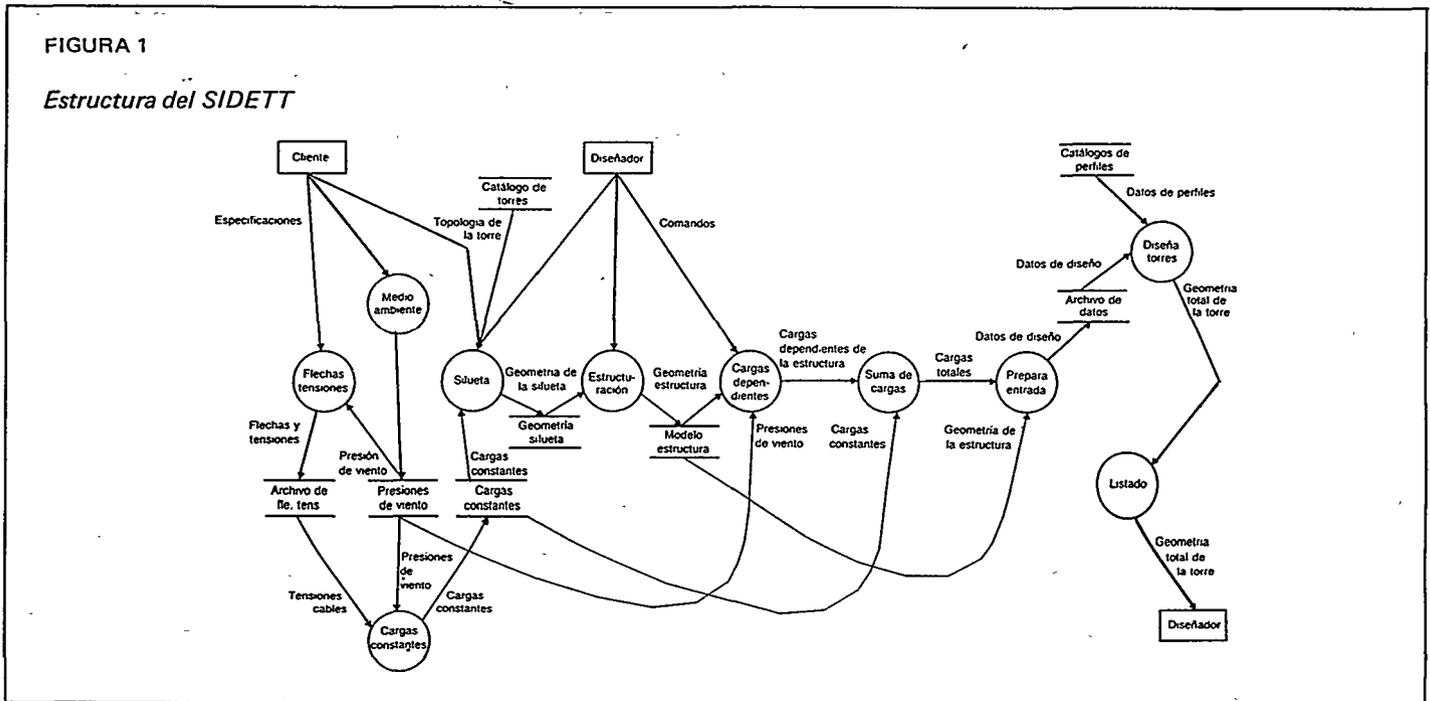
Características de los sistemas CAD

Un sistema CAD se compone de una computadora y una serie de equipos periféricos, cuyas características varían entre fabricantes y en función de su aplicación. Los equipos se arreglan formando estaciones de trabajo, de modo que el usuario disponga de las herramientas necesarias para realizar cómodamente su trabajo. Las características de estas estaciones se explican más adelante.

Desde el punto de vista de su forma de operación, los sistemas CAD pueden centralizarse o descentralizarse. Los primeros se encuentran concentrados en un área reservada, dependiendo de un solo procesador. Este equipo central debe ser muy poderoso, ya que deberá proporcionar apoyo a un gran número de estaciones que compartirán su capacidad, funcionando en tiempo compartido. A pesar de que se obtiene un manejo más racional de la máquina, estos sistemas tienen la desventaja de que una interrupción en el sistema afectará a todos los usuarios. Por otra parte, los sistemas descentralizados funcionan en forma de redes, en las cuales se

FIGURA 1

Estructura del SIDETT



las condiciones a las que se someterá la estructura en el sitio de instalación.

Del programa SIGRASITT sigue el de estructuración que define las características geométricas generales de la estructura en el espacio tridimensional. Los programas "Cargas dependientes", "Suma de cargas" y "Prepara entrada" afinan en detalle el modelo que analizará y optimará el programa "Diseña-torres". Este, apoyándose en los programas "Catálogos de perfiles" y "Listado", optimará el diseño, a la par que calculará el peso de la estructura y, por tanto, su costo.

El doctor Guerrero señala que por el momento la mayor parte de los programas que integrarán el SIDETT se han concluido. "Falta terminar —añade— el de estructuración en tres dimensiones, el de listado, así como el programa maestro y los subprogramas. Consideramos que el SIDETT estará concluido a principios de 1988."

El programa SIGRASITT

La posibilidad de analizar y modificar, en tiempo real, diferentes configuraciones preliminares de las siluetas de las torres de transmisión constituirá una de las características principales del SIDETT. Tal es la función del programa SIGRASITT, que

junto con el programa Diseña-torres constituye la parte medular del SIDETT.

Las ventajas fundamentales de este sistema interactivo son la reducción del tiempo necesario para elaborar la configuración preliminar o silueta de la torre, así como la posibilidad de modificarla, a fin de considerar diversas opciones de acuerdo con las restricciones tanto eléctricas como mecánicas. En este renglón, la importancia radica en que la realización de una nueva silueta de la torre, tarea que se efectúa para optimar el diseño, requiere mucho tiempo y trabajo por parte del diseñador. Con el programa SIGRASITT el tiempo que se emplea en esta tarea se reducirá de tres semanas a unas cuantas horas.

El programa SIGRASITT considera la segunda etapa del proceso de diseño de torres de transmisión. En la primera se determinan los requisitos eléctricos y geométricos de la estructura y se calculan las acciones externas (fuerzas) a las que se someterá. En la segunda, se elabora la configuración básica bidimensional, la cual debe cumplir los requisitos fijados en la primera etapa y resistir las acciones externas; aquí es donde se aplicará este sistema gráfico. El proceso de diseño sigue con la transformación de la silueta en un modelo tridimensional y la estructuración completa de la torre; después de esto se realizan el

análisis y el diseño de la estructura y, por último, se dibujan los planos de detalle y se elaboran las listas de partes, así como las de sus dimensiones, para de ahí proceder a la fabricación y al montaje.

El cumplimiento de los requisitos eléctricos y geométricos en la elaboración de las características preliminares de la torre tiene por objeto garantizar el aislamiento eléctrico de la línea de transmisión en cualquier condición de operación. Es por ello que en esta etapa deben observarse un conjunto de distancias mínimas y máximas y una serie de ángulos de protección (véase la Fig. 2) entre los elementos de la torre; estas distancias y ángulos se calculan a partir de los voltajes de diseño y de las condiciones climáticas del sitio de instalación.

Tomando como punto de partida el tipo de torre que se diseñará y las restricciones eléctricas que definen la geometría básica de la torre, así como las fuerzas externas que actuarán sobre ella, el diseñador propone una configuración bidimensional a la que se denomina silueta de la estructura. Este proceso implica la realización de dibujos y cálculos que aseguren el cumplimiento de todas las restricciones. Posteriormente, se seleccionan, en forma preliminar, los elementos estructurales de la torre. Se efectúa un análisis de la es-

contextos

distribuyen los recursos en las zonas en que se necesitan, evitando así que el usuario tenga que trasladarse de un sitio a otro. En este caso, una falla en alguno de los procesadores no interrumpirá el trabajo total del sistema. Cada una de las estaciones de trabajo puede ajustarse a las necesidades del área en que se localice. Entre las desventajas de estos sistemas se encuentra la utilización de gran número de periféricos, algunos de los cuales estarán "ociosos" durante periodos relativamente largos, en tanto que otros funcionarán a tiempo completo.

En función del origen de los componentes, existen sistemas integrados o muy integrados. En los últimos, el proveedor proporciona todo el equipo junto con los dispositivos periféricos y el *software* de aplicación. Estos sistemas se conocen también como sistemas llave en mano, pues usualmente se enfocan a usos específicos; debido a ello, dependen casi completamente de los fabricantes, sin permitir que el usuario lleve a cabo sus propios desarrollos o la adaptación del *software* a necesidades extendidas. En los sistemas integrados, tanto los componentes como el *software*, pueden adquirirse en varias compañías con equipos compatibles, dándole al usuario mayor libertad en su uso, ya que puede adaptar o ampliar los programas para cubrir sus necesidades o incluso llevar a cabo sus propios desarrollos.

La estación de trabajo es el núcleo de los sistemas CAD, donde el diseñador se sienta frente a la terminal de la computadora, interactuando con ella para crear sus diseños o modificarlos. La estación de trabajo típica cuenta con una pantalla gráfica y alfanumérica, un teclado alfanumérico y una tableta digitalizadora o algún otro medio de identificación de datos gráficos. Estos últimos dispositivos son conocidos también como interactivos, debido a que proporcionan un medio de comunicación con la máquina a manera de diálogo. También pueden incluirse dispositivos de salida como impresoras o graficadores.

El equipo que constituye una estación de trabajo varía grandemente en función del proveedor y del *software* empleado. En oca-

siones, la estación se conecta a una mini-computadora autónoma que soporta todo el trabajo. De esta forma, se aprovecha toda la capacidad de la máquina, lográndose un alto modo interactivo. Otras veces, es posible tener una computadora de tamaño pequeño para tareas sencillas en forma interactiva, conectándose a una computadora central en la que se llevan a cabo los trabajos más complicados. Muchos proveedores ofrecen facilidades para formar redes de cómputo, con el fin de aumentar la potencia del sistema. La cantidad de equipo periférico y unidades de potencia de las redes es variable. Se obtiene una mayor eficiencia al utilizar una configuración de este tipo, sobre todo si se conecta a una computadora central que ejecute las tareas que requieran un elevado número de cálculos, aprovechando su mayor capacidad y velocidad.

El tamaño y la capacidad de las unidades de proceso central (CPU) es muy variable, dependiendo de los vendedores. Existen sistemas con unidades de 8 o 16 bits, en los que las memorias periféricas alcanzan 70 megabytes en disco y RAM de 4 megabytes. La mayor parte de los sistemas actuales se basa en procesadores de 32 bits, donde existen memorias de 4 megabytes en RAM y de 404 megabytes en discos desmontables, con grandes recursos a precios relativamente bajos. Los sistemas centralizados, cuentan con computadoras hasta de 64 bits, que tienen capacidades aún mayores que las anteriores.

Existe una amplia gama de terminales gráficas de salida, cuyas capacidades van en aumento. El alcance de las terminales se mide en relación con la cantidad de elementos gráficos que utiliza para la creación de las imágenes, llamados "picture elements" (o pixels en la jerga computacional) que define su resolución; la capacidad de utilizar colores y su velocidad.

Las técnicas empleadas para generar una imagen definen dos grandes grupos. El primero incluye las terminales vectoriales (*stroke writing*), en las que los dibujos se realizan por medio de líneas o vectores. En ellas se identifican dos tipos: de almacenamiento

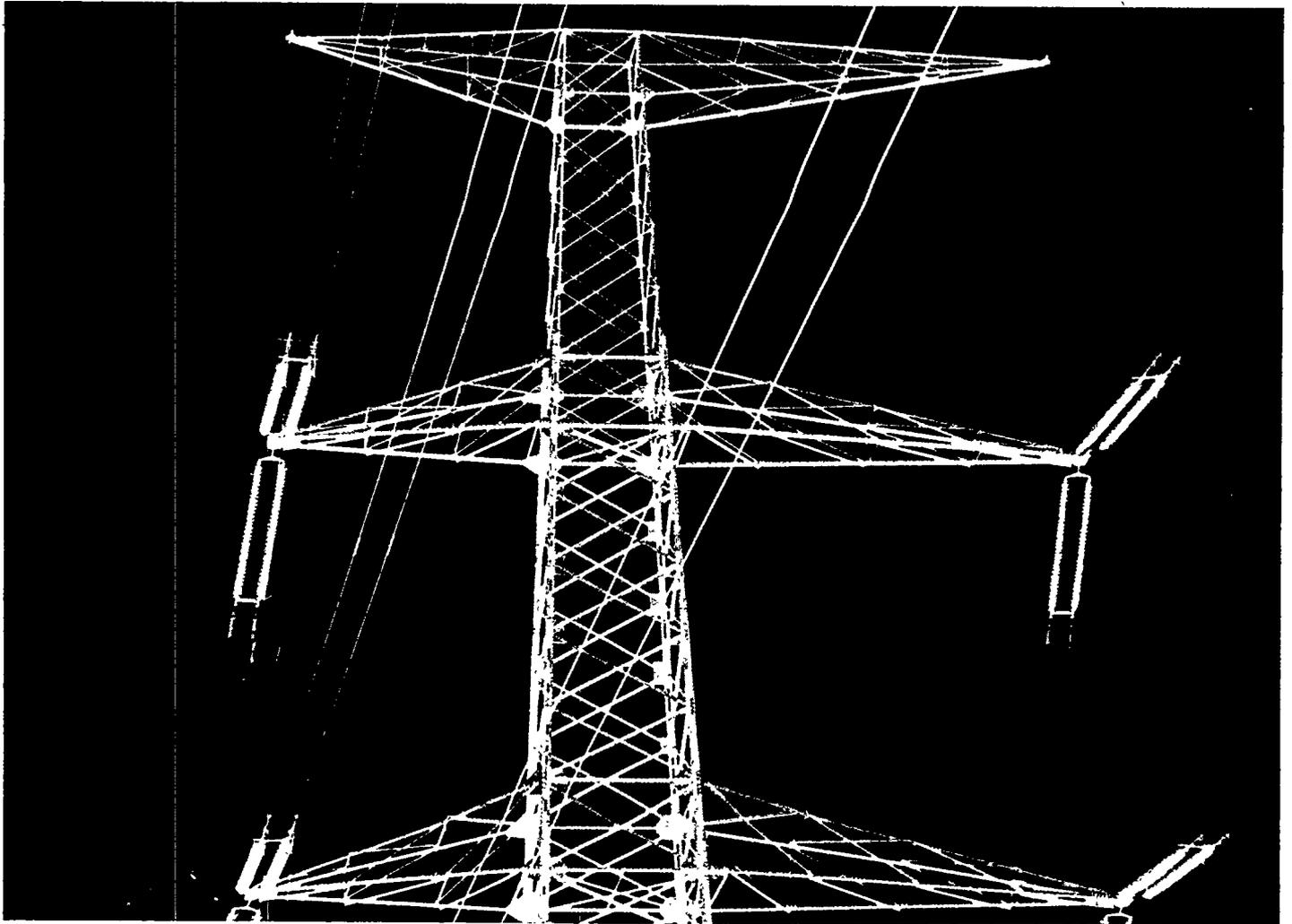
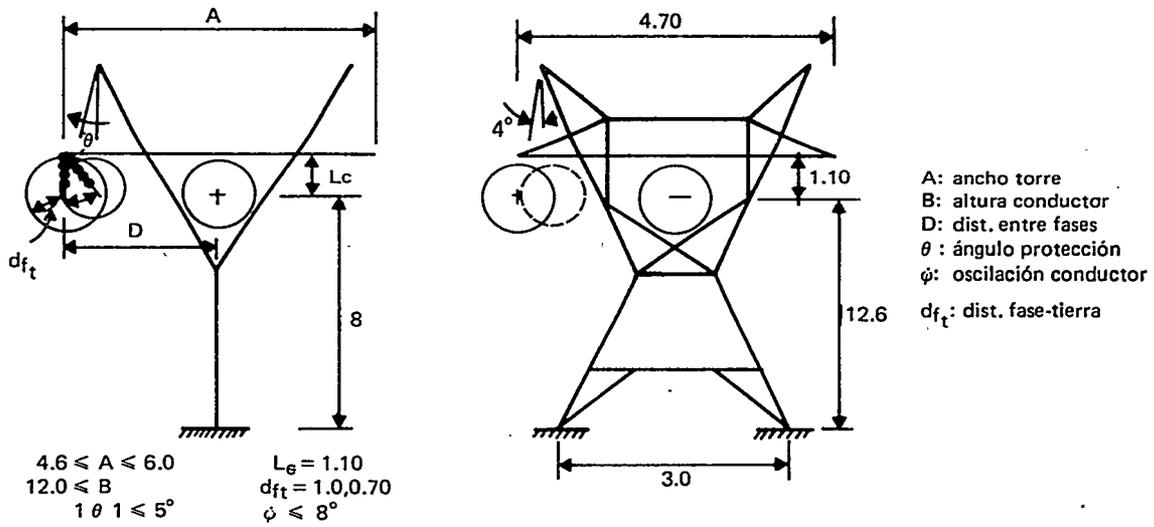
o estáticas y de refrescamiento. Las primeras son normalmente monocromáticas, con muy alta resolución (hasta 4 000 X 4 000 puntos de almacenamiento). Sin embargo, son relativamente lentas al dibujar la imagen (hasta 5 000 pulgadas por segundo). En las terminales de refrescamiento, la imagen completa se expone en cada ciclo de refresco, evitando así el efecto de parpadeo. Su velocidad es alta (entre 680 000 y un millón de pulgadas por segundo), lo cual las hace óptimas para proveer animación.

El otro grupo de terminales gráficas lo forman las pantallas de barrido (o *raster scan*). Estas pantallas consisten en *pixels* localizados en líneas horizontales colocadas en paralelo. Cada uno de estos elementos consta de tres puntos de colores básicos (rojo, verde y azul). Los arreglos típicos son de 512 X 512, 640 X 480, 767 X 767, 1 024 X 1 024 y de 1 280 X 1 024 donde el primer número indica el número de líneas horizontales y el segundo, el total de *pixels* en cada línea. El estándar ofrece 256 tonos de color simultáneos (seleccionados de "paletas" que contienen hasta 16 millones de combinaciones). La selección del color puede llevarse a cabo por medio de tablas; estas terminales incluyen también una memoria de almacenamiento de imágenes (*frame buffer* o *bit map*), normalmente en RAM, que es una matriz de valores de intensidad. Las pantallas de barrido están tomando mucho auge debido a la reducción de los precios de las memorias y los microprocesadores.

Los dispositivos de entrada pueden clasificarse según la información que proporcionan. Los primeros son los teclados y dispositivos sensibles al tacto, que normalmente producen textos (etiquetas e instrucciones). Otros dispositivos indican la ocurrencia de una señal dada. Un ejemplo de este tipo son las plumas de luz que, además, sirven para definir coordenadas con la ayuda de rutinas de *software*. Como su nombre lo indica, la pluma de luz es un dispositivo en forma de pluma que tiene una celda fotosensible en uno de sus extremos. Cuando una luz de cierta intensidad la activa, se genera un impulso que es transmitido a la computadora.

FIGURA 2

Las restricciones y la silueta de la torre



El cambio de la configuración preliminar de una torre de transmisión implica la realización de un gran número de dibujos y de cálculos.

estructura así definida y con base en los resultados de éste y en la experiencia del diseñador, se pasará a la etapa de diseño definitiva o bien, se repetirán nuevamente los pasos anteriores; es decir, el diseñador propone una nueva configuración, lo que implica volver a hacer la mayor parte de los dibujos y cálculos originales.

Definida la configuración preliminar bidimensional, se procede a la elaboración del modelo tridimensional de la torre. Este modelo es el que alimenta a los programas de diseño estructural, los cuales optiman esa configuración. Sin embargo, la optimación que se logra es parcial; es decir, se consigue la estructura más econó-

mica y confiable para esa configuración preliminar. Para obtener la optimación global es necesario analizar varias configuraciones preliminares.

La posibilidad de lograr en menor tiempo y con menos trabajo la optimación global de la estructura por medio del aná-

contextos

En este momento, la máquina toma una cierta acción que depende del comando que se estaba ejecutando en el momento que se produjo la señal. Existen otros tipos de dispositivos interactivos para definir las coordenadas de un punto determinado, entre los cuales se encuentran las tabletas digitalizadoras y las palancas. Las tabletas emplean redes de alambres separados una cierta distancia (digamos un centésimo de pulgada) en dos direcciones x-y, formando una matriz. Una aguja recoge las señales digitales transportadas por los alambres, procesándose en forma lógica la información de aquellos que estén más cercanos al punto del tablero en que se coloque la aguja. Una vez identificados los alambres, pueden definirse las coordenadas del punto de intersección, según la escala con que se esté trabajando. El microdensímetro trabaja en forma similar, sólo que, además de las coordenadas x-y, recoge información del color o tinte de las imágenes, empleando señales de ultrasonido. Los dispositivos de palanca (*joystick*) emplean medios mecánicos para producir voltajes análogos a las direcciones x-y, con base en la deflexión de la palanca. Se han empleado otros dispositivos en menor grado, ejemplos de ello son los interruptores, las perillas giratorias, los teclados especiales y los detectores de sonido.

Entre los dispositivos de salida pueden identificarse dos tipos: las impresoras y los graficadores. Los primeros únicamente tienen la posibilidad de imprimir textos por medio de matrices de puntos, ya sea por caracteres o por líneas. Los graficadores pueden ser de plumas, en los que se distinguen aquellos que utilizan brazos mecánicos que se mueven, estando fijo el papel y aquellos en los que el papel se mueve en una dirección, en tanto que la pluma se desplaza en dirección perpendicular. La calidad que se obtiene

en estos dispositivos es satisfactoria y pueden intercambiarse las plumas para obtener líneas de varias calidades o utilizar tintas de diferentes colores. Existen también graficadores electrostáticos que son bastante rápidos, pero la calidad normalmente es menor que la lograda con los anteriores. Los graficadores por inyección de tinta permiten utilizar colores en diferentes tonalidades, obteniéndose dibujos de alta calidad.

Dibujo por computadora

En general, el ingeniero o el diseñador frecuentemente tienen la necesidad de elaborar planos o dibujos que se utilizan en diferentes etapas del proceso de diseño. La complejidad de los dibujos varía en función de su utilización y de la información que quedará asentada en ellos.

Un dibujo es la representación de un objeto, de una estructura o, simplemente, de una parte de ella, su finalidad es lograr una fácil interpretación de los datos que contiene, tales como elementos que la forman, su detallado, forma de ensamblado, construcción o características geométricas y acabados.

Generalmente, esta tarea es extremadamente laboriosa, por lo que para realizarla se requiere de personal capacitado y de supervisión constante. Es común olvidar la importancia de esta fase del diseño. Con frecuencia se efectúan dibujos muy similares o casi iguales, salvo pequeñas variaciones, debido a cambios en el diseño o por cuestiones constructivas. Lo anterior se traduce en altos tiempos de elaboración de planos.

La computadora se ha utilizado como una poderosa herramienta en la elaboración de planos a lo largo de más de diez años. La

utilización de programas de dibujo (conocidos como CAD) ha permitido un nivel de automatización del proceso. Se dice que un programa de este tipo puede llevar a cabo todas las acciones de un dibujante a excepción de pensar.

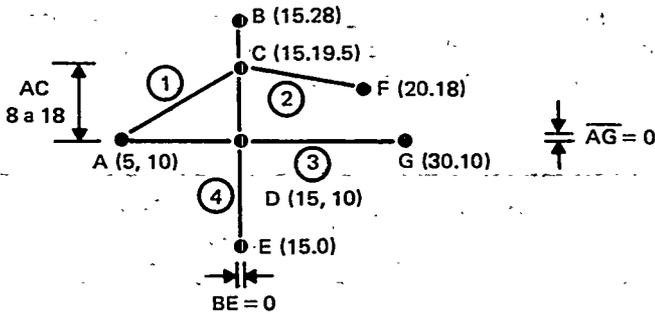
En los sistemas de dibujo auxiliado por computadora, el dibujante se sienta frente a una terminal gráfica que forma parte de una estación de trabajo y utiliza a la computadora como su propio equipo, en lugar de escuadra, compases, transportadores, etcétera.

Este tipo de programas representa la aplicación más sencilla de los sistemas CAD, en cuanto a su alcance. Aunque algunos sistemas de dibujo se han desarrollado enfocados a usos particulares, no puede afirmarse que su utilización se restrinja a ellos, pues siempre pueden aprovecharse sus capacidades para otras aplicaciones.

Normalmente, los dibujos que pueden realizarse con estos sistemas se basan en la utilización de primitivas gráficas que pueden combinarse o superponerse con el fin de crear un dibujo más complicado. El control del programa puede llevarse por medio de comandos tecleados en pantalla mediante el uso de un "lenguaje" especializado. En otros casos, las operaciones se seleccionan de un menú que aparece en pantalla o utilizando plumas de luz o algún otro dispositivo interactivo, como las tabletas digitalizadoras, utilizando plantillas que han sido definidas con anterioridad. De esta forma, pueden irse creando, paso a paso, representaciones a partir de los conceptos básicos del dibujo, tales como los puntos, el trazado de segmentos de recta, círculos y arcos que son almacenados en la memoria de la máquina y pueden

FIGURA 3

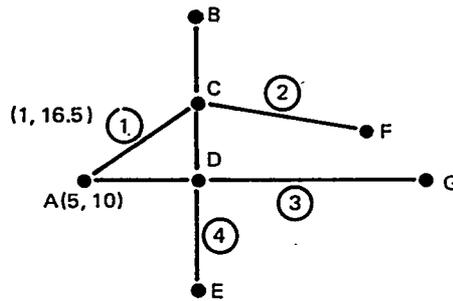
Modelo de una configuración



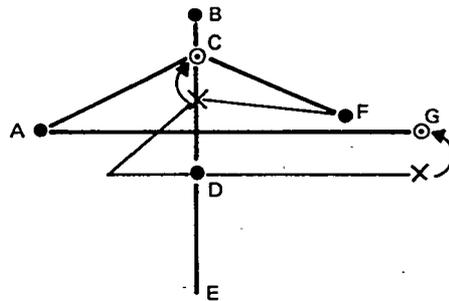
Componente	Variables Descriptivas
Recta ④	extremos = E, B intermedios = D, C
Vértice C	posición (x,y) = (15,19.5) rectas incidentes = ②, ①, ④ restricciones = A C
Restricción AC	vértices = A, C dirección = y separación < mfn, max > = (8, 18)

FIGURA 4

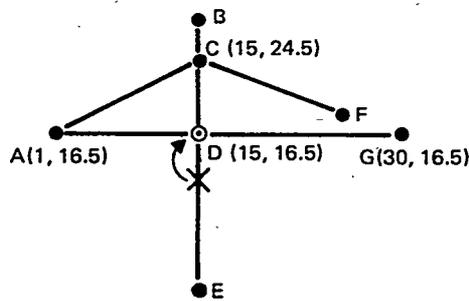
Operación del SIGRASITT



a) Petición del operador:
Mover A
(5, 10) → (1, 16.5)



b) Resultado geométrico



c) Configuración final

lisis de diversas configuraciones preliminares constituye la principal ventaja del programa SIGRASITT.

El SIGRASITT opera con base en una interfaz gráfica interactiva que, a través de una tableta digitalizadora, botones de control y el tablero de una terminal de video, permite al operador modificar, en forma automática, la configuración preliminar de la torre, de acuerdo con las restricciones de diseño. Para ello, el SIGRASITT cuenta con un modelo matemático que representa las características topológicas y geométricas de las silueta de la torre de transmisión, y con un sistema que ejecuta los procesos necesarios para generar y modificar dicho modelo.

A petición del operador y a partir de los datos de entrada (rectas y puntos) relativos a la topología y a las restricciones geométricas, el sistema construye internamente una representación de la silueta de la torre. El operador modifica esta representación para obtener una o varias configuraciones factibles de la silueta. El modelo geométrico y topológico de la silueta se formula con base en la identificación de todos sus componentes (rectas, vértices, restricciones de distancia), de las variables relevantes que los describen (extremos de rectas, coordenadas de vértices, dirección, separación, etc.) y estableciendo las interacciones entre dichos componentes (véanse las Figs. 3 y 4).

El SIGRASITT se encuentra en la actualidad en la etapa de prueba. Consta de cerca de 10 000 líneas de código, lo que da idea del esfuerzo que se ha dedicado para desarrollarlo. Este sistema, además

contextos

accesarse para su impresión en cualquier dispositivo gráfico en el momento que se desee o guardarse para usarlos después. Algunos programas permiten al usuario decidir si desea ver en pantalla el dibujo en tanto lo "ensambla".

La información gráfica se almacena internamente en un archivo, en general en forma numérica. Estos datos son en realidad una representación del dibujo; es decir, una serie de instrucciones necesarias para producir la salida gráfica que corresponda a aquella definida por el dibujante. Dicho archivo puede ampliarse o modificarse en forma interactiva, mediante el programa mismo o utilizando algún editor.

Como se ya mencionó, el dibujo se crea mediante instrucciones que el usuario proporciona, utilizando plumas de luz, tabletas digitalizadoras, comandos tecleados o seleccionando las opciones posibles de un menú que aparece en pantalla. La utilización de las plumas de luz o de las tabletas permite al usuario tomar acciones utilizando símbolos sencillos como círculos pequeños o flechas que la máquina interpreta o simplemente posicionando el cursor en una localidad específica, lo cual evita tener que teclear comandos, facilitando su uso cuando no se tiene mucha habilidad mecanográfica. El uso de menús ofrece la ventaja de evitar memorizar las operaciones existentes o los datos necesarios en cada opción.

Algunos programas permiten al usuario crear sus propios comandos o plantillas, por medio de combinaciones de primitivas gráficas por complicadas que sean; incluso en ocasiones, es posible aprovechar dibujos completos. Para evitar los errores por aproximación en zonas pequeñas del dibujo o simplemente para mejorar su calidad, existe la posibilidad de utilizar acercamientos y transformaciones de la imagen (escalado, rotado, etc.), borrado de regiones y líneas que se emplearon sólo en forma auxiliar, generación por simetría, sombreado y la utilización de amplias gamas de colores puntas y tipos de líneas. En cuanto a dibujo tridimensional, se permite la visión desde diferentes puntos en el espacio, así como la

rotación alrededor de cualquier eje y la obtención de vistas en isométrico.

Modelación geométrica

El modelado geométrico es una de las mayores aplicaciones de CAD en la ingeniería mecánica y civil. A pesar del avance obtenido a la fecha, se estima que esta rama aún se encuentra en la etapa de desarrollo, por lo que se espera que aparezcan mejoras en un futuro no muy lejano. A pesar de ello, las aplicaciones tienen un gran potencial práctico.

La ventaja inherente de estos sistemas sobre los programas de dibujo es que se almacena una representación real del sólido; esto puede llevarse a cabo por medio de las fronteras que limitan el objeto o realizando operaciones lógicas entre sólidos básicos. Existe aún el inconveniente de que, cuando se desea modelar un objeto muy complicado, la cantidad de memoria necesaria para su representación interna puede resultar muy grande.

Al utilizar la modelación de sólidos es posible definir objetos complejos que pueden ensamblarse a partir de objetos sencillos. Este factor ofrece grandes ventajas para los diseñadores, ya que elimina la limitación de tener que pensar en dos dimensiones. Se obtienen vistas desde cualquier ángulo de los objetos, lográndose proyecciones ortogonales, isométricos y vistas en perspectiva, inclusive; se tiene la posibilidad de definir transformaciones en la visión. El diseñador también tiene la opción de ver acercamientos o de trabajar con porciones del modelo, lo que le da mayor capacidad de definición.

Asimismo, la representación del sólido sirve para la generación de mallas para el análisis por medio del método del elemento finito o para la creación de programas de control numérico que se utilizarán en la elaboración del objeto en cuestión. El comportamiento mecánico puede revisarse mediante simulaciones de movimiento.

Debido a lo anterior, si el resultado del análisis demuestra que el comportamiento

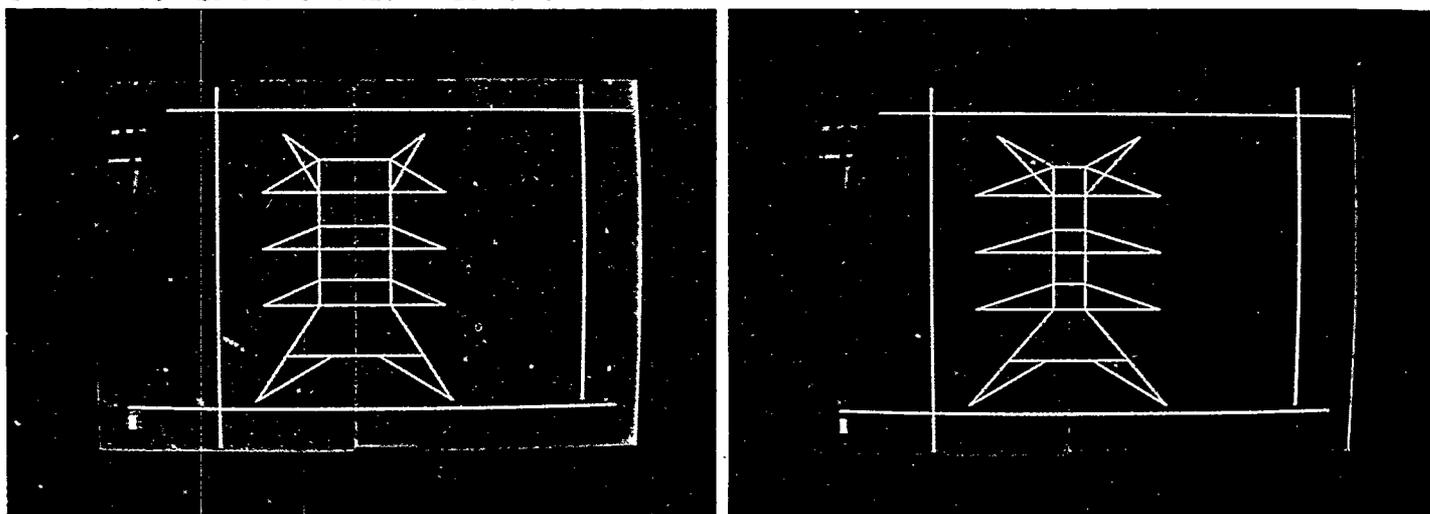
del modelo no es satisfactorio, la modificación del mismo puede efectuarse de una manera sencilla y rápida, sin tener que volver a definir el objeto completo. Así se facilita la obtención de mejores diseños, en tiempos más cortos, pues es posible estudiar un mayor número de opciones. Como resultado, es necesario asegurar una buena comunicación entre estos sistemas y los programas de análisis, ya que la eficiencia del proceso de diseño se verá afectada en forma directa por este detalle.

Los sistemas CAD en la ingeniería estructural

El diseño de una estructura con una cierta topología puede definirse como la selección de las características geométricas de los elementos, de modo que se comporte de una forma segura y eficiente ante las solicitaciones a que se encontrará sujeta durante su vida de trabajo. Lo anterior implica un proceso de análisis-dimensionamiento que se repite hasta que la respuesta de la estructura sea satisfactoria, cumpliendo los requisitos de resistencia.

La utilización de métodos manuales aproximados es aceptable sólo en casos sencillos o para diseños preliminares, debido a las hipótesis simplificadoras que comprende. En general, los errores decrecen en tanto que los cálculos se tornan más complicados. El uso de las computadoras ha dado paso a la aplicación de métodos más elaborados que pueden manejarse en forma matricial. El método del elemento finito se concibió por medio de aproximaciones matemáticas para resolver problemas de estructuras que pueden discretizarse como series de elementos finitos, que se ensamblan en forma continua con grados de libertad en los puntos de unión entre estos elementos. Dichas aproximaciones numéricas se basan en algoritmos propuestos originalmente por Raleigh, Ritz y Galerkin.

Al contar con un programa de elemento finito es posible determinar el comportamiento de sistemas complejos, de grandes proporciones, cuyo análisis sería imposible o poco costeable por otros medios. Los re-



Cambios de la silueta de una torre a través del SIGRASITT. La modificación se realiza a petición del operador respetando las restricciones geométricas compuestas sobre la estructura que se diseña.

de facilitar las tareas de dibujo, toma algunas de las decisiones que en el procedimiento manual son responsabilidad del diseñador.

Mejoras al programa Diseña-torres

La investigación en el área del diseño estructural avanza de manera continua, principalmente en lo que se refiere al mejoramiento de los modelos matemáticos que representan el comportamiento real de las estructuras. En ese caso, se encuentra el programa Diseña-torres, cuya primera versión se concluyó en 1980. "El programa Diseña-torres —apunta el doctor Guerrero— se ha modificado para incorporar los resultados de las investigaciones, tanto teóricas como experimentales, en torno a los modelos matemáticos utilizados en el análisis y diseño estructural. Entre las modificaciones importantes —continúa— destaca la introducción al programa de la capacidad para revisar la estabilidad de cada uno de los elementos estructurales de las torres. Este efecto se consideraba de una manera simplificada en la versión original del programa, asumiendo un factor $k = 1$ y constante para definir la longitud efectiva de pandeo de los miembros de la torre. Sin embargo, en nuestros estudios de laboratorio se ha demostrado que dicho factor no es igual que uno, sino que varía y es función, entre otros parámetros, del valor del nivel de carga sobre el elemento estructural. Este es un resultado importante que actualmente se trata de incorporar al pro-

grama para que cuente con la capacidad de análisis de la estabilidad de los elementos estructurales."

El doctor Guerrero menciona que otra adición importante al programa Diseña-torres está relacionada con los catálogos de perfiles estructurales: "El diseño de torres de transmisión difiere del diseño de otros tipos de estructuras, como los edificios o los puentes. Estas estructuras se diseñan para condiciones particulares y relativamente bien definidas.

"Las torres, por el contrario, podría pensarse que se diseñan 'en serie', y una misma torre puede emplearse en muchos sitios y en más de una línea determinada. Una torre, a menos que se trate de una especial, se diseña para condiciones más o menos generales, de manera que pueda utilizarse más ampliamente; por esa misma razón, algunas de las torres de una línea de transmisión podrían estar sobrediseñadas. Resalta entonces la importancia de que en el diseño de las torres se seleccionen los perfiles para sus miembros con algún criterio de eficiencia.

"En el programa Diseña-torres, se ha depurado el catálogo de perfiles estructurales y se han identificado los ángulos que son eficientes para diversos intervalos de longitudes efectivas de los miembros. Estos datos se han incluido en una matriz y con base en ella pueden diseñarse más racionalmente las estructuras.

"El programa también se ha mejorado en lo que respecta a la eliminación de repeticiones de cálculos innecesarios durante el proceso de diseño; por ejemplo, para cada perfil el programa calculaba sus propiedades geométricas en cada iteración. Se reconoció el hecho de que una vez calculadas las propiedades geométricas no es necesario determinarlas en cada ocasión. En este caso, se creó una base de datos que en forma matricial permite recuperar en forma automática las propiedades geométricas de los perfiles, eliminándose así un gran número de operaciones innecesarias.

"Asimismo, se ha dedicado un esfuerzo importante en la conversión de muchas de las subrutinas del Diseña-torres del lenguaje Fortran IV, con el que se escribió originalmente, al Fortran 77. Este último es un lenguaje estructurado que facilitará considerablemente las revisiones y modificaciones futuras del programa.

"Se ha buscado en todo momento —concluye el doctor Guerrero— optimar las características tanto del Diseña-torres como de los otros programas que integrarán el SIDETT. Esto resulta lógico por el tamaño que tendrá este sistema, y cuanto más eficientes sean sus partes integrantes, tanto mejor será su funcionamiento. Con todo esto se pretende que el SIDETT resulte la más poderosa herramienta con la que un diseñador de torres de transmisión pueda llevar a cabo sus actividades profesionales."

Estudios de estabilidad en sistemas de potencia

Adrián Inda
J. Guillermo Calderón
Raúl Fraga

Uno de los problemas cotidianos que el ingeniero de potencia debe enfrentar tanto en la fase de planeación como en la de operación de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) es el relacionado con la respuesta dinámica de éstos ante la ocurrencia de disturbios.

La herramienta computacional necesaria para realizar estudios de esta naturaleza en los actuales SEP requiere de la conjugación eficiente de técnicas avanzadas de modelación, simulación y programación para hacer su empleo práctico y útil.

En este artículo se presentan los avances logrados por el Departamento de Análisis de Redes en el desarrollo de un paquete digital para el análisis de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia.

Introducción

Los problemas de estabilidad en los SEP pueden clasificarse de acuerdo con diferentes criterios:¹

a) *Magnitud del disturbio*. Disturbios pequeños y disturbios grandes.

b) *Tiempo de análisis de la respuesta dinámica*. Corto, mediano y largo plazos.

Los requerimientos de modelación y las técnicas de solución dependen del tipo de problema que se pretende resolver de acuerdo con la clasificación mencionada. Por ejemplo, puede haber programas de estabilidad útiles para realizar estudios de estabilidad a corto plazo ante la ocurrencia de disturbios grandes que no necesariamente sirvan para hacer estudios de estabilidad de largo plazo ante la ocurrencia de disturbios pequeños.

Uno de los objetivos del Departamento a largo plazo es producir la herramienta necesaria para realizar cualquier tipo de estudio que involucre los criterios ya citados. Sin embargo, hasta el momento se han desarrollado programas de estabilidad útiles para realizar los estudios conocidos como "estabilidad transitoria" y "estabilidad de régimen permanente", esta última a veces denominada estabilidad dinámica.

Los problemas que son posible estudiar con estos programas son:

a) *Estabilidad transitoria*. Respuesta dinámica del SEP a corto plazo ante la ocurrencia de una secuencia de disturbios grandes (generalmente fallas en la red de transmisión, seguidas por operaciones de maniobra para su liberación). Los tiempos de análisis pueden ser hasta de 10 o 15 segundos.

b) *Estabilidad de régimen permanente o dinámica*. Respuesta dinámica del SEP ante la ocurrencia de disturbios pequeños o comportamiento a largo plazo del SEP, después de superar los transitorios rápidos ante la ocurrencia de un disturbio grande. En este último caso, es posible que un SEP sea transitoriamente estable ante la ocurrencia de un disturbio grande y que, debido a las operaciones de maniobra efectuadas para liberar el disturbio, el sistema quede en condiciones tales que presente problemas de estabilidad ante las fluctuaciones normales a que está sujeto durante su operación.

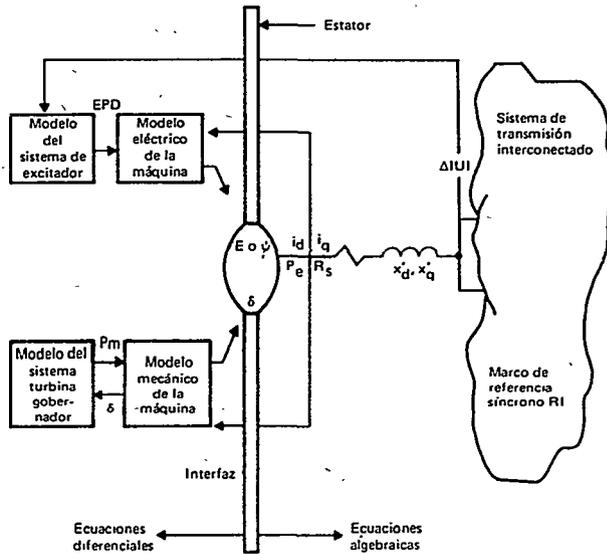
Con el propósito de tener una idea clara de los problemas que se pretenden resolver es necesario definir los distintos tipos de estabilidad:

a) *Estabilidad de régimen permanente o dinámica*. Se dice que un SEP está en una condición de estabilidad de régimen permanente, si ante la ocurrencia de un disturbio pequeño éste llega a un estado de operación normal igual o cercano a su condición inicial.²

b) *Estabilidad transitoria*. Se dice que un SEP es transitoriamente estable para una condición particular de operación y

FIGURA 1

Representación esquemática de una máquina y sus controles conectada a la red de transmisión



un disturbio o secuencia de disturbios grandes, si después de ocurrido el evento es capaz de alcanzar una condición de operación aceptable.²

Estructura analítica del problema de estabilidad

El modelo matemático de un SEP para estudios de estabilidad se compone de un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden y un conjunto de ecuaciones algebraicas.³

$$\dot{\underline{X}} = \underline{f}(\underline{X}, \underline{y}) \quad [1]$$

$$\underline{0} = \underline{g}(\underline{X}, \underline{y}) \quad [2]$$

El conjunto de ecuaciones diferenciales [1] contiene los modelos dinámicos de las máquinas y sus controles y el conjunto de ecuaciones algebraicas [2], las ecuaciones de estator de las máquinas y las ecuaciones del sistema de transmisión.

En el modelo de la máquina síncrona se incluyen tanto las ecuaciones dinámicas del modelo eléctrico como las del modelo mecánico.

El conjunto [1] presenta una estructura quasi-lineal lo que permite expresarlas en forma:

$$\dot{\underline{X}} = \underline{A}\underline{X} + \underline{B}\underline{u} \quad [1.1]$$

donde \underline{A} es una matriz cuadrada, dispersa y diagonal en bloques y \underline{B} es una matriz rectangular, dispersa y una estructura en bloques — \underline{A} y \underline{B} son constantes si se desprecian los efectos de saturación en las máquinas y los límites en algunas variables asociadas con los controles—, y \underline{u} es un vector que contiene valores que dependen de las variables \underline{X} e \underline{y} y representan las can-

tidades de retroalimentación del estator hacia las ecuaciones diferenciales; es decir,

$$\underline{u} = \{Te, |V|, i_d, i_q, \dots\}$$

El conjunto de ecuaciones [2] puede subdividirse en:

$$\underline{l}(\underline{Z}, \underline{V}) = \underline{Y}\underline{V} \quad [2.1]$$

$$\underline{u} = \underline{u}(\underline{Z}, \underline{V}) \quad [2.2]$$

donde $\underline{Z} \in \underline{X}$ contiene las variables δ y $\underline{\psi}_r$ de las máquinas síncronas.

El subconjunto [2.1] representa la ecuación matricial de admitancias nodales de la red, donde \underline{l} es el vector de inyecciones nodales.

Para un nodo de carga \underline{l} es función del voltaje nodal (y quizá de la frecuencia), en tanto que para un nodo generador \underline{l} es la corriente del estator de la máquina expresada en función del voltaje terminal \underline{V} y los flujos del rotor $\underline{\psi}_r$ transformados al marco de referencia síncrono de la red a través del ángulo δ entre el marco de referencia dq de la máquina y el \underline{RI} de la red.

El subconjunto [2.2] representa el conjunto de ecuaciones que definen los elementos de \underline{u} en [1.1].

La figura 1 muestra la estructura típica de un modelo dinámico de un generador conectado a una red de transmisión.³

Programa de estabilidad transitoria

La solución al problema de estabilidad transitoria se realiza en

el dominio del tiempo. El problema consiste en resolver simultáneamente en el tiempo los conjuntos de ecuaciones [1] y [2], satisfaciendo lo mejor posible los siguientes requerimientos:³

- a) Suficiente exactitud en los resultados.
- b) Velocidad computacional del proceso.
- c) Minimización de los requerimientos de memoria.
- d) Flexibilidad en el modelado de componentes del sistema.
- e) Confiabilidad para resolver una amplia gama de problemas prácticos.

Los algoritmos y técnicas de solución empleados tienen que establecer compromisos para la satisfacción de estos requerimientos, ya que como normalmente sucede en todo proceso, algunos de estos requerimientos son conflictivos entre sí.

Esquema de solución

Existen básicamente dos esquemas generales de solución que son: a) esquema alternado, y b) esquema simultáneo.

En el primero se resuelven para cada paso de integración alternadamente [1] para \underline{X} con una técnica numérica de integración y [2] para \underline{y} en forma algebraica.

En el esquema simultáneo se transforma [1] en un sistema de ecuaciones algebraicas y se resuelve conjuntamente con [2] a la misma frecuencia en cada paso de integración.

De los dos esquemas, el que presenta mayores atractivos, desde el punto de vista práctico, es el alternado por su flexibilidad de organización y algorítmica, dado que presenta características similares de convergencia al esquema simultáneo.

El programa de estabilidad transitoria del Departamento, denominado DINAMIC, emplea un esquema alternado para la solución del problema numérico, que enseguida se describe.^{4,5}

1. Dados valores previos de \underline{u} (u_{n-1}, u_{n-2}, \dots) calcular por extrapolación un valor inicial para \underline{u}_n .
2. Utilizando la regla trapezoidal de integración, integrar [1.1] para obtener \underline{X}_n , usando \underline{u}_n del paso anterior.
3. Insertar $\underline{Z}_n \in \underline{X}_n$ en [2.1] y resolver para \underline{V}_n .
4. Usando [2.1] y el valor de \underline{V}_n del paso anterior, calcular un nuevo valor para \underline{u}_n .
5. Iterar sobre los pasos 2 a 4 hasta obtener convergencia en todas las variables.

Este esquema de solución es bastante robusto y eficiente porque:

- a) El método de solución de la red (factorización de \underline{Y}) es independiente del método de solución de las ecuaciones diferenciales; esto permite explotar las características de dispersidad de las ecuaciones algebraicas.

b) La estabilidad numérica de la regla trapezoidal de integración se preserva al llevar el proceso iterativo a convergencia.

c) La estructura en bloques de las ecuaciones diferenciales del sistema permite una aplicación eficiente de la técnica de integración, explotando las características de dispersidad y acoplamiento de las mismas.

Aplicación de la regla trapezoidal de integración

Al aplicar la regla trapezoidal de integración a las ecuaciones [1] resulta:

$$\underline{X}(t) = \left[\frac{2}{\Delta t} \underline{I} - \underline{A} \right]^{-1} \left[\underline{B} \underline{u}(t) + \underline{K}(t - \Delta t) \right] \quad [3]$$

Donde

$$\underline{K}(t - \Delta t) = \left[\frac{2}{\Delta t} \underline{I} + \underline{A} \right] \underline{X}(t - \Delta t) + \underline{B} \underline{u}(t - \Delta t) \quad [3.1]$$

En DINAMIC en vez de aplicar la ecuación [3] para todo el sistema, se toma ventaja de la estructura en bloques de \underline{A} y \underline{B} y se subdivide el problema en sub-bloques, donde cada uno de ellos se relaciona con cada máquina del sistema. Estos sub-bloques, a su vez, presentan una estructura similar a las matrices \underline{A} y \underline{B} del sistema, con acoplamientos mínimos que indican la liga entre las variables que representan los elementos de una estación generadora, tales como excitadores, gobernadores de velocidad, turbinas y generadores síncronos.

Esta estructura se aprovecha en DINAMIC, aplicando la regla trapezoidal de integración a cada uno de estos minibloques resultantes, para obtener la solución total en forma sucesiva. Así, por ejemplo, la solución de un bloque R permite conocer las variables $\underline{X}_{Ri}(t)$, de las cuales se utilizan las que son variables de acoplamiento con el bloque S y se sustituyen en éste como entradas, enseguida se resuelve el bloque S para $\underline{X}_{Si}(t)$ y así sucesivamente.

Es importante mencionar que la solución [3] para cada minibloque se resuelve analíticamente y se codifica la solución. Esta tiene la ventaja de que se explota al máximo la característica dispersa de \underline{A} y \underline{B} en [1.1]; además, las variaciones de elementos de \underline{A} y \underline{B} , debido a saturación, no representan mayor problema porque se trabaja directamente con los elementos.

Se cuenta además con la flexibilidad de equipar cualquier máquina del sistema con los controles que se desee, así como modelar las máquinas con distintos grados de detalle.

Solución de las ecuaciones de la red

La solución de las ecuaciones de la red, expresadas en la ecuación matricial [2.1], se obtiene factorizando la matriz \underline{Y} en los términos \underline{L} y \underline{R} y resolviendo para \underline{V} mediante un proceso de sustitución hacia adelante y hacia atrás.

$$\underline{I}(Z, V) = \underline{L} \underline{R} \underline{V} \quad [4]$$

Para el caso de nodos generadores, las corrientes se obtienen al representar el generador con un equivalente ficticio o exacto de Norton, dependiendo del tratamiento que se desee hacer del problema de la saliencia.

Las admitancias en derivación de los equivalentes de Norton de las máquinas se incorporan a la matriz \underline{Y} y permanecen constantes durante el proceso de simulación. Cuando se considera el efecto de saturación, estas admitancias se actualizan cada vez que hay cambios en la topología del sistema y hay necesidad de volver a formar \underline{Y} .

Para los nodos de carga, las cargas o porciones de carga, representadas por admitancias constantes, se incorporan también a la matriz \underline{Y} . Las cargas no-lineales se representan como funciones del voltaje nodal y/o de las desviaciones de frecuencia y se modelan como inyecciones de corriente en el vector \underline{I} .

Programa de estabilidad dinámica

Para este tipo de problemas, dadas las características de magnitud de los disturbios, es posible suponer que el punto final de operación del sistema estará muy cercano del inicial y, por tanto, podrá atribuírsele un comportamiento lineal a la respuesta dinámica. Esto permite realizar un proceso de linealización a las ecuaciones del sistema y aplicar técnicas de análisis de sistemas lineales para determinar la condición de estabilidad.

En el programa desarrollado por el Departamento se utilizan técnicas modales para resolver el problema.^{6,7}

El algoritmo desarrollado e implantado en el programa denominado DISPEQ obtiene, a través de un proceso de linealización, la ecuación característica del sistema:^{6,7}

$$\Delta \dot{\underline{X}} = \underline{A}_{eq} \Delta \underline{X} \quad [5]$$

Después se utiliza una rutina para calcular los eigenvalores y eigenvectores de \underline{A}_{eq} y se investiga la condición de estabilidad del sistema, aplicando el primer criterio de Liapunov.

El procedimiento para obtener [5] a partir de [1] y [2] es:

Se aplica un proceso de linealización a [1] y [2] y se obtiene:

$$\Delta \dot{\underline{X}} = \underline{A} \Delta \underline{X} + \underline{B} \Delta \underline{y} \quad [6]$$

$$\underline{0} = \begin{bmatrix} \frac{\delta g}{\delta X} \\ \frac{\delta g}{\delta y} \end{bmatrix} \Delta \underline{X} + \begin{bmatrix} \frac{\delta g}{\delta y} \\ \frac{\delta g}{\delta X} \end{bmatrix} \Delta \underline{y} \quad [7]$$

Despejando $\Delta \underline{y}$ de [7] y sustituyendo el resultado en [6], se obtiene:

$$\Delta \dot{\underline{X}} = \left\{ \underline{A} - \underline{B} \begin{bmatrix} \frac{\delta g}{\delta y} \\ \frac{\delta g}{\delta X} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\delta g}{\delta y} \\ \frac{\delta g}{\delta X} \end{bmatrix} \right\} \Delta \underline{X} \quad [8]$$

Al comparar [8] y [5], se observa que:

$$\underline{A}_{eq} = \underline{A} - \underline{B} \begin{bmatrix} \frac{\delta g}{\delta y} \\ \frac{\delta g}{\delta X} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\delta g}{\delta y} \\ \frac{\delta g}{\delta X} \end{bmatrix} \quad [9]$$

Eigenanálisis del sistema

Para determinar la condición de estabilidad del sistema, es necesario considerar que:

- Un eigenvalor real se asocia con un modo no-oscilatorio. La parte imaginaria de los eigenvalores completos representa la frecuencia natural de oscilación, en tanto que la parte real, la cantidad de amortiguamiento asociada con el modo en cuestión. Para asegurar la estabilidad del sistema, todos los eigenvalores deberán tener parte real negativa.

- Una parte real negativa de eigenvalores complejos indica un modo oscilatorio amortiguado y una parte real positiva, un modo oscilatorio con amplitud creciente.

Para medir la participación de las variables de estado del sistema en la excitación de los modos de respuesta, se equipó DISPEQ con una herramienta basada en la utilización de los eigenvectores derechos e izquierdos de \underline{A}_{eq} .⁸

Esta información se obtiene de los elementos de una matriz denominada matriz de participación, que está definida por:

$$\underline{P} = \{p_{ki}\} = \{U_{ki} Y_{ki}\} \quad [10]$$

Donde U_{ki} , Y_{ki} son los k-ésimos elementos del i-ésimo eigenvector derecho e izquierdo, respectivamente. Los eigenvectores están normalizados de tal forma que:

$$U_i^T Y_j = 1 \quad \text{si } i=j$$

$$U_i^T Y_j = 0 \quad \text{si } i \neq j \quad [11]$$

Capacidades de modelación de los programas de estabilidad

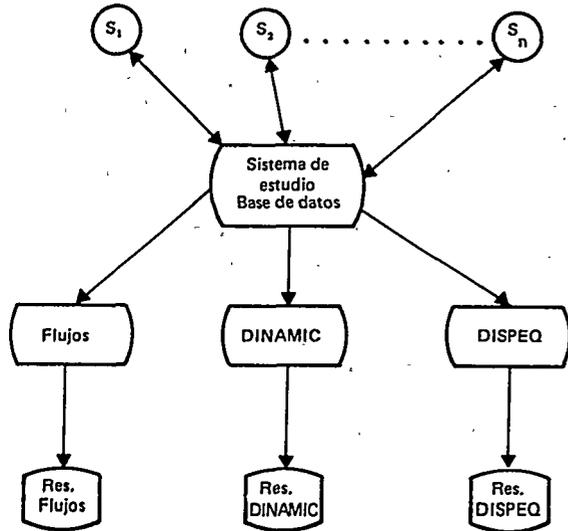
Los programas DINAMIC y DISPEQ tienen las capacidades de modelación^{5,7} que enseguida se mencionan.

- Siete modelos de máquina síncrona, siendo el más completo el que considera dos circuitos en cada eje del rotor.
- Cinco modelos de sistemas de excitación.
- Un modelo de estabilizador de sistemas de potencia.
- Cinco modelos de gobernadores de velocidad para turbinas hidráulicas y térmicas.
- Cinco modelos de turbinas térmicas e hidráulicas.
- Saturación y saliencia en máquinas síncronas.

El diseño de los programas es modular, de tal forma que fácilmente pueden agregarse nuevos modelos.

FIGURA 2

Paquete de simulación digital para estudios de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia



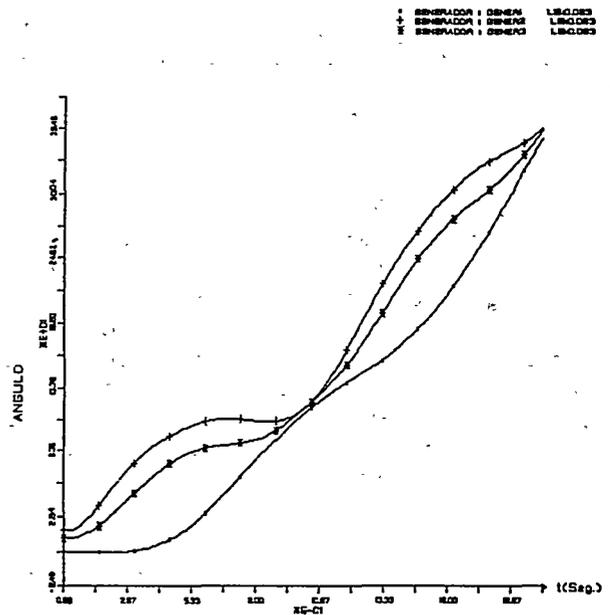
S_i = Caso de estudio
Res. = Resultados

El usuario puede definir qué modelos de generador desea asignar a las máquinas del sistema y equiparlas con los controles que desee. Asimismo, puede modificar esta información

FIGURA 3

Angulos de los rotores de las máquinas

Anderson : Falla Trif. Nudo : 7 Lb. LINS-7 en 0.083 Seg.



de simulación a simulación para un mismo sistema y analizar el efecto que tienen los diferentes modelos y controles en la estabilidad.

MODO	PARTE REAL REAL	PARTE IMAGINARIA	RAZON DE AMORTI GUAMIENTO	FRECUENCIA DE OSCILACION
1	-0.64954612D-01	0.61918384D-01	0.72382148D+00	0.98546168D-02
2	-0.64954612D-01	-0.61918384D-01	0.72382148D+00	0.98546168D-02
3	-0.38151083D+00	0.00000000D+00	0.10000000D+01	0.00000000D+00
4	-0.35468558D+00	0.71469186D+00	0.44454414D+00	0.11374674D+00
5	-0.35468558D+00	-0.71469186D+00	0.44454414D+00	0.11374674D+00
6	-0.11293661D+01	0.98248178D+00	0.75446515D+00	0.15636683D+00
7	-0.11293661D+01	-0.98248178D+00	0.75446515D+00	0.15636683D+00
8	-0.32113722D+01	0.00000000D+00	0.10000000D+01	0.00000000D+00
9	-0.47078798D+01	0.00000000D+00	0.10000000D+01	0.00000000D+00
10	-0.27854011D+00	0.83250268D+01	0.33439452D-01	0.13249692D+01
11	-0.27854011D+00	-0.83250268D+01	0.33439452D-01	0.13249692D+01
12	-0.95143253D+01	0.00000000D+00	0.10000000D+01	0.00000000D+00
13	-0.10913831D+02	0.93130948D+00	0.99637891D+00	0.14822250D+00
14	-0.10913831D+02	-0.93130948D+00	0.99637891D+00	0.14822250D+00
15	-0.89716402D+00	0.12802340D+02	0.69906685D-01	0.20375556D+01
16	-0.89716402D+00	-0.12802340D+02	0.69906685D-01	0.20375556D+01
17	-0.38235587D+02	0.00000000D+00	0.10000000D+01	0.00000000D+00

TABLA I EIGENVALORES DEL SISTEMA.

Integración de los programas de estabilidad en un paquete de simulación digital

Con el propósito de facilitar el uso de los programas de estabilidad para realizar estudios en sistemas, éstos se integraron en un paquete de simulación digital, interrelacionándolos como se muestra en la figura 2.

El programa de flujos de potencia —que aparece en la figura y que se usa para calcular las condiciones iniciales del sistema del cual se desea analizar la condición de estabilidad (transitoria o de régimen permanente)— se basa en el método de Newton-Raphson y utiliza técnicas de dispersidad y ordenamientos óptimos para calcular la solución.

Tanto los programas DINAMIC y DISPEQ como el programa de flujos de potencia comparten la misma base de datos, de tal forma que el usuario no necesita definir archivos diferentes para correr algún programa específico. Por ejemplo, para la simulación de un sistema dado, DISPEQ, DINAMIC y FLUJOS leen los mismos archivos de datos de la red que son hijos. FLUJOS arroja, a la base de datos, los resultados necesarios para ejecutar DINAMIC o DISPEQ en el formato que éstos requieren. Además, se cuenta con la facilidad de tener casos almacenados que reflejen diferentes condiciones topológicas o de ope-

ración de un mismo sistema o datos de algún otro sistema para estudio.

Cuando se desea analizar algún caso particular, se monta en la base de datos del sistema en estudio y se almacena o borra el anterior.

Ejemplos de resultados

La figura 3 y las tablas I y II proporcionan ejemplos de algunos de los resultados que arrojan DINAMIC y DISPEQ, éstos permiten al usuario analizar la condición de estabilidad del sistema en estudio. En particular, estos resultados corresponden al sistema de prueba de tres generadores y nueve líneas que describió Anderson (1977).¹ Las condiciones de operación y disturbio utilizadas para obtener estos resultados son los que se establecen en el ejemplo de la referencia mencionada.

En la figura puede observarse que el sistema es transitoriamente estable para las condiciones de falla establecidas. Asimismo, de lo expuesto en el cuadro 1, puede aseverarse que el sistema es estable ante la ocurrencia de disturbios pequeños, puesto que todos los eigenvalores tienen parte real negativa. En el cuadro 2 se muestra la dominancia de las variables de estado del sistema en la excitación de los modos dinámicos de respuesta.

CASO 1 SIMULACION CON-EXC SISTEMA 9-NODOS Y 3-MAQUINAS

Reporte sobre la Matriz de Participación de un sistema lineal multivariable

MODO		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
V	XE1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.63	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00
A	YE1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.57	0.04	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R	EFD1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	-0.23	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
I	FIFD	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.83	0.00	-0.34	-0.02	0.00	0.00	-0.21	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
A	W1	1.00	0.00	-0.13	0.03	0.00	0.01	0.00	-0.05	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	XE2	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
L	EFD2	0.21	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
E	FIFD	0.89	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	FIKQ	0.04	0.00	0.07	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.60	1.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Q2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00
D	W2	0.94	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00
E	XE3	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.01	0.00	0.05	0.26	0.00	0.00	0.20	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
	EFD3	0.00	0.00	0.00	0.91	0.00	0.01	0.00	-0.02	-0.11	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
E	FIFD	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.01	0.00	-0.02	-0.12	0.00	0.00	-0.02	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00
D	FIKQ	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.01	0.00	1.00	0.64	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.08	0.00	0.00
D	D3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	W3	0.15	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	-0.03	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00

TABLA II MATRIZ DE PARTICIPACION MODAL.

Además de estos resultados, pueden obtenerse los siguientes resultados gráficos:

- a) Desviación de velocidad de los rotores de las máquinas.
- b) Pares eléctrico y mecánico de las máquinas.
- c) Voltajes terminales de generadores.
- d) Flujos de potencia activa en enlaces del sistema de transmisión.

También se tiene la facilidad de obtener resultados gráficos de dos simulaciones distintas en una sola gráfica, lo que permite al usuario analizar, con mayor rapidez y eficiencia, los efectos de acciones efectuadas para mejorar la condición de estabilidad de un sistema.

Los programas se han usado para analizar varios sistemas de prueba, el sistema real representativo del sistema interconectado Costa Rica-Panamá, inclusive, para el cual se realizan estudios de estabilidad en diferentes condiciones de operación que se considerarán durante la etapa de planeación.^{9,10}

Perspectivas futuras de desarrollo

El desarrollo de estas herramientas preliminares servirá de apoyo para lograr objetivos más ambiciosos, tales como:

- Investigación de técnicas de análisis de seguridad dinámica en tiempo real de sistemas eléctricos de potencia.
- Desarrollo integral de sistemas de análisis de seguridad que contemple los aspectos estáticos, dinámicos y económicos en la planeación y operación de los mismos.

Referencias

1. Anderson, P.M., *Power Systems Control and Stability*, Iowa State University Press, 1977.
2. Ribbens-Pavella, M., Th. Van Cutsem y P. Rousseaux, *On-Line Stability and Dynamic Security Assessment of Electric Power Systems*, IFAC, Río de Janeiro, Brasil, 1985.
3. Stott, B., "Power System Dynamic Response Calculations", *Proc. IEEE*, vol. 67, núm. 2, febrero de 1979.
4. Reynaga, O., *Respuesta dinámica de un sistema eléctrico de potencia* (tesis de licenciatura), Instituto Tecnológico de Morelia, abril de 1986.
5. Inda, A., A. Medina, R. Fraga y O. Reynaga, "DINAMIC: Un programa digital eficiente para el análisis de estabilidad transitoria en sistemas de potencia" (se presentará en la conferencia MEXICON-86, que se realizará en Guadalajara, durante octubre de 1986).
6. Calderón, J.G., *Estudios de estabilidad dinámica en el dominio de la frecuencia* (tesis de maestría), Sección de Graduados ESIME-IPN, febrero de 1986.
7. Inda, A. y J.G. Calderón, "Análisis modal en la estabilidad dinámica de sistemas eléctricos de potencia" (se presentará en la conferencia LATINCON-86, que se realizará en Panamá, durante noviembre de 1986).
8. Pérez Arriaga, I.J., *Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems* (tesis doctoral), Electrical Engineering MIT, junio de 1981.
9. Quezada, R., *Estudios de estabilidad dinámica del sistema eléctrico interconectado Costa Rica-Panamá* (tesis de maestría), UNAM, mayo de 1986.
10. Inda, A. y R. Quezada, "Análisis de estabilidad dinámica de interconectado Costa Rica-Panamá" (se presentará en la conferencia LATINCON-86, que se realizará en Panamá, durante noviembre de 1986).



G. ADRIAN INDA RUIZ

En 1972, obtuvo la licenciatura en ingeniería eléctrica en la ESIME-IPN y en 1974, la maestría en ingeniería eléctrica con especialidad en potencia, en la misma Institución. En la Universidad de Toronto, Canadá realizó una maestría en ciencias. Durante tres años fue profesor de la Sección de Graduados de la ESIME-IPN. Desde 1981, es investigador del Departamento de Análisis de Redes, de la División de Sistemas de Potencia, del Instituto de Investigaciones Eléctricas.



JORGE GUILLERMO CALDERON GUIZAR

En 1983, obtuvo el título de ingeniero industrial eléctrico en el Instituto Tecnológico de Morelia. Realizó estudios de maestría en la sección de graduados de la ESIME y obtuvo el grado de maestría en ciencias, en febrero de 1986. Ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas como investigador del Departamento de Análisis de Redes, en noviembre de 1985.



JOSE RAUL FRIAGA VARGAS

Realizó sus estudios de licenciatura en el Tecnológico de Morelia, donde obtuvo el título de ingeniero industrial eléctrico, en 1984. Colaboró para Interruptores de México, en 1982. En 1983, ingresó a la sección de graduados de la ESIME, donde realizó estudios de maestría. Ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas como investigador del Departamento de Análisis de Redes, en mayo de 1985.

Ampliación del conocimiento del campo geotérmico de Cerro Prieto de 1967 a 1985

Sergio Mercado

La exploración en Cerro Prieto se inició en la década de los años sesenta, perforándose pozos que descargaban un gran caudal a una elevada presión. Un modelo simple del campo indicaba una extensión de menos de 1 km² con buena producción. En los setenta se perforaron más pozos y la extensión se estimaba en 4 km². Hasta la fecha, la extensión conocida de buena producción es de 25 km², con ello se tiene asegurada la generación de los 620 MW instalados. Actualmente, continúan realizándose explotaciones hacia el este del campo, con lo que se ampliará más su extensión.

Introducción

La exploración con pozos profundos en Cerro Prieto se inició en 1964, habiéndose perforado, con éxito, dos pozos: el pozo M3 y el pozo M5. Sobre todo este último indicó que en Cerro Prieto se contaba con un gran potencial, ya que las temperaturas de fondo registradas eran de gran magnitud y los flujos descargados y la presión, elevados. Después de esta primera etapa de exploración tan positiva, se continuó con el desarrollo del campo, siempre ampliando el área alrededor del pozo M5. Así se perforó hacia el sur y hacia el este de dicho pozo, también con excelentes resultados; el campo se amplió principalmente hacia el sur de lo que se conocía durante la primera etapa de perforación. Sin embargo, recientemente se han perforado pozos de exploración de gran profundidad al este que han incrementado, de manera muy significativa, el potencial del campo; de esta manera el área de explotación aumentó varias veces la extensión de lo conocido en las primeras etapas y crecieron las posibilidades de generar cada vez mayor cantidad de energía eléctrica.

Este artículo es una revisión del desarrollo del campo geotérmico de Cerro Prieto que abarca desde una descripción del área conocida en 1967, hasta cómo se ha evolucionado a la fecha con perforaciones efectuadas cada vez a mayor profundidad que amplían el conocimiento del subsuelo y la posibilidad de incrementar la capacidad instalada.

Modelo elaborado en 1967

En esa fecha se contaba con los pozos 1A, M3, M5, M6, M7, M8, M9 y M10, siendo el área más significativa la de los pozos

M6, M5, M8, M9 y M10, porque entre éstos figuraban los pozos geotérmicos de mayor producción y temperatura detectados en el mundo.

Con los datos físicos y químicos de algunos de estos pozos se elaboró el modelo expuesto en la figura 1, donde se muestra un corte del campo noroeste-sureste, teniéndose M6, M9, M5 y M10 como pozos indicativos del área. De éstos, el M5 era el de mejores condiciones, tanto de presión como de temperatura y gasto de mezcla; sin embargo, el corte se hizo en ese sentido porque los otros pozos alineados aportaban valiosos datos para conocer las condiciones del subsuelo en sus alrededores.

De esa manera, se supo de una migración del fluido geotérmico del pozo M5 hacia el M6, distante más de 2 km. Por medio de estudios geoquímicos, se consideró que existía una probable fuente de alimentación o una fractura alimentadora en el pozo M5 o muy cerca de él, por lo que, al migrar el agua caliente hacia el pozo M6 perdía ciertos componentes, como sílice y potasio (K). Por ejemplo, el pozo M5 tenía 1 500 ppm de K, en tanto que en el M6 sólo se detectaban 500 ppm de K presentes en la solución original. Igualmente, la sílice en el flujo del primero era de 740 ppm, llegando únicamente 180 ppm en el segundo. También los índices químicos, como el sodio por potasio (Na/K), indicaban con claridad tal migración, teniendo seis unidades en el pozo M5 y 17 unidades, en el M6. Asimismo, pudo corroborarse, que se contaba con una capa sello excelente que mantenía presurizado el reservorio y no dejaba escapar fácilmente energía a la superficie, manteniendo en él elevadas presiones y temperaturas.

Los estratos productores resultaron excelentes en el pozo M5, habiéndose interceptado fracturamientos importantes que

artículos técnicos

Diseño eléctrico de generadores síncronos por computadora

José O. Patlán Frausto
Juan Acosta Aradillas

En este artículo se presentan, de manera conceptual, los principales elementos que participan en el proceso de diseño eléctrico de generadores síncronos. También se plantean otras opciones para utilizar las computadoras como apoyo de diseño. Posteriormente, se describe un programa de cómputo desarrollado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para el diseño eléctrico de generadores de polos salientes, orientado a obtener su dimensionamiento electromagnético. Por último, con el propósito de validar este programa, se presentan los resultados obtenidos en un caso particular.

Introducción

Tradicionalmente, el diseño de generadores se ha basado en dos factores fundamentales, experiencia del diseñador e información acumulada sobre máquinas ya construidas. En los inicios de la industria eléctrica, cuando tanto la información acumulada como la experiencia eran escasas, se consideró al diseño como un "arte".¹

La primera generación de computadoras digitales se utilizó en la solución de problemas de análisis de operación. La segunda, con mayor velocidad de cálculo, permitió los primeros programas de síntesis de diseño por aproximaciones sucesivas, con los cuales pueden considerarse más opciones que con el diseño manual. Recientemente, con el desarrollo de técnicas analíticas y numéricas para el cálculo de campos, se agregó otro factor fundamental a los dos ya mencionados. Esto ha mejorado la comprensión de los fenómenos que ocurren en el proceso de conversión de energía y ha contribuido a obtener mejores resultados, aunque ha incrementado sustancialmente la complejidad del proceso de diseño.² Además de esto, se han hecho pocas

innovaciones significativas en el campo del diseño de generadores síncronos, donde se conserva su naturaleza esencialmente práctica, confirmada mediante la experiencia.

El proceso de diseño

Brevemente formulado, el proceso de diseñar generadores síncronos consiste en seleccionar las dimensiones, los materiales y la construcción que satisfagan los objetivos de operación y costo, dentro de las restricciones impuestas por las normas y especificaciones aplicables.³ Para poder efectuar esa selección, es necesario contar con información detallada sobre máquinas similares o con una metodología de diseño confiable, apoyada en herramientas para el estudio de campos electromagnéticos, transferencia de calor, esfuerzos mecánicos y esfuerzos dieléctricos.

El proceso de diseño se realiza entre dos situaciones extremas, definidas por la disponibilidad y la carencia de información sobre máquinas similares a la que se diseña. Cuando se dispone de información suficiente, el proceso se limita a la ejecución de

una serie de cálculos, señalados en un manual o en un documento equivalente, cuyos resultados se asientan en formatos estandarizados. En este caso, el diseño resultante no requiere de pruebas especiales para su validación y es alta la probabilidad de que se trate de un diseño confiable. Cuando no se cuenta con información suficiente, el proceso de diseño se complica, ya que esa carencia debe sustituirse con conocimientos teóricos sobre los fenómenos que ocurren en el proceso de conversión de energía.

El diseño se obtiene entonces mediante una serie de procesos de síntesis y análisis asociados a subsistemas del generador. El diseño así obtenido requiere de pruebas especiales para su validación, y su grado de incertidumbre es mayor que la del diseño apoyado en información.

En general, debido a la cantidad y complejidad de los factores involucrados, el proceso de diseño se realiza de manera iterativa hasta encontrar una solución satisfactoria.

Lo anterior se resume en la figura 1, donde se muestra un diagrama de flujo del proceso general de diseño. En primer lugar, se revisan las normas y especificaciones aplicables. En seguida, se prepara una propuesta preliminar, a partir de experiencias previas o mediante un proceso de síntesis de diseño,

considerando las restricciones impuestas por las normas y especificaciones. Después, se analiza la operación del generador propuesto, se verifica el cumplimiento de especificaciones y se calcula su costo. En caso de no satisfacer los requerimientos originales, se modifica la propuesta y el proceso se repite hasta encontrar una propuesta satisfactoria.

Aun cuando se haya encontrado una propuesta satisfactoria, el proceso de diseño puede tender hacia una forma de optimización al analizar y comparar varias propuestas satisfactorias de donde elegir la que se construirá.

Ampliando la perspectiva de análisis del proceso de diseño para considerar las actividades que lo respaldan y complementan, puede plantearse el diagrama general mostrado en la figura 2.

La justificación y preparación de normas y políticas de diseño son responsabilidad de grupos de investigación y desarrollo que enfrentan problemas específicos, ya sea relacionados con el comportamiento del generador o subsistemas del mismo o bien, con la tecnología de los materiales que lo componen.

Estas normas y políticas de diseño, una vez revisadas y aprobadas integran, junto con una cierta metodología, el manual de diseño. La cantidad de cálculos y de información que se mane-

FIGURA 1

Diagrama de bloques del proceso general de diseño de generadores

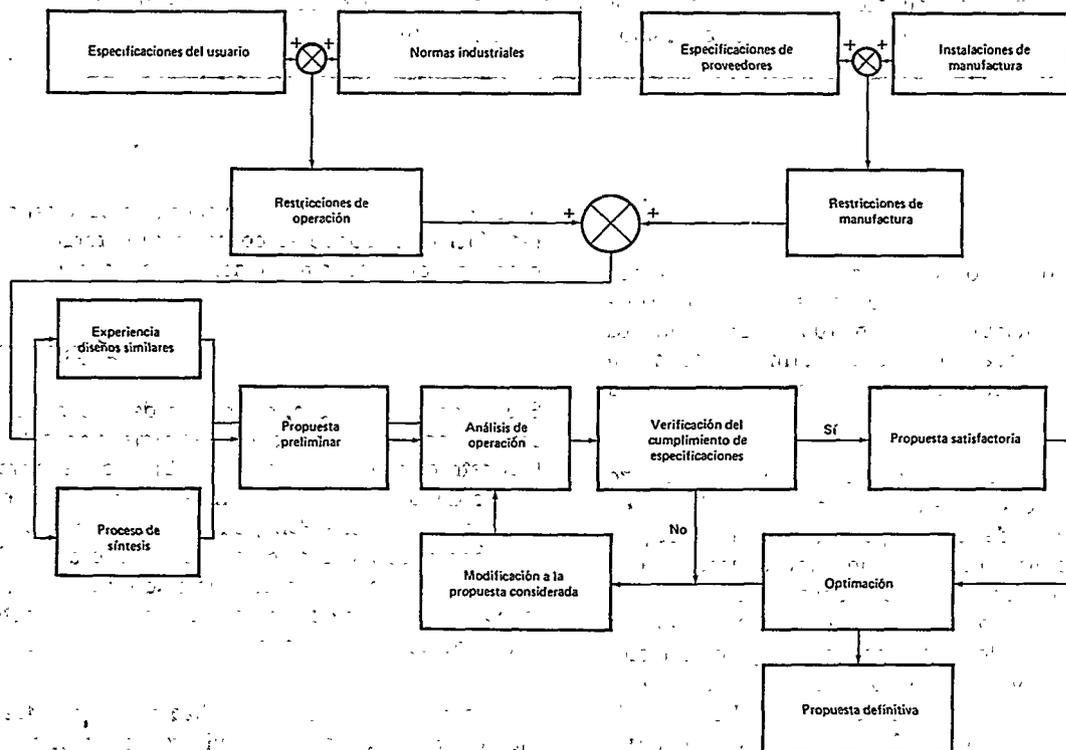
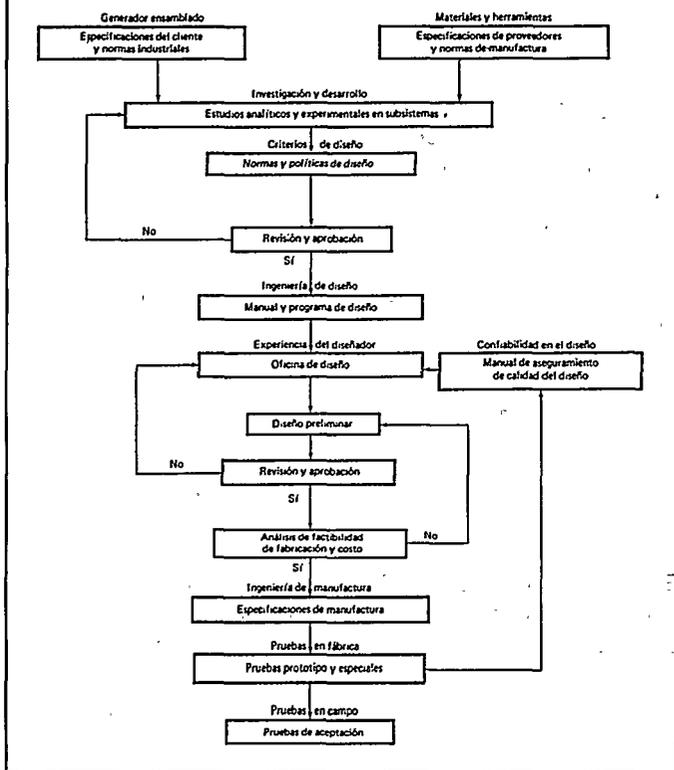


FIGURA 2

Diagrama general de las actividades relacionadas con el diseño de generadores síncronos



jan en esta etapa es considerable, por lo que es conveniente desarrollar programas de computadora eficientes y confiables.

Aplicando los criterios de diseño contenidos en el manual y utilizando los programas de computadora, el diseñador incorpora su experiencia en la preparación del diseño preliminar, que debe aprobarse mediante un análisis de factibilidad de fabricación y de costos, antes de convertirse en diseño definitivo y pasar a la fase de ingeniería de detalle.

El análisis de costos de una propuesta de diseño es un aspecto importante que debe considerar el fabricante, ya que en última instancia el comprador otorga el pedido al oferente que cumple con las especificaciones técnicas al menor costo.

La preparación de especificaciones y dibujos de manufactura se ha automatizado con el desarrollo de sistemas computacionales de apoyo a la ingeniería y a la manufactura.

La confirmación de los valores de diseño se obtiene en la etapa de pruebas. Estas se realizan en fábrica y comprenden tanto pruebas diseñadas y ejecutadas con propósito de verificación como aquellas especificadas por el cliente y las normas aplicables. Los resultados se utilizan para evaluar la calidad y confiabilidad del diseño y, si es necesario, para corregir o afinar el conjunto de métodos utilizado.

Una vez realizadas las pruebas en fábrica, el generador se transporta e instala en el sitio de operación, donde el cliente, de acuerdo con el fabricante, realiza las pruebas finales de aceptación.

Elementos fundamentales en el diseño

Se pueden distinguir tres elementos fundamentales en el diseño de generadores síncronos:

- Leyes básicas y simplificaciones que permiten su aplicación.
- Criterios de diseño, respaldados con estudios teóricos y experimentales en subsistemas del generador.
- Experiencia y habilidad del diseñador.

Las leyes básicas utilizadas son principalmente las de Faraday, Lenz y Ampere. Para poder aplicarlas, es necesario idealizar geometrías y propiedades de materiales.

Los criterios de diseño representan la consolidación de una experiencia probada en la práctica. Reflejan la capacidad tecnológica particular de que se dispone para diseñar, fabricar y probar generadores.

Finalmente, la experiencia del diseñador constituye una acumulación de soluciones a problemas que surgieron durante el diseño de otros generadores. Esta experiencia determina la cercanía de una primera propuesta de diseño a la propuesta definitiva, que satisfaga de manera equilibrada consideraciones eléctricas, magnéticas, térmicas, mecánicas y de manufactura. Para esta actividad, el diseñador puede apoyarse en programas de cómputo para síntesis de generadores. Esto le permite considerar un mayor número de opciones.

Método de diseño

La comprensión de los fenómenos involucrados en la operación del generador síncrono es el antecedente necesario para la proposición de un método de diseño, aun cuando la actividad de diseño en sí no requiere considerar en detalle cada fenómeno y sus interacciones con otros fenómenos.

Un método de diseño consiste de una serie de cálculos ordenados en una secuencia y apoyados en fundamentos teóricos que conduzcan a una proposición de materiales, dimensiones y construcción para el generador. Este objetivo puede alcanzarse de diferentes maneras, dependiendo de la capacidad de análisis e información de que disponga el diseñador, así como del tipo de máquina de que se trate. Por ejemplo, algunos fabricantes inician el proceso de diseño con el rotor cuando se trata de una máquina de polos lisos y por el estator cuando se trata de polos salientes. Diversos autores^{4,5,6} analizan con detalle los numerosos temas que participan en un método de diseño.

La ingeniería de diseño, constituida principalmente de fundamentos teóricos y criterios prácticos, proporciona el soporte analítico para elaborar un método de diseño particular, adecuado y ampliando la información para satisfacer necesidades específicas de su aplicación. La implantación de ese método en

una computadora digital es otro aspecto que debe considerarse, ya que entonces es necesario adoptar algoritmos de diseño susceptibles de trabajar en computadora.

Diseño con ayuda de computadora

El presente artículo trata específicamente de la aplicación de la computadora al diseño eléctrico de generadores síncronos. Su aplicación al diseño de máquinas eléctricas rotatorias en general se puede ver en las referencias 3, 7 y 9.

El uso de la computadora permite al diseñador considerar gran cantidad de opciones, para lograr, en cierta forma, la optimización del proceso. Los programas de computadora que utiliza el diseñador pueden clasificarse en:

- Programas de síntesis de diseño.
- Programas de análisis de operación.
- Programas de diseño general.

Programas de síntesis de diseño

Requieren, como datos de entrada, las especificaciones de operación. El programa calcula las dimensiones del conjunto que producirán las características de operación especificadas. Hay dos opciones para desarrollar programas de síntesis de diseño:

a) *Resolver las ecuaciones de operación en forma inversa.* Si esto es posible, los requisitos de operación podrían darse como datos y evaluar las ecuaciones invertidas para obtener las dimensiones necesarias. Sin embargo, tal sistema de ecuaciones podría quedar indefinido al tener más incógnitas que datos. Esto puede remediarse agregando restricciones de geometría, costo, peso o eficiencia, por ejemplo.

b) *Programas de diseño interactivos.* Es posible converger a una solución satisfactoria mediante aproximaciones sucesivas, contando con la intervención del diseñador, quien orienta la ejecución del programa con base en su experiencia.

Programas de análisis de operación

En estos programas, el diseñador propone como entrada datos de diseño de generadores similares. El programa calcula los parámetros de operación del diseño propuesto, a fin de que el diseñador examine si cumple con las especificaciones. Si es necesario, el diseñador modifica la propuesta y con el programa vuelve a calcular los parámetros de operación. Este proceso se repite hasta que se cumplan todos los requerimientos. Aquí la computadora se utiliza como un calculador de alta velocidad.

Los programas de análisis de operación pueden resultar muy complejos⁸ e incluir aspectos tales como:

- Análisis de campos electromagnéticos.
- Distribución de temperaturas y enfriamiento.
- Análisis de esfuerzos, vibraciones y velocidades críticas.
- Análisis de la operación en estado estable y dinámico.
- Análisis de transitorios electromagnéticos
- Análisis de transitorios electromecánicos.

Programas de diseño general

Un programa de diseño general constituye un compromiso intermedio entre un programa típico de análisis de operación y un programa de síntesis de diseño que automáticamente seleccione y ajuste todas las dimensiones hasta obtener los parámetros de operación especificados.

En la práctica industrial, las restricciones que se imponen a un programa de diseño general limitan las opciones que deben considerarse, ya que debe apegarse a las normas de diseño que cada fabricante establezca, que le permitirán estandarizar materiales y procesos de manufactura para obtener economías de escala y reducir costos.

Un programa de diseño general debe permitir obtener un diseño preliminar en poco tiempo, que sirva de base para cotizar el generador y como referencia para los programas de análisis de operación, mediante los que se ratifican o rectifican las propuestas iniciales y se establece el diseño definitivo.

Descripción de un programa de diseño eléctrico del IIE

En la figura 3 se muestra el diagrama conceptual de un programa general, interactivo, de diseño eléctrico de generadores síncronos, desarrollado en la División de Equipos del IIE. En este diagrama se muestra la participación del diseñador y el apoyo de la computadora durante el proceso de diseño.

Las actividades relevantes del diseñador son la preparación, revisión y modificación de los diseños preliminares hasta obtener un diseño definitivo, en tanto que la computadora efectúa los cálculos involucrados.

El método de diseño implantado en la computadora se integra con:

- Datos para el diseño.
- Diseño del estator.
- Diseño del rotor.
- Análisis de operación.
- Resultados del diseño.

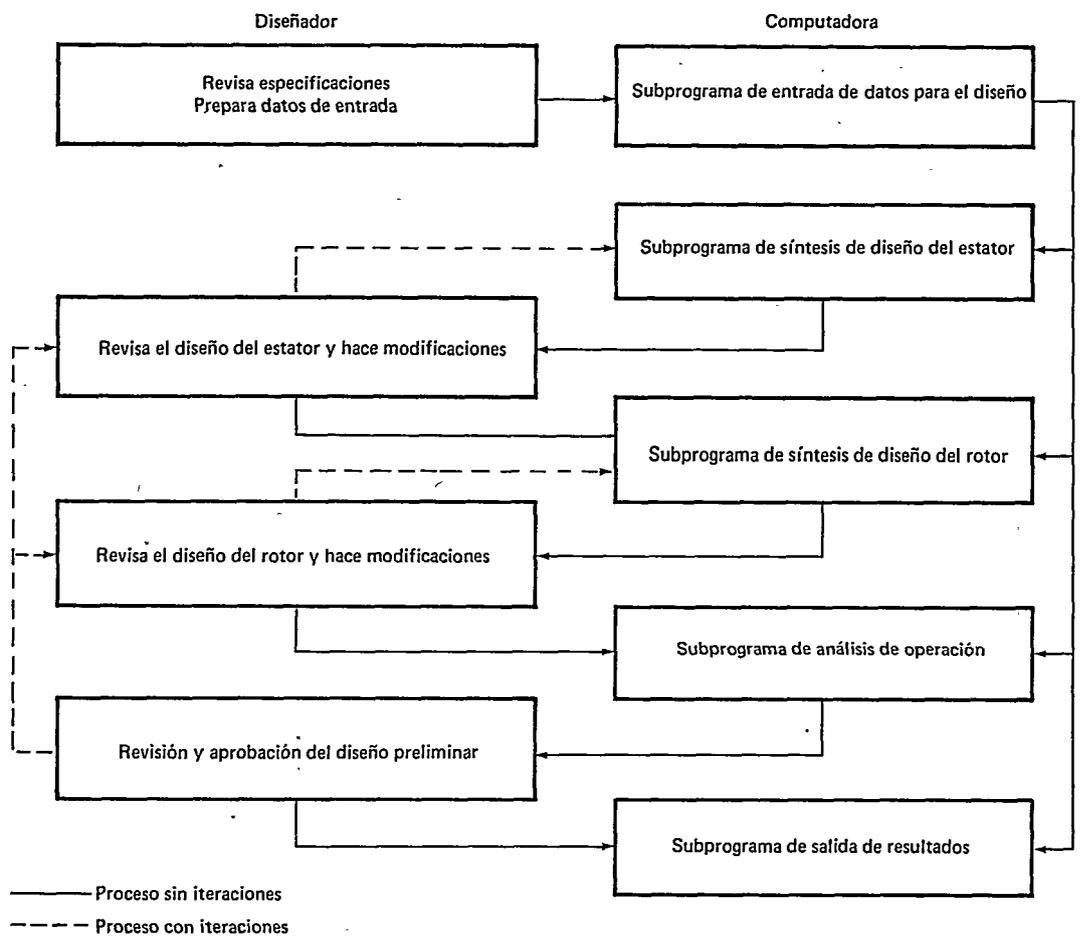
El objetivo principal del programa es el dimensionamiento electromagnético del generador. El cálculo de parámetros de operación sólo considera los valores garantizados de elevación de temperatura, relación de corto circuito y eficiencia.

La estructura del programa se muestra en la figura 4. Consta de un programa principal *Generador*, el cual presenta al diseñador las opciones:

- Diseño completo.
- Diseño del estator.
- Diseño del rotor.
- Análisis de operación.
- Salir del programa.

FIGURA 3

Diagrama conceptual del proceso de diseño de generadores con ayuda de computadora



Dependiendo de la opción seleccionada, el programa principal arregla la ejecución de los subprogramas *Estator*, *Rotor* y *Eficiencia*.

La entrada de datos para el diseño se realiza mediante las subrutinas ESPEC y RECOM. La primera permite la entrada de las especificaciones completas del generador y la segunda maneja los valores recomendados para algunas variables de diseño.

El diseño del estator se apoya en subrutinas, que realizan las funciones:

- Cálculo de las dimensiones principales, DYL.
- Diseño del devanado del estator, DEVEST.
- Cálculo de dientes y ranuras, DIENTE.
- Arreglo de conductores y aislamientos, AISLANTE.
- Cálculo del núcleo de estator, CORE.
- Cálculo de la vuelta media de la espira, ESPIRA.
- Cálculo de los pesos de cobre y hierro, PESOS.
- Cálculo de pérdidas y elevación de temperatura, PERDIDAS.

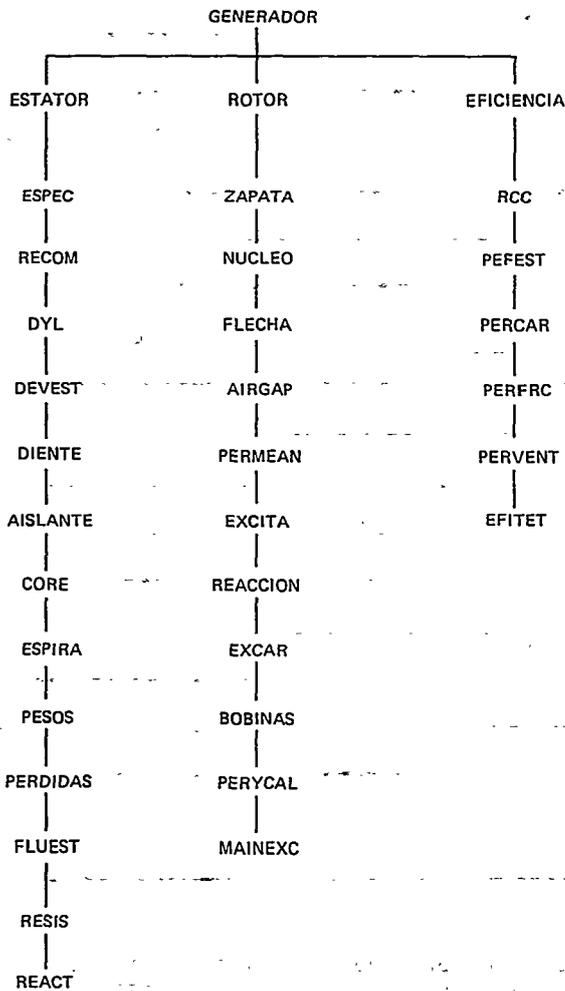
- Cálculo de dimensiones complementarias, FLUEST.
- Cálculo de la resistencia de armadura RESIS.
- Cálculo de la reactancia de dispersión, REACT.

El diseño del rotor se realiza mediante un conjunto de subrutinas, cuya función se indica:

- Dimensionamiento de la zapata polar, ZAPATA.
- Cálculo del núcleo polar, NUCLEO.
- Dimensionamiento preliminar de la flecha, FLECHA.
- Cálculo de los factores de corrección para entrehierro, AIRGAP.
- Cálculo de la permeancia de dispersión polar, PERMEAN.
- Cálculo de la excitación en vacío para tensión nominal, EXCITA.
- Cálculo de la reacción de armadura a corriente nominal, REACCION.
- Cálculo de la excitación en carga nominal, EXCAR.
- Diseño de las bobinas polares, BOBINAS.
- Cálculo de pérdidas y calentamiento en bobinas polares, PERYCAL.
- Cálculo de la excitatriz principal, MAINEXC.

FIGURA 4

Diagrama de estructura del programa de diseño eléctrico de generadores síncronos



El análisis de operación se realiza mediante otro conjunto de subrutinas, con las funciones:

- Cálculo de la relación de corto circuito, RCC.
- Cálculo de las pérdidas en el fierro del estator, PEFEST.
- Cálculo de las pérdidas en carga, PERCAR
- Cálculo de las pérdidas en rodamientos, PERFRC.
- Cálculo de las pérdidas por ventilación, PERVENT
- Cálculo de la eficiencia, EFITET.

La presentación de resultados se realiza mediante subrutinas de lectura y escritura, que preparan los informes:

- Informe del diseño del estator.
- Informe del diseño del rotor.
- Informe del análisis de operación.

Con objeto de facilitar la toma de decisiones dentro del proceso de diseño, durante la ejecución de las subrutinas se informa al diseñador mediante informes parciales, lo que le permite analizar las consecuencias de sus decisiones antes de continuar con cálculos subsecuentes.

Este programa, escrito en Fortran 77 e implantado en una computadora VAX 11/780, permite obtener una propuesta de diseño en aproximadamente 20 minutos.

Validación del conjunto de métodos

La validación de un conjunto de métodos de diseño particular puede hacerse de manera experimental, construyendo prototipos o por comparación con otros métodos de confiabilidad probados. Además, pueden considerarse las observaciones y sugerencias de diseñadores experimentados, para mejorar el conjunto de métodos desarrollados.

El método y el programa de diseño eléctrico desarrollados en el IIE, se validaron mediante la comparación de resultados con las características de un prototipo; la participación de diferentes asesores, entre los que destaca el doctor Gurney L. Godwin y la comparación con diseños específicos de la compañía Toshiba.

El doctor Godwin, asesor financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con amplia experiencia industrial en diseño de máquinas eléctricas⁹ preparó el diseño preliminar de un generador de 25 MVA, 13 800 V, 1 800 rpm. En las figuras 5 y 6 se muestran algunas dimensiones electromagnéticas relevantes del diseño del doctor Godwin (diseño A) y del diseño obtenido con ayuda del programa del IIE (diseño B). Una comparación más completa se presenta en la referencia 10.

El recuadro superior de la figura 5 muestra una buena concordancia en las dimensiones principales del generador: D_i , L , δ y D_r . Se observa que el diseño B propone una ranura por polo y por fase adicional, lo cual reduce el ancho del diente y mejora la distribución de conductores en la periferia del estator.

El recuadro intermedio detalla las dimensiones del estator mostrando también una concordancia satisfactoria. El recuadro inferior presenta las dimensiones de la pieza polar y del devanado de campo. El núcleo polar del diseño A es más ancho y de menor altura que el del diseño B; por lo que sus respectivas bobinas de excitación resultan diferentes.

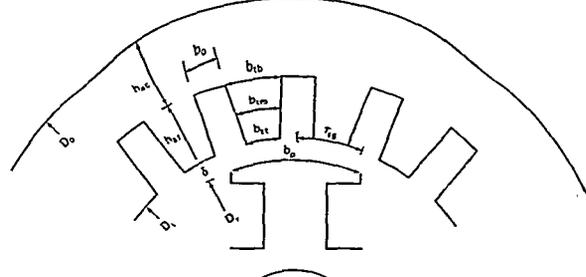
La figura 6 muestra el contenido de la ranura de estator. La diferencia en espiras por bobina y en el total de bobinas se debe a la diferencia en el número de ranuras por polo y por fase ya comentada.

La comparación entre los diseños A y B muestra, en lo general, una concordancia satisfactoria, validando así el conjunto de métodos desarrollado. Las diferencias encontradas sirvieron

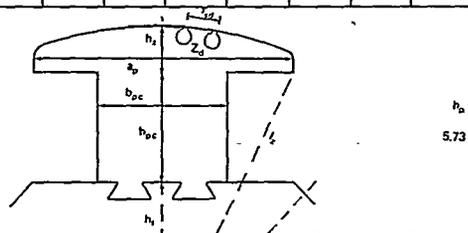
FIGURA 5

Dimensiones principales del circuito magnético de un generador síncrono con rotor de polos salientes

Diseño	D_o	L	S	D_r	N	S	Q	V_i	n_r
A	1016	2160	15.87	984	40	60	5	4/5	42
B	1016	2230	15.75	984	36	72	6	5/6	38



Diseño	b_{tt}	b_{or}	h_{at}	h_{ec}	D_o	b_{vm}	b_{tb}	G_{cu}	G_{Fe}
A	29.95	23.25	111.75	168	1575	35.8	41.65	-	-
B	21.78	22.5	124	207.84	1680	27.24	32.65	2070	17384



Diseño	h_z	x_p	ψ_p	l_p	b_{pc}	h_{pc}	h_i	U_e	σ_e	δ_e	J_e	N_e	l_e
A	76.2	-	0.6	2210	29.2	20.3	20.9	-	95.25	2.4	2.44	64	555
B	91	517.8	0.7	2230	24.7	24.3	15.78	125	120	1.07	3	71	388

Dimensiones en milímetros

para detectar y subsanar algunas deficiencias de ambos diseños. Asimismo, éste se validó mediante la comparación entre las características de un prototipo de 5 MW, diseñado y fabricado por la compañía Toshiba y un diseño propio del IIE. Esta comparación también produjo resultados satisfactorios.

Conclusiones

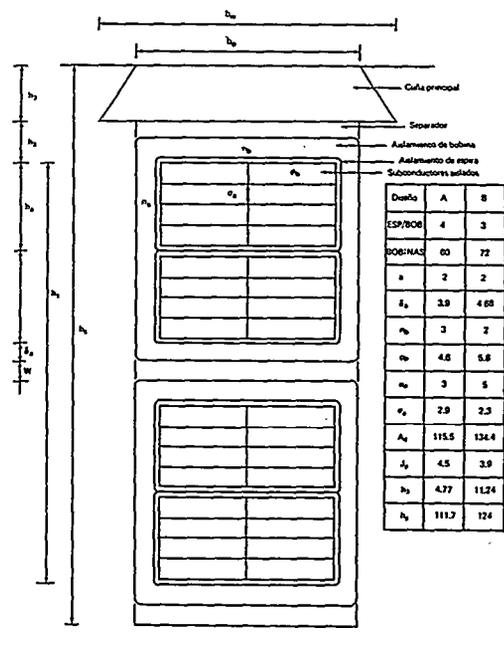
El diseño eléctrico de generadores síncronos requiere, principalmente de:

- Conocimiento de las leyes básicas asociadas con la transformación de energía electromecánica.
- Disponibilidad de técnicas eficientes y confiables para el análisis de campos magnéticos, eléctricos, térmicos y de presión.
- Información de diseño sobre máquinas construidas y sobre su operación.
- Experiencia en diseño.

Con base en estos elementos y considerando las restricciones de manufactura, operación y costo, puede elaborarse un conjunto de métodos que permita efectuar la selección de materiales, dimensiones y construcción de generadores síncronos. Este debe implantarse en computadora, utilizando la modalidad

FIGURA 6

Arreglo de subconductores y aislamientos en la ranura del estator



Diseño	A	B
ESP/BOB	4	3
BOB/IAS	60	72
h_1	2	2
h_2	3.9	4.68
h_3	3	2
h_4	4.6	5.8
h_5	3	5
h_6	2.9	2.3
h_7	115.5	136.4
h_8	4.5	3.9
h_9	4.77	11.24
h_{10}	111.7	124

interactiva, debido a la cantidad de variables, cálculos y decisiones involucradas en el proceso. El IIE cuenta con un programa de esa naturaleza, para generadores de hasta 25 megawatts.

Agradecimientos

Al doctor Gurney L. Godwin por poner su experiencia a nuestra disposición y por suministrar el diseño de referencia. Al ingeniero Antonio Carvajal por implantar en computadora el conjunto de métodos desarrollados. Al doctor Jaime Avila Rosales† por haber dirigido la tesis de maestría de uno de los autores,¹⁰ que obtuvo el premio Christlieb Ibarrola 1986.

Simbología

A_c	Sección conductora por espira.
a	Número de circuitos por fase de armadura.
a_p	Ancho de la base de la zapata polar.
b_o	Ancho de la ranura de estator.
b_p	Extensión de la zapata polar.
b_{pc}	Ancho del núcleo polar.
b_{tb}	Ancho del diente en la base.
b_{tm}	Ancho del diente a la mitad.
b_{tt}	Ancho del diente en la punta.
b_w	Ancho del cuñero.
D_i	Diámetro interior de armadura.
D_o	Diámetro exterior de armadura.
D_r	Diámetro del rotor.
d_d	Diámetro de la barra amortiguadora.
G_{cu}	Peso total del cobre de estator.
G_{fe}	Peso total del hierro de estator.
h_a	Altura del conductor de armadura.
h_{ac}	Altura del núcleo de estator.
h_{at}	Altura del diente de estator.
h_f	Altura de la flecha.
h_{pc}	Altura del núcleo polar.
h_s	Altura de la ranura de estator.
h_z	Altura central de la zapata polar.
h_1	Altura total de conductores en ranura.
h_2	Altura de la ranura entre conductores y cuña.
h_3	Altura de la cuña que cierra la ranura.
i_e	Corriente de excitación.
J_a	Densidad de corriente del conductor de armadura.
J_e	Densidad de corriente del conductor de excitación.
L	Longitud del estator.
l_p	Longitud del polo.
l_z	Longitud radial al borde interno de la zapata polar.
N	Número de vueltas por fase del devanado de armadura.
N_e	Número de espiras de la bobina polar.
n_a	Número de barras apiladas del conductor de armadura.
n_b	Número de barras a lo ancho del conductor de armadura.
n_v	Número de ductos radiales de ventilación.
Q	Número de ranuras por polo y por fase en estator.
S	Número de ranuras de estator.
U_e	Tensión de excitación.
W_s	Paso de bobina en ranuras.
w	Ancho de los separadores aislantes.

Z_d	Ancho mínimo del diente del devanado amortiguador.
δ	Longitud del entrehierro.
δ_a	Espesor total del aislamiento en ranura.
δ_e	Espesor del conductor de excitación.
σ_a	Espesor de las barras del conductor de armadura.
σ_b	Ancho de las barras del conductor de armadura.
σ_e	Ancho del conductor de excitación.
τ_{sd}	Paso de ranura del devanado amortiguador.
$\hat{\tau}_{sg}$	Paso de ranura en el entrehierro.
ψ_p	Abarcamiento de la zapata polar.

Bibliografía

1. Carr, L.H.C., "The Teaching of the Principles of Electrical Machines", *JIEE*, Inglaterra, parte 2, vol. 94, 1947, pp. 443-462.
2. Levi, E., *Poliphase Motors. A Direct Approach to their Design*, John Wiley, EUA, 1984.
3. Herzog, G.W. et al., "The Application of Digital Computers to Rotating Machine Design", *AIEE Trans*, EUA, oct. de 1959, pp. 814-819.
4. Walker, J.H., *Large Synchronous Machines; Design, Manufacture and Operation*, Oxford Univ. Press, Londres, 1981.
5. Corrales, J., *Cálculo industrial de máquinas eléctricas*, Barcelona, Marcombo-Boixareu, 1976.
6. Jain, J.C., *Design, Operation and Testing of Synchronous Machines*, Bombay, Asia Publishing House, 1966.
7. Ciprián, F. y O. Díaz, "Diseño de máquinas eléctricas rotatorias asistido por computadora digital", *Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, México, ene.-feb. de 1986, pp. 20-23.
8. Foster, K.A. y M.A. Laughther, "Digital Computer Applications in Turbogenerator Design", *Brit. Power*, Inglaterra, ene. de 1962, vol. 4, núm. 2, pp. 55-60.
9. Godwin, G.L., "Optimum Machine Design by Digital Computer", *AIEE Trans.*, EUA, pt. III, vol. 78, 1959, pp. 478-488.
10. Patlán, J.O., *Diseño de generadores síncronos con ayuda de computadora* (tesis de maestría), ESIME-IPN, marzo de 1986.

OSCAR PATLAN

Obtuvo la licenciatura (1979) y la maestría en ciencias (1986) en ingeniería eléctrica, con especialidad en sistemas de potencia, en la ESIME-IPN. Antes de ingresar al IIE, trabajó en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, en el desarrollo de una bomba de agua alimentada con energía solar. En 1979, ingresó al IIE donde ha trabajado en la evaluación de aisladores para intemperie y en la coordinación de las pruebas a la industria. Desde 1982, ha colaborado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, de la ESIME, en la coordinación de proyectos y como profesor de máquinas eléctricas. En 1984, se integró al grupo de diseño de generadores síncronos, de la División de Equipos.

JUAN ACOSTA

En 1973 obtuvo la licenciatura en ingeniería eléctrica en la ESIME. Ingresó al IIE en 1976, donde desarrolló proyectos relacionados con diseño, manufactura, operación y protección de transformadores de distribución hasta 1980. En 1981 obtuvo la maestría en ciencias y en 1984, el doctorado en el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester. Actualmente, es responsable del proyecto de asimilación de tecnología para el diseño de generadores síncronos y coordinador de la especialidad de máquinas eléctricas rotatorias, del Departamento de Equipos Eléctricos, de la División de Equipos, del IIE.

Procedimiento computarizado para coordinación de protecciones en circuitos primarios de distribución

Víctor Carrillo
Raúl Velázquez

Actualmente, los métodos que se emplean para estudiar la coordinación de protecciones se basan en el trazado manual de curvas de tiempo-corriente y en la comparación visual sobre hojas logarítmicas. Debido a la gran cantidad de circuitos de distribución, el ingeniero hace un esfuerzo considerable para realizar este tipo de estudios, los que además, son rutinarios y tardados. En este artículo, se presenta un programa para el diseño asistido por computadora del proceso de coordinación de protecciones en circuitos primarios de distribución. Dicho programa —realizado en el Departamento de Transmisión y Distribución, de la División de Sistemas de Potencia, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)— sustituye de manera eficaz los procedimientos manuales que se efectúan en los estudios de coordinación de protecciones. Los principios de coordinación, sugeridos por los fabricantes de equipo, se respetaron, procurando, a la vez, conservar los procedimientos del personal de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), surgidos de la experiencia de campo. El algoritmo consta básicamente de un proceso iterativo en la selección de los ajustes, tomando como referencia los valores de corto circuito trifásico y de fase a tierra, así como los tiempos de operación.

Introducción

Un paso importante en el diseño y la operación de cualquier sistema de distribución es coordinar los diferentes dispositivos de protección de sobrecorriente con objeto de obtener el mayor grado de continuidad y de seguridad de la instalación a un costo razonable. Cuando ocurre un corto circuito, el flujo de potencia hacia el punto de falla debe interrumpirse tan rápido como sea posible y con un mínimo de consumidores afectados; es decir, deberá operar el dispositivo de protección más cercano a la falla. Los conceptos de rapidez y selectividad de un esquema de protecciones pueden verificarse rápida y fácilmente en una gráfica representativa de las características de tiempo-corriente de los distintos dispositivos de protección utilizados en el circuito. Mediante el trazado de estas características en una gráfica común, la relación de un dispositivo a otro es evidente. Cualquier problema potencial de tiempos innecesariamente largos entre dispositivos puede detectarse fácilmente.

Antecedentes

El proceso tradicional para lograr el ajuste coordinado de los dispositivos de protección consiste en sobreponer una hoja de coordinación transparente a las curvas publicadas por el fabricante.^{1,2} Cuando las escalas de tiempo se han sobrepuesto con cuidado y las escalas de corriente ajustados, se trazan las curvas de cada dispositivo por coordinar sobre el papel gráfico utilizando un curvilíneas. Al dispositivo más cercano al punto de falla considerado se le conoce como protección primaria y al dispositivo que está detrás de éste se le llama protección de respaldo. El ajuste se considera adecuado cuando la curva de operación de la protección de respaldo está 18 ciclos (de 60 Hz, o 0.3 s) arriba de la curva de la protección primaria sobre los valores de corto circuito trifásico y de fase a tierra en el sitio de localización del dispositivo primario y en el punto de alcance máximo del respaldo.

En tanto no se cumple lo anterior, se modifican los ajustes

y se repite el proceso hasta lograr la coordinación. Este procedimiento se realiza para cada par de dispositivos de protección que se encuentren en serie, tales como relévores, restauradores, fusibles y seccionalizadores.

Puede observarse entonces que el procedimiento es repetitivo, tardado, tedioso y, en ocasiones, difícil. Aunque se han hecho intentos para facilitar este tipo de estudios,^{3,4} no se ha incursionado en el uso de la computadora, cuyas características presentan ventajas para la ejecución de este tipo de procesos.

Método de diseño por computadora

Para realizar desarrollo de diseños auxiliados por computadora es necesario manejar gran cantidad de información, desde las características constructivas de la línea o circuito hasta las capacidades comerciales de los distintos tipos de dispositivos de protección.

Requerimientos preliminares

Con base en la topología del circuito, la geometría de sus estructuras y el tipo de conductor es necesario, en primer término, calcular los valores de corriente de corto circuito en los nodos de interés. Para efectos de coordinación, es suficiente con los valores de corto circuito trifásico y de fase a tierra (principalmente) en los sitios donde se encuentra instalado el equipo de protección y en los extremos del circuito.

El programa de corto circuito, asociado con el programa de coordinación, usa el método de inversión por columnas de la matriz de admitancia nodal, aplicando técnicas de dispersión.⁵ Este programa está físicamente separado del de coordinación y, una vez calculados los valores de falla, se incluyen en el archivo de datos para el proceso de coordinación. En la figura 1 se muestra el diagrama unifilar del circuito, indicando los correspondientes valores de corto circuito.

El proceso computacional requiere del conocimiento de las capacidades nominales de los diferentes dispositivos de protección disponibles en el mercado. Debido a que ésta es una información fija para cualquier caso de estudio, se decidió conservarla en un archivo de datos organizado como después se explicará.

Por último, es también indispensable contar con las curvas de tiempo-corriente (véase la Fig. 2) de los dispositivos de protección, ya que durante la ejecución del programa es necesario evaluar algunos puntos discretos o bien reconstruir la curva completa para graficarlo. Hay varias formas de almacenar esta información, por lo que es necesario para ello poner especial atención.

Creación y manejo de archivos

Debido a la gran cantidad y diversidad de información que se maneja en el programa, se optó por la utilización de tres tipos de archivos. Cada uno de ellos se seleccionó para almacenar

FIGURA 1

Diagrama unifilar indicando valores de falla

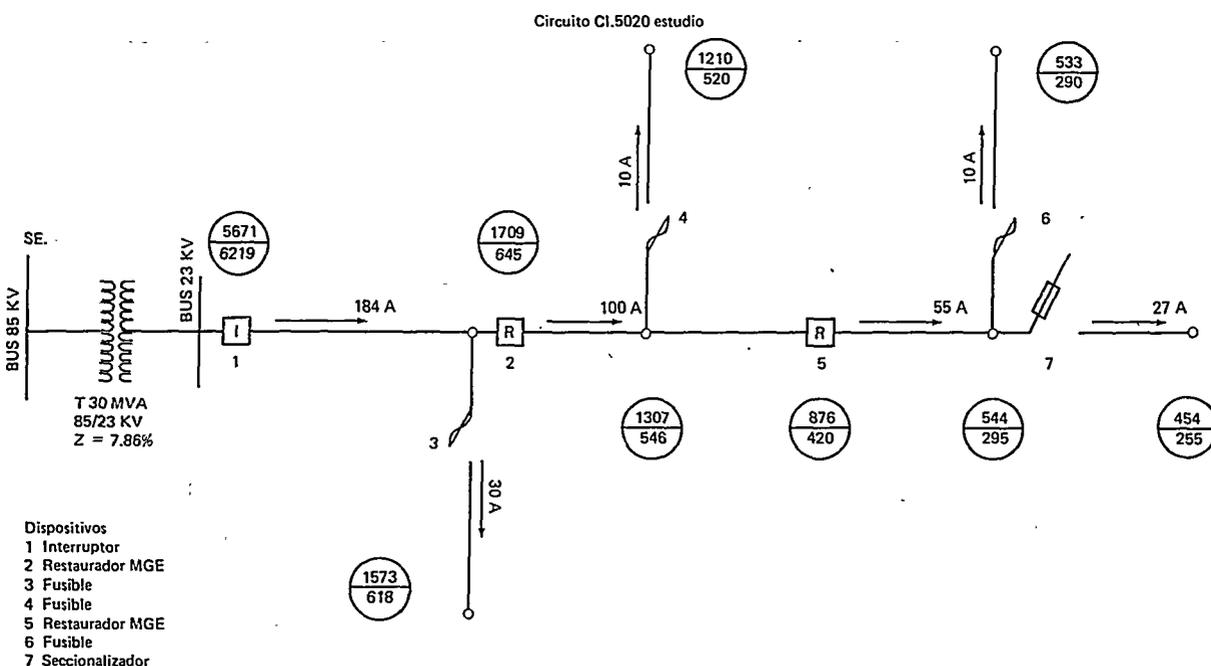
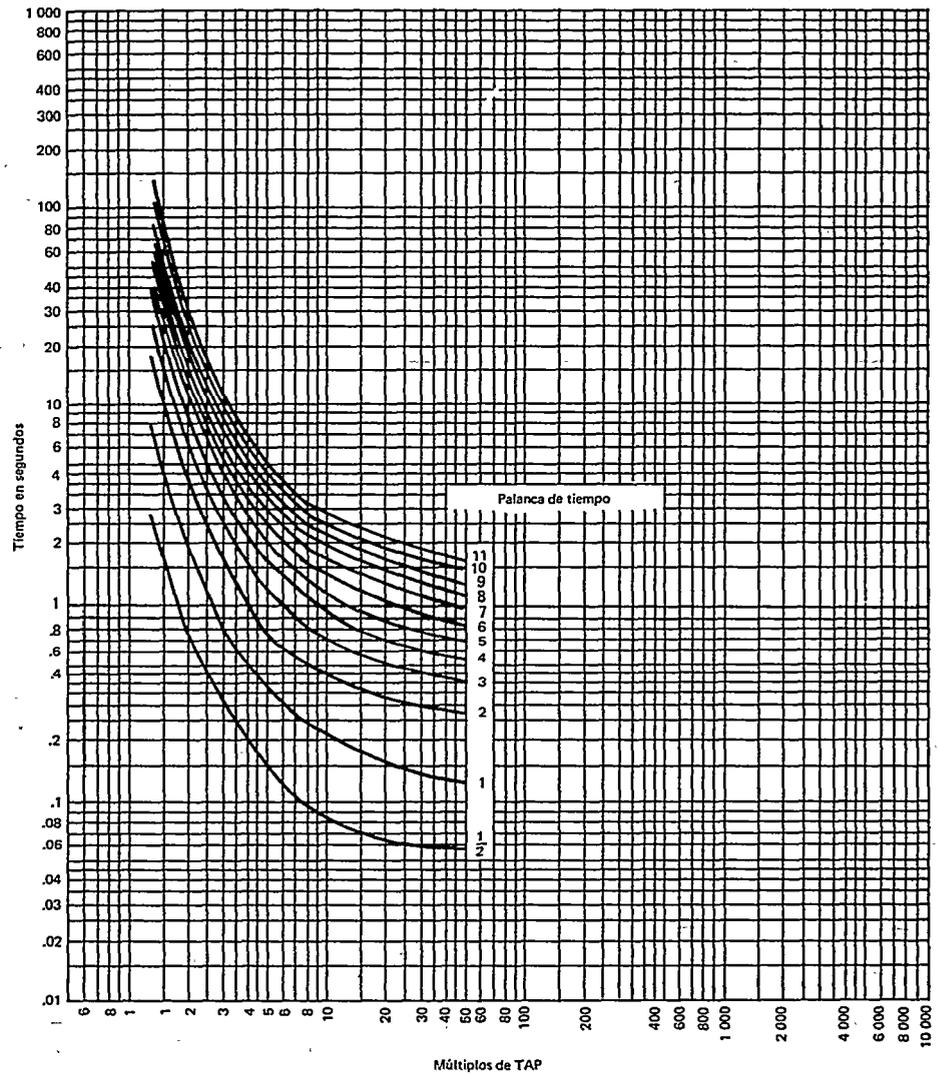


FIGURA 2

Características t-i del relevador



sólo una determinada porción del total de datos. Cada tipo de archivo seleccionado se adecua al tipo de datos que contiene. Los tipos de archivos son:

- de acceso secuencial;
- indexado, y
- de acceso directo.

El primero de los dos archivos de tipo indexado, denominado CAPDIS, contiene en cada registro los tipos y las capacidades comerciales de relevadores de sobrecorriente, restauradores, fusibles y seccionadores. En el cuadro 1 se muestra un ejemplo para el caso de los relevadores de las marcas General Electric y Westinghouse. Los números encabezados con *capacidades* indican los tipos de relevadores disponibles, desde los moderadamente inversos hasta los extremadamente inversos. En el caso

CUADRO 1

Marca				
Nombre	Clave	Cmcial	Tnsion	Capacidades 'clasin'
General Electric	GEC	IAC	1	53, 55, 66, 77
Westing House	WES	CO	1	8, 9, 11

de los otros tipos de dispositivos de protección empleados en sistemas de distribución, los archivos varían ligeramente. Dado que esta información no varía para cada caso de estudio, se diseñó como un archivo de datos, que podrá ampliarse cuando se desee incluir un elemento nuevo. Para su creación y actualización se desarrolló un programa digital adicional.

El segundo archivo indexado, denominado PUNTOS, contiene la información referente a las curvas de tiempo corriente de los dispositivos. Para su creación se desarrolló un programa que permitiera utilizar una tableta digitalizadora. Colocando la hoja de curvas publicada por el fabricante sobre la tableta, se lee punto por punto cada una de ellas con el cursor de la tableta (véase la Fig. 3). El programa es interactivo y utiliza una pantalla de video con capacidad gráfica, de tal manera que cada punto leído de la tableta se despliega en pantalla para su verificación. Resulta evidente que para localizar un registro dentro de este archivo será necesario formar primero la clave alfanumérica. En el cuadro 2 se muestra el formato de este archivo.

El último tipo de archivo, denominado de acceso directo, contiene la información general de los resultados de la ejecución del programa. Este archivo se crea durante la ejecución y varía según sea el caso de estudio. La primera información grabada se toma del archivo de datos particulares del estudio en localidades específicas, dejando en blanco el resto para llenarlo posteriormente. Conforme se ejecuta el programa, se obtienen los ajustes del equipo, los cuales, a su vez, se graban paulatinamente en este archivo. Al final de la ejecución, si ésta tiene éxito, se tendrá el archivo con la información completa, de donde a su vez se extraerá para propósitos de impresión y graficación. Cada registro tiene asociado un número de identificación que corresponde al número de identificación del dispositivo en el diagrama unifilar (véase la Fig. 1).

En la figura 3 se muestra de manera esquemática la secuencia de operación del programa, así como la variedad de los tipos de archivos ya descritos. A través de la terminal gráfica, se inicia la ejecución del programa; éste toma los datos particulares. Parte de estos datos se almacenan en el archivo de acceso directo, el resto de la información requerida se obtiene de los archivos de acceso indexado conforme se desarrolla el proceso de coordinación.

Modelado de curvas

El objeto del modelado matemático de curvas de tiempo corriente es limitar al máximo los requerimientos de memoria de la computadora sin perder de vista la exactitud ni la rapidez. Con estos tres factores en mente se revisaron los siguientes métodos de ajuste: interpolación cúbica segmentada, aproximación de Lagrange, mínimos cuadrados en dos y tres variables e interpolación lineal.

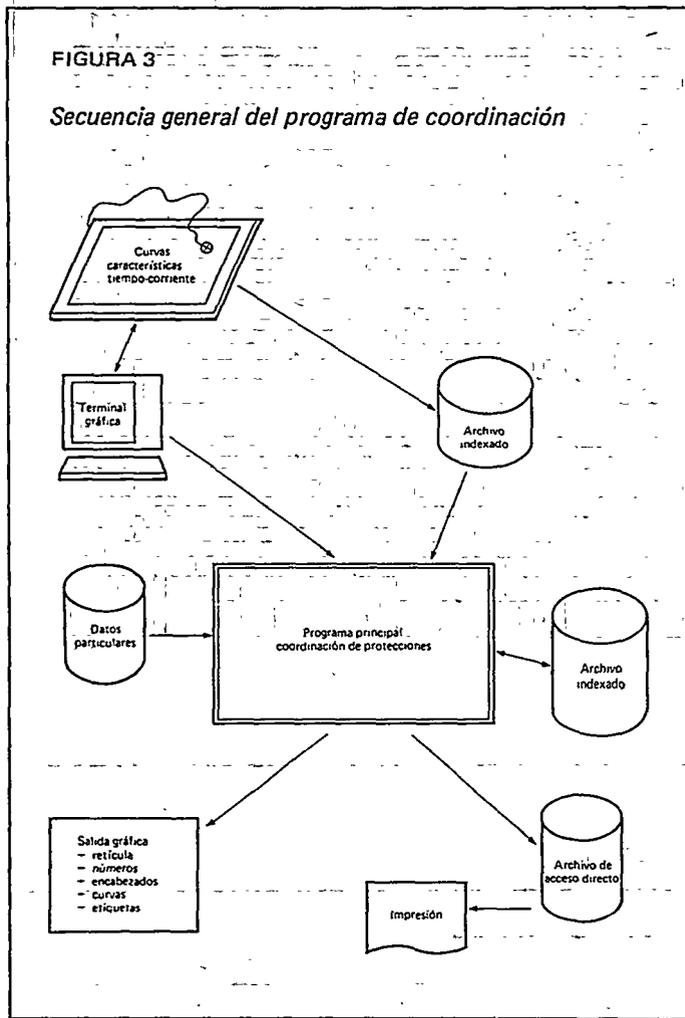
El método de mínimos cuadrados multivariable⁷ fue el que en principio arrojó resultados satisfactorios. La familia de curvas de los relevadores se define por la ecuación donde:

$$\text{Tiempo} = \sum_{j=m_1}^{m_2} \sum_{i=n_1}^{n_2} a_{ji} (p)^j (T)^i$$

donde:

- p - f (palanca)
- T - f (tiempo).

Con un polinomio de 20 coeficientes, se obtuvieron errores promedio absoluto de 8% aproximadamente. Aunque éste es un método elegante y requiere de poca memoria, no es muy estable y cualquier imprecisión en el levantamiento de las curvas produce errores considerables. La principal razón por la

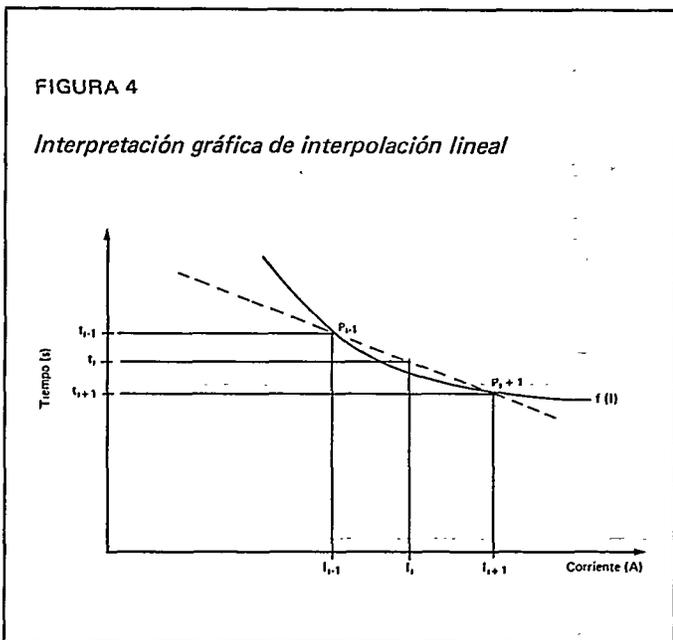


CUADRO 2

A3	A3	A1	A3	I2	A3	I2	22F10.4	2F10.4	I2	2F10.4		
Mca	Tipo	V _{nom}	Cap	Crva	Clase	Ptos	Puntos	Lmín	Lmáx	Nº crva	X0	Y0
MGE	R	1	50	2	RES	11	x ₁ , x ₂ , ..., x ₂₂					

que este método se descartó para el ajuste de curvas de relevadores es que se detectó la posibilidad de almacenar sólo una de las curvas (palanca) de cada familia de curvas de relevadores y con base en ella calcular por interpolación el resto. De esta manera, se evitó tener que almacenar la familia completa.

A este último método se le denominó como "palanca de referencia"; consiste en almacenar once puntos directamente en el archivo. Los puntos intermedios se calculan durante el proceso por interpolación lineal como se muestra en la figura 4.



El proceso analítico de interpolación es:

$$t_i = M * I_i + B$$

En donde

$$B = t_{i-1} - M * I_{i-1}$$

M — Pendiente del segmento de recta entre los puntos adyacentes al punto incógnita i.

I_{i-1} — Valor de corriente del punto inicial del segmento de recta.

t_{i-1} — Tiempo correspondiente al valor de corto circuito en el punto i - 1.

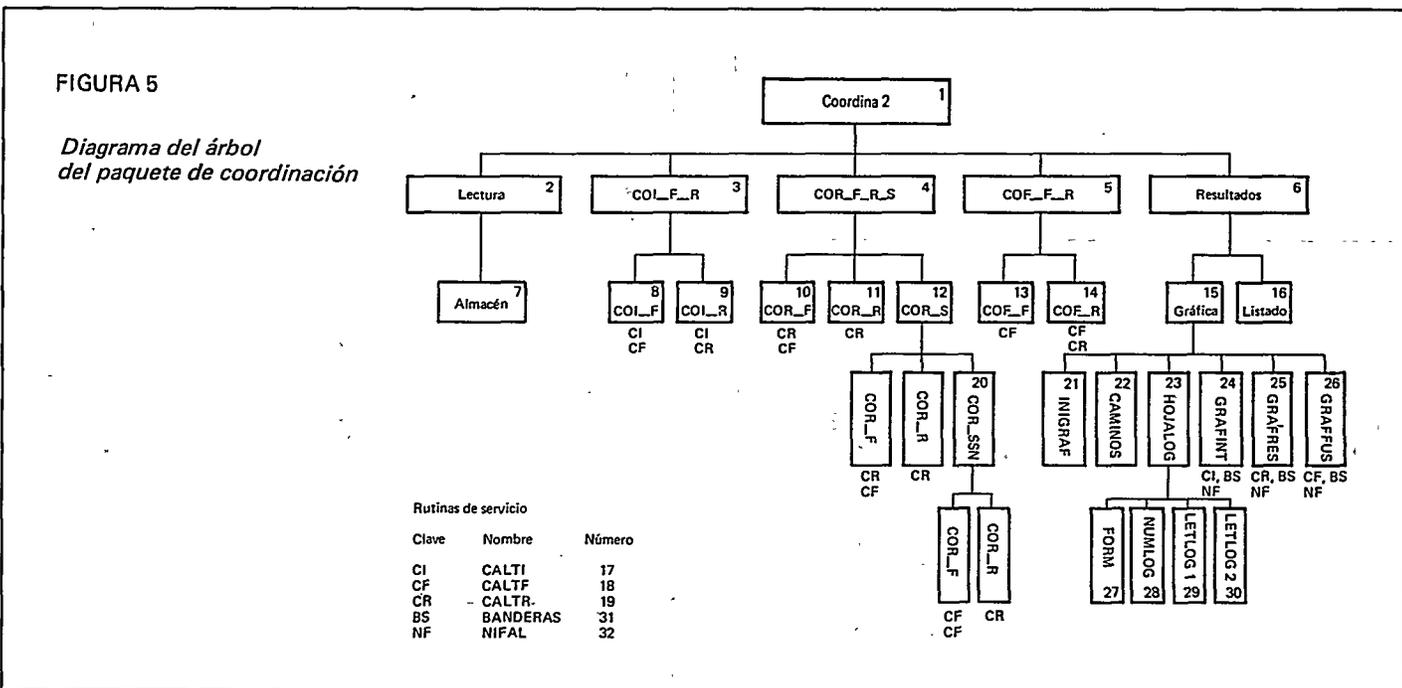
I_i — Valor de la corriente al que se requiere calcular t_i.

$$M = \frac{t_{i+1} - t_{i-1}}{I_{i+1} - I_{i-1}}$$

Este método arroja resultados muy satisfactorios⁸ y es el que finalmente se implantó en el programa. Sin embargo, en la actualidad se trabaja para que la curva de referencia pueda ajustarse por el método de mínimos cuadrados, con dos dimensiones para reducir aún más los requerimientos de memoria.

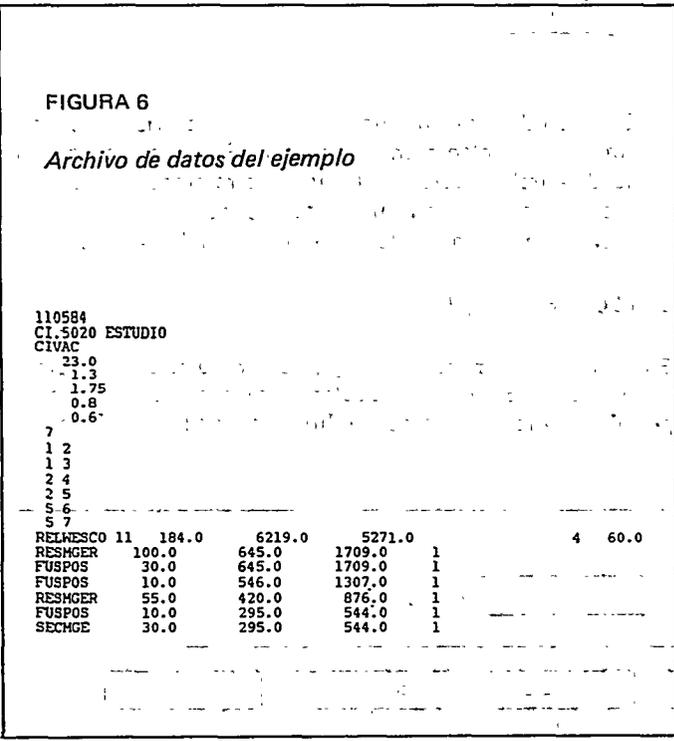
Estructura jerárquica

En la figura 5 se muestra el diagrama jerárquico del paquete de coordinación. Su forma modular permite detectar y corregir posibles errores, así como modificar o ampliar sus funciones



con un mínimo de cambio en la estructura general. También es de fácil comprensión debido a que se evitó al máximo el acoplamiento entre módulos. Los módulos se encuentran colocados de forma tal, que el proceso real de ejecución del programa coincide con el seguimiento del diagrama de arriba a abajo y de izquierda a derecha. Las subrutinas de servicio no se muestran como bloques en el diagrama, con objeto de lograr claridad en la interpretación, y sólo se indica mediante una clave sobre el bloque correspondiente a la rutina que llama a una o más rutinas de servicio.

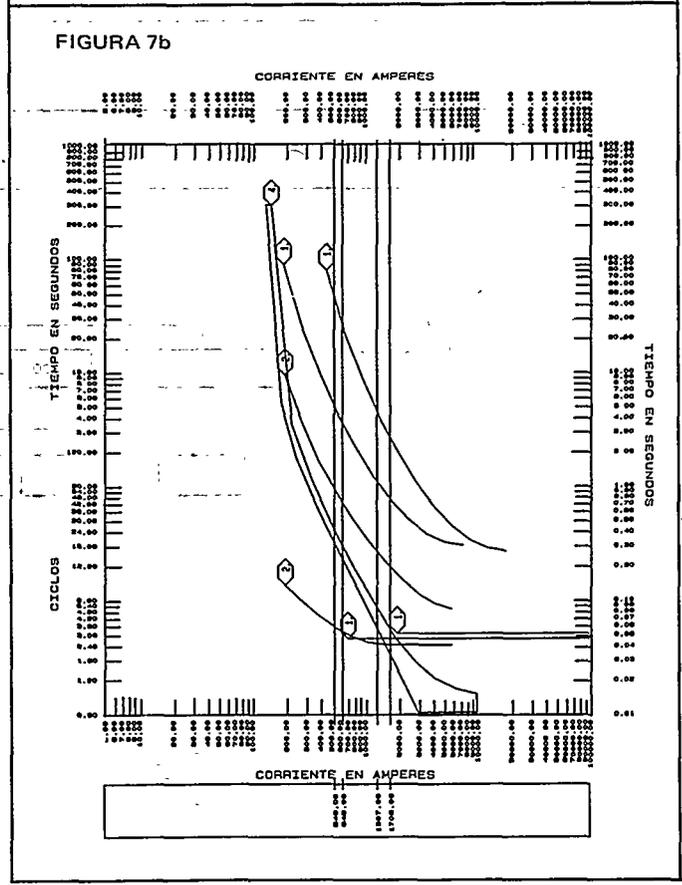
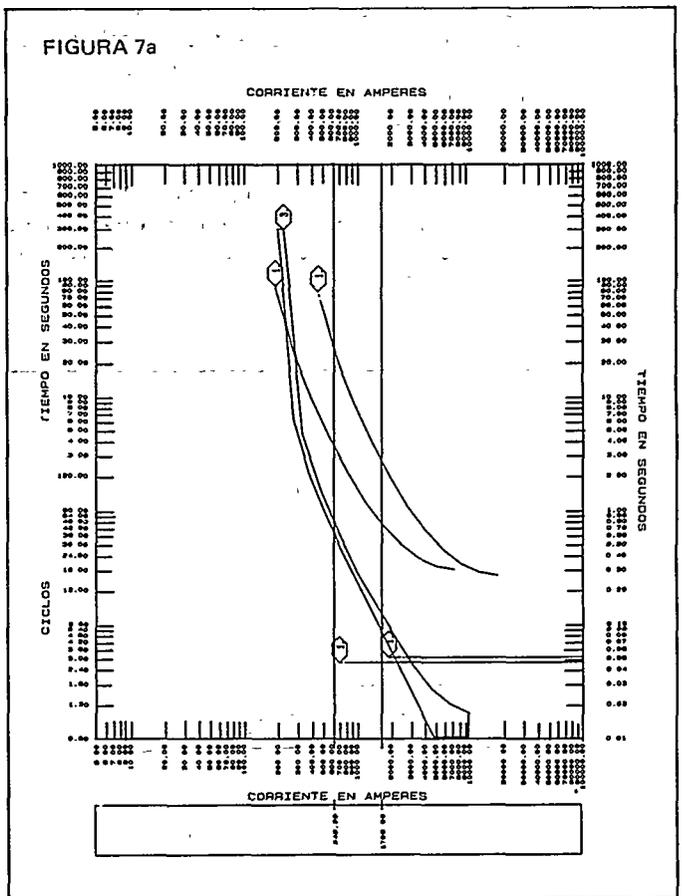
Con un ejemplo de la aplicación del programa, se presentan los resultados de la ejecución del mismo para el caso del circuito Jiutepec (véase la Fig. 1), que parte de la Subestación CIVAC, en Cuernavaca. En la figura 6 se muestran los datos necesarios para el estudio. Las figuras 7a, 7b, 7c, 7d y 7e muestran los resultados. La información mostrada en la figura 7e constituye un informe de los ajustes finales para cada dispositivo.



Equipo de cómputo requerido

El paquete de programas aquí descrito se desarrolló para el equipo de cómputo disponible en el IIE. En la figura 8 se muestra el equipo necesario para la ejecución del programa.

- TTG — Terminal de video con capacidad gráfica.
- VAX 11/780 — Minicomputadora VAX capaz de manejar los tres tipos de archivos mencionados.
- H.P. — Graficador.
- TTL — Terminal impresora para la salida tabular.
- TDIG — Tableta digitalizadora para levantamiento de datos.



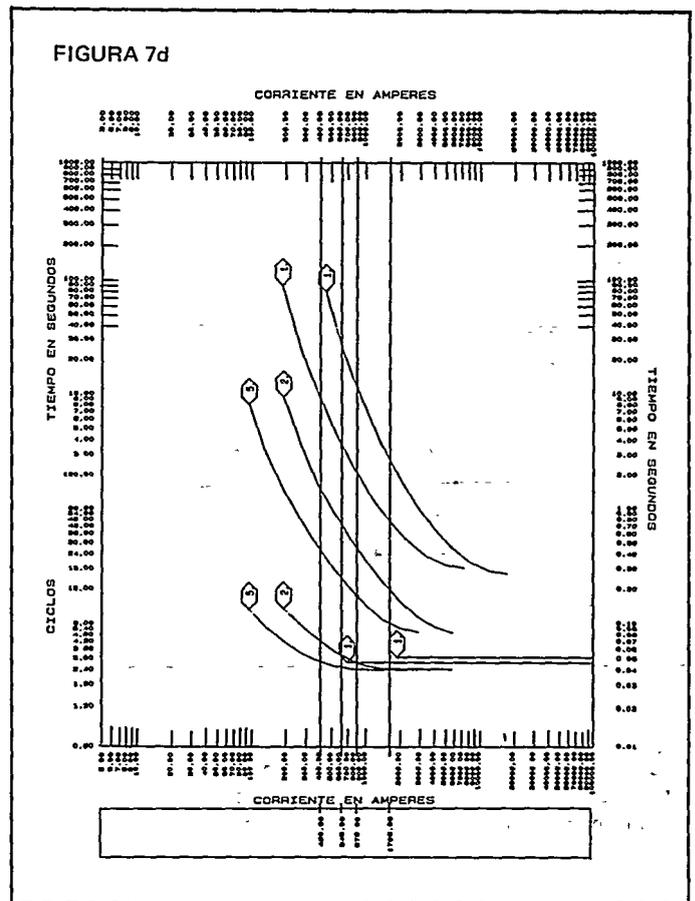
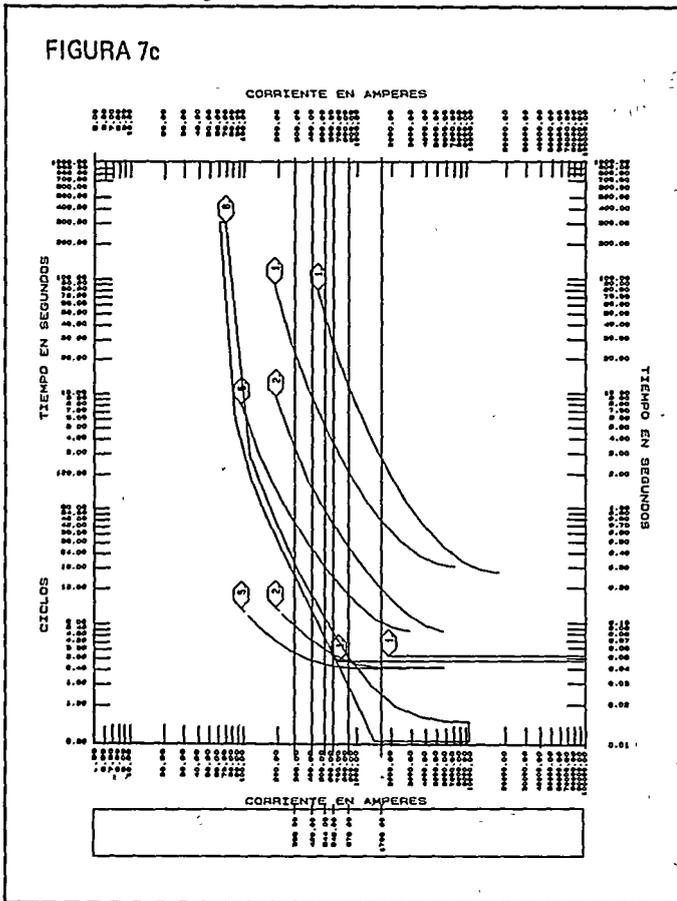


FIGURA 7e

*** RESULTADO FINAL DEL PROGRAMA "COORDINA" ***

SUBESTACION : CIVAC
 CIRCUITO : CI.5020 ESTUDIO
 VOLTAJE EN KV: - 23.000000

"AJUSTES A RELEVADORES" "DISPOSITIVO No. 1"

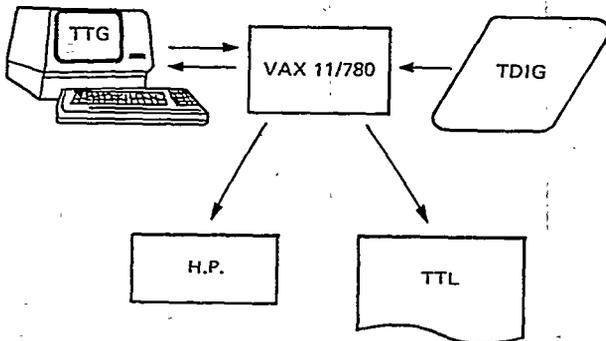
TIPO PROT.	MARCA	TIPO	CLASE	DISPOSITIVO	TAP	PALANCA	RTC	IPICK UP	FALLA MIN	FALLA MAX	CORRIENTE DE CARGA	UNIDAD INSTANTANEA
FASE	WES	CO	11	REL	6.0	8.8	60.00	360.000000	6219.000000	5271.000000	184.000000	32.9346
TIERRA	"	"	"	"	2.5	9.9	"	150.000000	"	"	"	12.0041

"AJUSTES DE RESTAURADORES, SECCIONALIZADORES Y FUSIBLES"

No. DE DISPO	MARCA	TIPO	CLASE	DISPOSITIVO	IPICK UP	FALLA MIN	FALLA MAX	CORRIENTE DE CARGA	SECUENCIA DE OPER.	No. DE OPERS.	RESTRIC. VOLTAJE	PROT. SEQ. OP.	RESIDUAL IPICKUP
2	MGE	R	100	RES	200.000	645.0000	1709.0000	100.0000	2122			2123	63.50
3		K	100	FUS		645.0000	1709.0000	30.0000					
4		K	65	FUS		546.0000	1307.0000	10.0000					
5	MGE	R	50	RES	100.000	420.0000	876.0000	55.0000	2122			0000	0.00
6		K	30	FUS		295.0000	544.0000	10.0000					
7		39	SEC		62.400	295.0000	544.0000	30.0000		3			

FIGURA 8

Equipo utilizado para la corrida del programa de coordinación



Evidentemente, si se tiene el graficador H.P. y además se cuenta con los archivos de datos completos, puede prescindirse de la terminal con capacidad gráfica, así como con la tableta digitalizadora TDIG.

Para el desarrollo de las gráficas, se utilizó el paquete gráfico PAGRA, por lo que si se intentara trasladar el paquete a otro sistema de cómputo además deberán de hacerse las modificaciones propias del sistema operativo, tener el paquete mencionado o algún sustituto equivalente.

Conclusiones

El programa descrito se realizó con el propósito principal de sustituir el procedimiento manual que se emplea tradicionalmente en los estudios de coordinación de protecciones. Con ello, se aprovechan las ventajas que brindan las computadoras. En este paquete de programación se siguen los principios de coordinación que se utilizan en el método normalizado por la Comisión Federal de Electricidad.

Resulta evidente que el paquete de programas puede no contener todos los requerimientos que los usuarios potenciales pueden solicitar; sin embargo, representa una excelente base para desarrollar un programa que cumpla con estos requerimientos y, de esa manera, lograr una herramienta de aplicación práctica de mucha utilidad. Las bases generales aquí desarrolladas, tales como manejo de archivo, gráficas y modelado, pueden aplicarse con modificaciones simples en la elaboración de otros paquetes orientados al estudio de circuitos industriales e incluso a circuitos de subtransmisión.

Referencias

1. *Distribution System Protection Manual*, McGraw Edison Company, EUA, 1978.
2. "Application and Coordination of Reclosers, Seccionalizers and Fuses", *IEEE Tutorial Course*, 1980.
3. *Coordinación de protecciones con plantillas*, documento interno de trabajo CFE.
4. *Guía de consulta para ingenieros de distribución sobre coordinación de protecciones*, documento interno, Comité de Distribución Sur-Sureste, CFE, 1985.
5. Brameller, A., R.N. Allan y Y.M. Hamam Ed., *Sparsity*, Pitman, 1976.
6. Kuester, J.L. y J.H. Mize, *Optimization Techniques with Fortran*, McGraw Hill, 1973.
7. Carrillo, V.M., *Coordinación computarizada de protecciones en circuitos de distribución* (tesis de maestría), ESIME, IPN, 1985.



VICTOR M. CARRILLO

Estudió la carrera de ingeniería eléctrica en la ESIME del IPN, en el periodo 1971-1975. Durante 1976-1977 trabajó para la CFE como superintendente de Distribución. En 1979, terminó la maestría en sistemas de potencia en la Sección de Graduados de la ESIME, donde obtuvo el diploma "Lázaro Cárdenas" por haber logrado el promedio más alto. Ha publicado varios artículos. De mayo de 1980 a la fecha ha trabajado como investigador en el Departamento de Transmisión y Distribución, de la División de Sistemas de Potencia, del IIE.



RAUL VELAZQUEZ SANCHEZ

Estudió la licenciatura en ingeniería eléctrica y la maestría en ciencias en el Instituto Politécnico Nacional, así como el doctorado en la Ecole Polytechnique de Montreal. Es miembro del IEEE y del Comité de Estudios número 36 de la CIGRE. Tiene amplia experiencia profesional y es autor de diversos artículos técnicos sobre su especialidad. Actualmente, es investigador del Departamento de Transmisión y Distribución, de la División de Sistemas de Potencia, del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

artículos técnicos

Influencia del número de álabes en el comportamiento dinámico de grupos

Oscar Yrigoyen

En este artículo se investiga el cambio de frecuencias naturales en grupos formados por diferente número de álabes.

Para calcular las frecuencias naturales y los modos de vibración, se utiliza el método del elemento finito, modelando álabes reales con elementos viga.

Los modelos utilizados representan grupos de dos a diez álabes unidos por dos alambres amortiguadores y un cinturón externo. Los alambres amortiguadores y el cinturón externo también se modelaron con elementos viga. Las rigideces angulares en los puntos de intersección entre los álabes con los alambres amortiguadores y con el cinturón externo se simularon con elementos frontera.

Se comparan resultados analíticos con valores de laboratorio y de campo para un álabe sencillo y un grupo de diez álabes.

Introducción

En la mayor parte de las turbinas de vapor, el diseño de los álabes de los últimos pasos de baja presión es tal que éstos van unidos entre sí por cinturones externos y, en ocasiones, por alambres amortiguadores para formar grupos de álabes.

El número de álabes en el grupo puede ser uniforme para un disco determinado o variable y representa, en algunos casos, una estructura muy compleja que requeriría el estudio de un grupo completo. En este artículo se analizan grupos con número uniforme de álabes. El uso de grupos de álabes en las turbi-

nas de vapor es de gran ayuda para la desintonización de ciertos modos y para disminuir amplitudes de vibración.

En este trabajo, se analizaron los cambios en frecuencias naturales y modos de vibración, debidos al número de álabes del grupo. Para el análisis, se utiliza el método del elemento finito y se comparan algunos resultados.

El grupo de álabes analizados forma parte del último paso de una turbina de vapor de baja presión de 158 MW. Cada álabe tiene una altura de 59 cm. Los alambres amortiguadores atraviesan el álabe por dos barrenos localizados a 25.4 y 43.2 centímetros a partir de su base. El cinturón externo une los álabes por sus extremos libres (véase la Fig. 1).

Modelado de un álabe sencillo

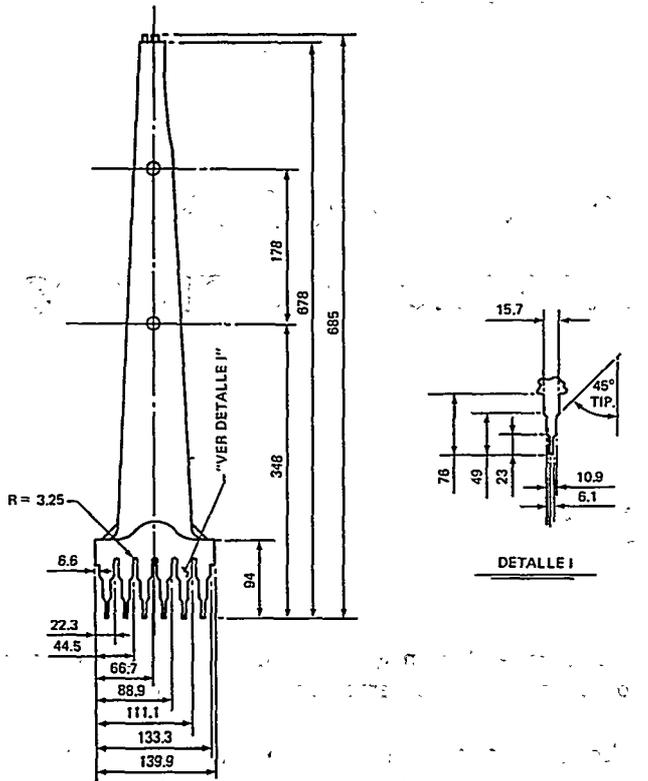
Debido a que la geometría del álabe es tan complicada por su torcimiento y por el cambio continuo de las secciones transversales, fue necesario digitalizar 37 secciones transversales diferentes con un digitalizador tridimensional.

El elemento utilizado para el modelo fue el elemento viga, que requiere información de las secciones transversales, tales como áreas, momentos de inercia y puntos extremos entre otros.¹

En total se utilizaron 36 elementos viga para modelar un álabe sencillo. Se hicieron cálculos de las cuatro primeras frecuencias naturales de este modelo y se compararon con valores medidos en el laboratorio.

FIGURA 1

Geometría global del álabe



Modelado del grupo de álaves

Utilizando la geometría del álabe sencillo como estructura básica y con el comando de rotación de nodos del preprocesador "MODEL",² se crearon grupos de dos a diez álaves. Los alambres amortiguadores y el cinturón externo también se modelaron con elementos viga. Las dimensiones de las secciones transversales de los amortiguadores y del cinturón externo se muestran en la figura 1:

Los datos de radio de giro y ángulo entre álaves se obtuvieron de los manuales de operación de la turbina.

Los tiempos de cómputo para resolver cada uno de los modelos varía, dependiendo del número de grados de libertad. El modelo del grupo más grande (10 álaves) utilizó en total 387 elementos y 760 nodos, dando un total de 2 160 grados de libertad. Estos representan el número de ecuaciones que es necesario resolver.

Influencia del número de álaves en el grupo

Por muchos años se han utilizado diversas formas de agrupar álaves. De las más usadas pueden considerarse: las de cinturón externo integrado, remachado, de doble alambre en D y zig-zag, entre otras.³

La razón principal para hacer este tipo de arreglo es lograr una mejor desintonización de los grupos de álaves y reducir las amplitudes de vibración.

Con la ayuda del método del elemento finito, es posible tener un estimado del comportamiento dinámico de grupos formados con diferente número de álaves, sin tener que recurrir a la construcción de costosos prototipos.

Como primer análisis, se encontraron las primeras cuatro frecuencias naturales de un álabe sencillo y se compararon con las respectivas frecuencias naturales medidas en el laboratorio. Esto sirvió para asegurar que el modelo del álabe sencillo era el adecuado.

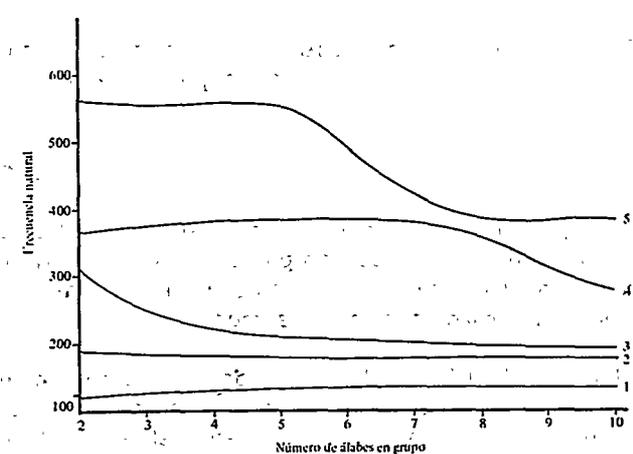
Para poder estimar el efecto que tienen los álaves en un grupo, se hicieron análisis dinámicos con grupos de dos a diez álaves.

Debido a que el programa utilizado (SAP-6) no considera los momentos producidos por los alambres amortiguadores durante el análisis dinámico, fue necesario sustituir estos momentos por rigideces angulares.⁴ Los coeficientes de rigidez angular se aplicaron en los puntos de intersección entre los álaves con los alambres amortiguadores y con el cinturón externo por medio de elementos frontera.

Los resultados obtenidos para las primeras cinco frecuencias naturales se muestran en la figura 2.

FIGURA 2

Variación de frecuencias naturales con respecto al número de álaves del grupo



Mediciones en laboratorio y en campo

Para poder contar con algunos valores experimentales y comparar los resultados obtenidos por el método del elemento finito, se hicieron mediciones de frecuencias naturales para un álabe sencillo en el laboratorio y para el grupo de diez álabes en el campo.

La comparación de resultados para el caso del álabe sencillo se muestra en el cuadro 1.

CUADRO 1

Frecuencias naturales de álabe sencillo

Modo de vibración	Frecuencias naturales (Hz)		Error (%)
	MEF	Exper.	
1	59.48	61.2 - 62.5	2.9
2	166.40	172.5	3.7
3	287.80	220.0	30.8
4	464.50	427.5 - 435.0	6.8
5	-	535.0	-

En el caso del grupo de álabes, las mediciones se hicieron en los álabes montados en el rotor de la turbina. Al analizar la señal de vibración con un analizador de espectro, se obtuvieron valores de las diferentes frecuencias naturales. Algunos ejemplos de estos resultados se muestran en la figura 3 y la comparación de resultados con el método del elemento finito, en el cuadro 2.

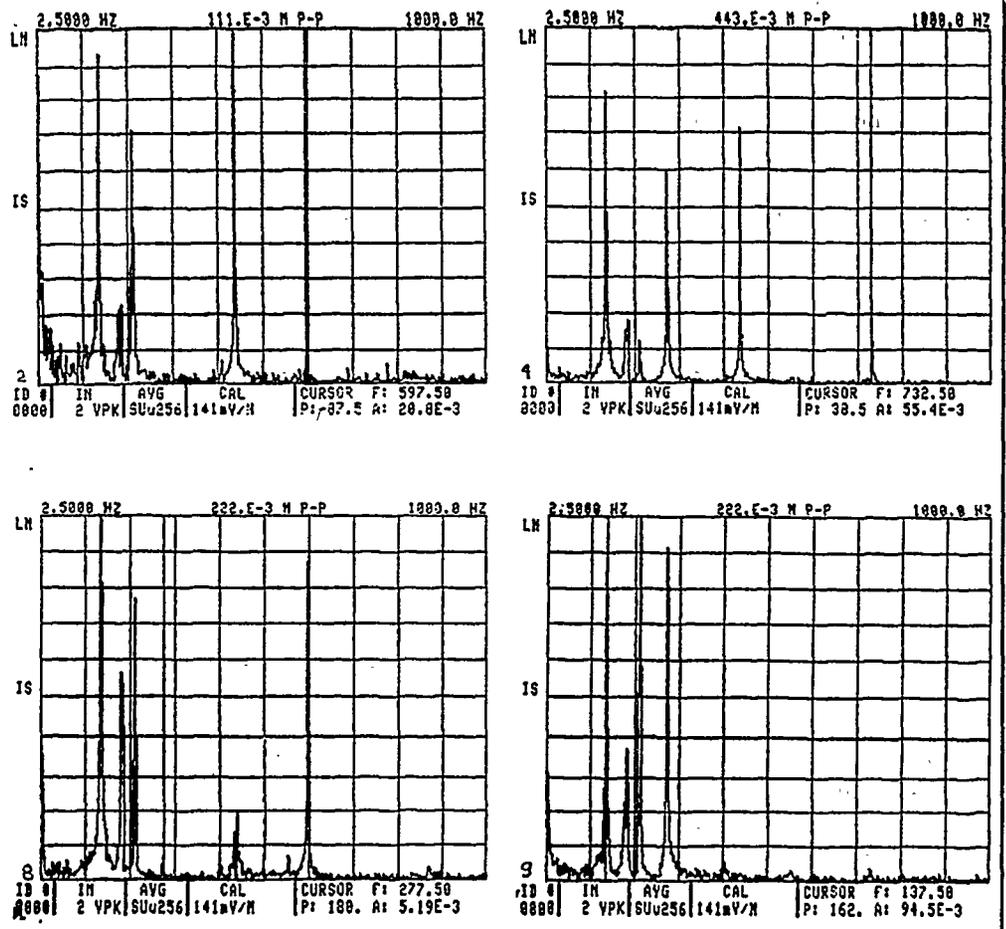
CUADRO 2

Frecuencias naturales del grupo de diez álabes

Modo de vibración	Frecuencias naturales (Hz)		Error (%)
	MEF	Exper.	
1	136.7	137.5 - 140.0	0.6
2	181.9	182.5 - 185.0	0.3
3	195.5	212.5 - 215.0	8.7
4	282.0	272.5 - 275.0	2.5
5	386.9	412.5	6.6

FIGURA 3

Análisis de espectro de diferentes álabes en campo



Análisis de resultados

A pesar de que las rigideces angulares entre los álabes y sus accesorios se incrementan conforme aumenta el número de álabes en un grupo, la frecuencia natural del grupo no necesariamente sigue esta tendencia. A excepción del caso del tercer modo del álabes sencillo, las frecuencias naturales calculadas por el modelo del elemento finito presentan errores menores que 6.8%, con respecto a las obtenidas experimentalmente. El error de 30.8% que se presenta en el tercer modo de vibración, puede deberse al tipo de montadura utilizada en el laboratorio o a imprecisiones en la evaluación del momento polar de inercia de los elementos.

Como puede observarse en el cuadro 2, el error máximo en el cálculo de las frecuencias naturales del grupo de diez álabes es de 8.7%. Este se evalúa con respecto a las frecuencias naturales medidas en los álabes montados en la turbina.

Como puede apreciarse en la figura 2, el efecto del número de álabes es considerable en los tres primeros modos de vibración para grupos de dos a cuatro álabes, en tanto que para grupos formados por cinco o más álabes, el cambio de frecuencia natural no es considerable. Por el contrario, los modos altos (cuarto y quinto) se ven afectados en grupos formados por más de cinco álabes.

Considerando los valores de las frecuencias naturales, el comportamiento del grupo es diferente para cada modo específico. En tanto que en el primer modo hay un aumento ligero, en los modos restantes se manifiesta una disminución considerable, excepto en el segundo modo que casi no presenta cambios. Por limitaciones de las herramientas de cómputo, a menudo es conveniente obtener las frecuencias naturales de grupos grandes de álabes por extrapolación. Esto se hace a partir de cálculos relativamente más sencillos, utilizando modelos de gru-

pos de un menor número de álabes. De lo presentado en la figura 2, se deduce que es necesario llevar a cabo un estudio del caso específico antes de efectuar dichas extrapolaciones.

Conclusiones

Se modelaron álabes sencillos y agrupados utilizando el método del elemento finito. Este permitió realizar el análisis dinámico con resultados satisfactorios.

Formar grupos de álabes modifica de manera considerable las frecuencias naturales de los diferentes modos de vibración de álabes de turbinas.

La variación de la frecuencia natural de cada modo de vibración, con respecto al número de álabes de un grupo, presenta valores y tendencias diferentes para cada modo.

La extrapolación de la frecuencia natural a partir de grupos menores de álabes no es siempre posible, por lo que se recomienda efectuar un estudio del caso específico.

Referencias

1. *SAP-6 User Manual*, University of Southern California, Department of Civil Engineering, Los Angeles, enero de 1980.
2. *MODEL SAP-6 User Manual*, University of Southern California, Department of Civil Engineering, Los Angeles, enero de 1980.
3. Ortolano Ralph J. y William A. Burton, "Field Testing of Long Arc Shrouding and Continuous Tied Blading in an L-1 Stage at SCE", *Steam Turbine Blade Reliability Workshop*, EPRI, 12 de marzo de 1986.
4. Aguirre, J., J. Kubiak, O. Yrigoyen y A. Carnero, *Análisis dinámico y de esfuerzos de los álabes de la turbina Toshiba 158 MW, de la CTE Puerto Libertad (Informe Técnico Parcial)*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, 1986.

OSCAR YRIGOYEN LAZZERI

Obtuvo el título de ingeniero mecánico en la Universidad de las Américas, Puebla, y el de maestro en ciencias en ruido y vibraciones de máquinas rotativas en el Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Inglaterra. Es candidato a investigador nacional por el Sistema Nacional de Investigadores. Desde 1984 trabaja como investigador del Departamento de Equipos Mecánicos, de la División de Equipos, del Instituto de Investigaciones Eléctricas.



mx9800265

Diseño de sistemas de conexión a tierra en subestaciones

Raúl Velázquez*

Los sistemas de conexión a tierra han sido objeto de gran cantidad de estudios analíticos y experimentales en los pasados quince años, que han dado origen a informes de investigación sobre los diversos aspectos que involucra esta técnica. En este trabajo se revisan brevemente diversos aspectos que es necesario considerar para su diseño, análisis y puesta en operación.

Introducción

La ingeniería de los sistemas eléctricos de potencia se ha desarrollado intensamente en los últimos años. En la mayor parte de las áreas involucradas, diversos grupos de expertos trabajan en aspectos de investigación básica y en la actualización e implantación de métodos y técnicas que facilitan y optiman las actividades de planeación y de diseño. Dentro de este contexto, el diseño y la verificación de los sistemas de conexión a tierra de las subestaciones eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) han evolucionado ampliamente con la ayuda de programas de computadora y métodos de medición desarrollados e implantados en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para las diferentes áreas de diseño.

En este artículo se describen los criterios contemplados para el diseño de sistemas de conexión a tierra de subestaciones eléctricas; se plantean brevemente los desarrollos matemáticos empleados en los métodos numéricos para el análisis del comportamiento, y se presentan recomendaciones prácticas para la medición de la resistencia de conexión a tierra.

Criterios de diseño

La conexión a tierra de los sistemas eléctricos permite obtener un mejor funcionamiento de las instalaciones eléctricas, al tiempo que se reducen los riesgos de electrocución para el personal y el público en general.

Sin embargo, la simple conexión a tierra no constituye una garantía para la protección del equipo y de las personas, por lo

* Jefe del Departamento de Transmisión y Distribución de la División de Sistemas de Potencia. Véase currículum en *Boletín IIE*, vol. 10, núm. 4, julio/agosto de 1986, p. 150.

que es necesario realizar diseños particulares para cada una de las instalaciones. Por ejemplo, la conexión a tierra de subestaciones constituye un problema especial al considerar la prevención de la electrocución de personas y la protección de circuitos de comunicación como parámetros fundamentales de diseño. Estos criterios adquieren importancia debido a:

- Corrientes de falla a tierra elevadas que involucran la tierra como trayectoria en el circuito de retorno.
- Posibilidad de presencia de seres vivos en el área de la subestación o su vecindad.
- Existencia de circuitos de comunicación y control, tales como líneas telefónicas.

A causa de esto, las subestaciones deberán conectarse a tierra a través de electrodos de conexión a tierra de diseño particular, a fin de cumplir con:

- La limitación de la elevación del potencial de tierra.
- El control de los perfiles de potencia sobre la superficie del terreno.

Los dos parámetros anteriores caracterizan criterios fundamentales diferentes. Para las líneas de comunicación que entran y/o salen de la subestación, la elevación de potencial total del electrodo, con respecto a tierra remota, constituye la restricción importante, en tanto que para el problema de electrocución, las tensiones que deben considerarse están determinadas por las diferencias de potencial presentes entre dos puntos situados sobre la superficie del terreno. Por ejemplo, si el electrodo de conexión a tierra estuviera constituido por una placa metálica, las diferencias de potencial sobre la superficie del terreno serán prácticamente cero, en tanto que la elevación

total del electrodo podría ser de varios miles de volts con respecto a la tierra remota.

Protección de circuitos de comunicación

Las líneas de comunicación que interconectan la tierra remota con el electrodo de conexión a tierra local deberán protegerse contra la elevación de tensión máxima posible entre dos puntos, IR ; donde I es la corriente de falla a tierra que circula a través del electrodo de conexión a tierra y R , la resistencia de conexión a tierra del mismo electrodo. En general, pueden utilizarse dos tipos de sistemas de protección. La selección final dependerá de las limitaciones particulares. Por ejemplo, si la continuidad de servicio no es un requisito del sistema, los conductores del circuito de comunicación se conectarán a los electrodos de conexión a tierra en sus extremos mediante elementos de protección en derivación. Estos elementos normalmente se calibran para tensiones que oscilan entre 60 y 90 volts o mayores. Por lo contrario, si la continuidad del servicio de comunicaciones es necesaria durante el periodo de la falla, la solución que se empleará es instalar transformadores de aislamiento. La función de estos transformadores es cancelar las corrientes originadas por diferencias de potencial entre electrodos de conexión a tierra remotos.

Ahora bien, si la elevación de potencial esperado es lo suficientemente elevada como para llegar a fundir las líneas telefónicas, los transformadores de aislamiento se constituyen en una necesidad, a fin de prevenir los potenciales peligrosos entre los puntos donde el conductor resulta vulnerable. El costo de estos transformadores puede llegar a ser del orden de mil dólares por par de conductores, costo que se incrementa para tensiones nominales del orden de 5 kV o mayores.

Con base en esto, en instalaciones, donde el número de líneas telefónicas es muy grande y la elevación del potencial total esperada para el electrodo es importante, puede resultar menos costoso disminuir la resistencia de conexión a tierra del electrodo, que instalar transformadores de aislamiento, pudiendo presentarse situaciones, en las que la protección de los circuitos de comunicación determinan al diseño de la red de tierras.

Prevención de la electrocución

Para esta situación, los potenciales que deben considerarse son aquellos que se manifiestan sobre la superficie del terreno en la vecindad del electrodo de conexión a tierra. Estos potenciales —que se presentan entre diferentes puntos de la superficie del terreno, mejor conocidos como perfiles de potencial— plantean dos tipos de situaciones.

La tensión de contacto

La tensión de contacto es la diferencia de potencial a la que se expondrá una persona entre el punto donde establece contacto con una estructura aterrizada de la subestación y el punto sobre la superficie del terreno en el que los pies establecen contacto. La distancia horizontal entre estos dos puntos, para propósitos de cálculo, se supone de un metro.

Ahora bien, considerando la posibilidad de contacto entre una estructura aterrizada y el punto más desfavorable sobre la superficie del terreno, las guías aplicables (IEEE-80) suponen la tensión del contacto como la diferencia de potencial entre un conductor de la red y el punto donde se produce la menor elevación de potencial dentro del área de la subestación.

La tensión de paso

La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, los cuales se encuentran situados a un metro de distancia el uno del otro.

Para prevenir la electrocución en presencia de corrientes de falla a tierra, el criterio básico de seguridad está constituido por las tensiones de contacto y de paso tolerables especificadas por Dalziel, quien estableció —a través del análisis de múltiples experimentos— la magnitud de corriente máxima que no provocará fibrilación ventricular para una persona de 50 kg, mediante de la expresión:

$$I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

donde:

I_k — es la corriente que circulará por el cuerpo humano (A).
 t — es el tiempo de exposición a la circulación de la corriente eléctrica (s).

En general, una vez considerado el circuito equivalente involucrado en las situaciones peligrosas, las expresiones normalizadas que definen las tensiones peligrosas son:

$$E_{\text{contacto}} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

$$E_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

donde:

ρ_s — es la resistividad superficial del terreno en contacto directo con los pies (ohm-m).
 t — es el tiempo de duración de la falla (s).

Parámetros de diseño

Medición de la resistividad del terreno

La medición de la resistividad del terreno, parámetro fundamental en el diseño y comportamiento de electrodos de conexión a tierra, se realiza comúnmente mediante el método de Wenner. Este método, emplea cuatro electrodos auxiliares, que se entierran sobre una línea recta y a igual separación entre

ellos. El aparato utilizado en la medición es el conocido medidor de tierras de cuatro terminales, "MEGGER". La resistencia medida y la separación entre electrodos sirven para determinar la resistividad del terreno a través de la siguiente expresión:

$$p = 2 \pi a R$$

donde:

- p — es la resistividad del terreno (ohm-m).
- a — es la separación entre electrodos (m).
- R — es la resistencia medida en el instrumento (ohm).

Corriente de falla a tierra

La corriente de falla a tierra se determina por medio del método clásico, con la expresión:

$$I = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0}$$

donde:

- I — es la corriente rms de falla a tierra (A).
- E — tensión de fase a tierra (V).
- X₁ — reactancia subtransitoria de eje directo, secuencia positiva (ohm/fase).
- X₂ — reactancia de secuencia negativa (ohm/fase).
- X₀ — reactancia de secuencia cero (ohm/fase).

Además del valor de corriente calculado mediante la expresión anterior, es necesario incluir el efecto del factor de decremento, así como el efecto de la expansión futura del sistema.

Diseño de los electrodos de conexión a tierra

En general, forma el electrodo de conexión a tierra de una subestación, una malla de conductores interconectados, enterrados horizontalmente. Las varillas de tierra interconectadas a la red, con frecuencia, no son necesarias; sin embargo, pueden resultar útiles cuando se presentan variaciones importantes de la resistividad del terreno cercano a la superficie del suelo.

El equipo y las estructuras, así como los conductores de conexión a tierra de circuitos y los elementos aterrizados, se conectan sólidamente a dicha red. El control de gradientes, en particular las tensiones de contacto, constituyen la base para el diseño.

En la mayor parte de las situaciones prácticas, los conductores horizontales constituyen el principal elemento de control de gradientes. En consecuencia, partiendo del conocimiento logrado a través de la experiencia, se sabe que la mayor concentración de la densidad de corriente que fluye a tierra se concentrará en la periferia de la red y, en particular, en las esquinas. Por tanto, se recomienda concentrar los conductores en la periferia de la red como un medio efectivo para el control de gradientes.

Análisis teórico del comportamiento de sistemas de conexión a tierra

El método clásico para determinar el comportamiento de electrodos de conexión a tierra emplea ecuaciones simplificadas, las más conocidas son las propuestas por la *Guía 80* del IEEE.¹ Con este método, los valores máximos de las tensiones de toque y paso que se presentarán durante la presencia de una falla a tierra —para el caso de una red cuadrada o rectangular y una configuración regular instalada en un terreno de resistividad homogénea— se calculan empleando expresiones empíricas que se determinan con base en suposiciones simplistas.

Sin embargo, debido al incremento en el número y tamaño de los electrodos de conexión a tierra, se han desarrollado métodos analíticos flexibles y con mayor grado de precisión.^{3,4,5}

Conceptos básicos

Los métodos de diseño desarrollados durante los últimos años se han orientado hacia la obtención de sistemas de conexión a tierra seguros y económicos. Su característica básica permite calcular potenciales sobre cualquier punto en la vecindad del electrodo de conexión a tierra. Estos cálculos son posibles debido al conocimiento de la distribución de corriente sobre los diferentes segmentos del electrodo enterrado en un suelo homogéneo o bien, en suelo equivalente de dos capas.

Análisis de sistemas de conexión a tierra por computadora

La solución precisa de los problemas de la elevación de tensión y las tensiones de paso y toque requieren del cálculo de la distribución de corriente en el electrodo del sistema de conexión a tierra. El problema básico incluye dos aspectos: la determinación de la distribución de corriente sobre los conductores que constituyen el electrodo de conexión a tierra y el cálculo de los perfiles de potencial sobre la superficie del terreno.⁵

Un algoritmo para la determinación de estos parámetros se basa en:

1. Lectura y almacenamiento de datos.
2. Determinación de la matriz de resistencia:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1n} \\ R_{21}, \dots, R_{2n} \\ \vdots \\ R_{n1}, \dots, R_{nn} \end{bmatrix}$$

3. Determinación de la distribución de corriente.

$$[R][I] = [V]$$

4. Determinación de la resistencia de conexión a tierra del electrodo.

5. Determinación de la elevación de potencial y los perfiles de potencial sobre la superficie del terreno.

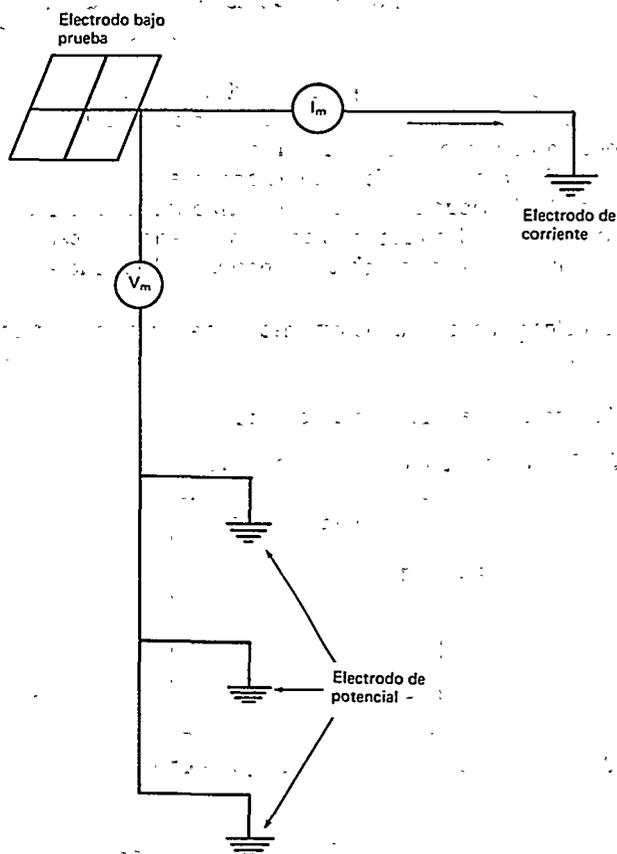
En general, el grado de efectividad de un sistema de conexión a tierra sólo podrá lograrse por medio de mediciones adecuadas, a través de las que será posible asegurar la concordancia entre los resultados teóricos y el nivel real de protección y operación de una instalación.

Procedimiento de medición

El método universalmente empleado para la medición de la resistencia de conexión a tierra consiste en la inyección de una corriente de prueba, a través del electrodo que se va a medir y de un electrodo auxiliar, denominado electrodo de corriente, al mismo tiempo que se determina la tensión creada entre el electrodo bajo prueba y un punto sobre la superficie del terreno mediante un segundo electrodo o sonda de potencial. En la figura 1 se muestra este principio.

FIGURA 1

Circuito de medición de la resistencia de conexión a tierra



La corriente de prueba, I_m , se inyecta a través del electrodo bajo prueba y del electrodo auxiliar de corriente localizado a una distancia conveniente del primero. La elevación de tensión del electrodo, V_m , creada por I_m , se mide por medio de la sonda de potencial. Si mecanismos de interferencia no influyen la medición, la resistencia del electrodo estará determinada por la relación:

$$R = \frac{V_m}{I_m}$$

La dirección ideal del cable asociado a la sonda de potencial deberá formar un ángulo de 90° en relación con la recta que forman el electrodo bajo prueba y el electrodo auxiliar de corriente. Para obtener el valor correcto de V_m , deberán efectuarse varias mediciones a distancias crecientes a partir del electrodo bajo prueba. Al obtener tres o más lecturas sucesivas similares, podrá considerarse que V_m es correcta.

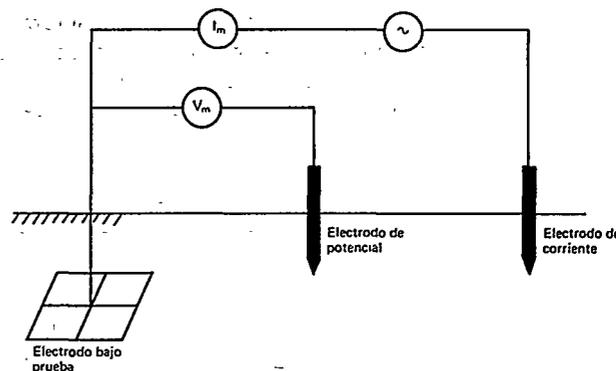
Método de caída de tensión

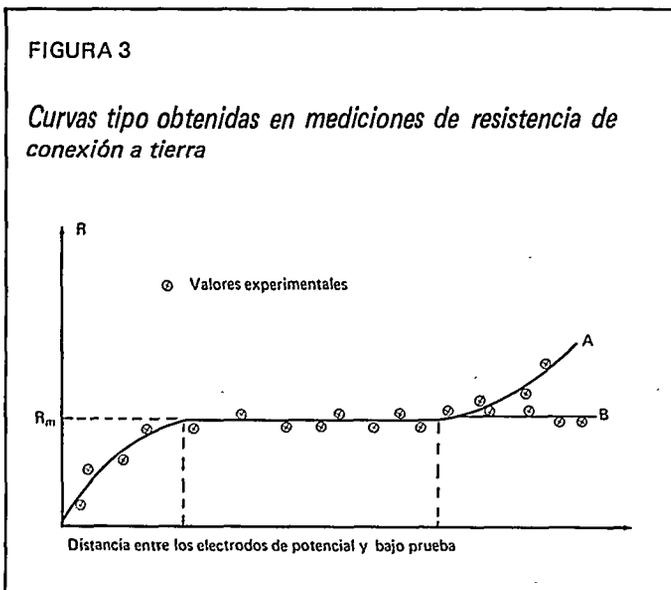
El método de caída de tensión es una particularización del método anterior. La configuración de la medición se indica en la figura 2. Para efectuar la medición de la tensión V_m , la sonda de potencial (electrodo de potencial), se desplaza en forma regular a lo largo de la línea que forman el electrodo bajo prueba y el electrodo de corriente. Para cada punto se determina el valor de la tensión V y la corriente I , obteniéndose la curva A de la figura 3.

El valor de la resistencia de conexión a tierra es el que se obtiene en la parte plana de la curva (región asintótica al eje de las abscisas).

FIGURA 2

Circuito de medición aplicando el método de caída de tensión





Mediciones en campo

El método de medición de caída de tensión presentado en la sección anterior, describe un caso ideal. En la práctica, con el fin de limitar errores, es recomendable efectuar varias mediciones, utilizando el procedimiento:

1. Seleccionar dos o tres direcciones para efectuar las mediciones.
2. Instalar el electrodo auxiliar de corriente y su cable asociado en una de dichas direcciones, a una distancia igual al lado mayor del rectángulo que circunscribe al electrodo de conexión a tierra o bien, igual a dos veces su longitud, para el caso de electrodos verticales.
3. Instalar el electrodo de potencial y su cable asociado en la otra dirección; es recomendable que forme un ángulo entre 90 y 180 grados con respecto a la dirección del electrodo de corriente. La distancia inicial que se recomienda entre el electrodo de potencial y el electrodo bajo prueba es del orden de la mitad de la distancia del electrodo auxiliar de corriente.
4. Realizar una primera medición de la resistencia de conexión a tierra.
5. Desplazar el electrodo de potencial a intervalos de 3 a 5 metros, conservando la dirección original. Continuar las mediciones hasta que el valor medido en tres puntos sucesivos sea razonablemente igual (diferencia entre 2 y 5 por ciento).
6. Conservando el electrodo de potencial en el último punto de medición, desplazar el electrodo de corriente al doble de la distancia del punto dos.
7. Repetir el proceso de medición indicado en los puntos tres, cuatro y cinco.

8. Si el proceso de medición en el punto siete arroja un resultado similar o ligeramente menor que el anterior, entonces se tendrá el valor de la resistencia de conexión a tierra. La curva de los valores medidos deberá ser similar a la curva B de la figura 3.

Equipo de medición

El medidor de resistencia de conexión a tierra deberá reunir las características:

1. Una fuente de tensión.
2. Un circuito para eliminar las corrientes de tipo electrofítico y las corrientes de interferencia.
3. Un circuito de medición.

La tensión generada deberá ser de un valor razonable para lograr una inyección de corriente que permita efectuar la lectura, al mismo tiempo que se mantienen las condiciones de seguridad para el personal que efectúa el trabajo de medición.

La corriente inyectada deberá alternarse a una frecuencia tal, que se limite al mínimo el fenómeno electrofítico y que, a su vez, no introduzca problemas importantes de efecto mutuo debido a la interacción de los cables auxiliares.

Normalmente, la fuente de tensión es un generador accionado en forma manual (las fuentes de baterías son también de uso corriente), que genera entre 40 y 120 volts a una frecuencia que oscila entre 35 y 140 hertz. El circuito de medición deberá ser selectivo a fin de registrar sólo la corriente producida por el generador.

Conclusiones

La descripción básica de la problemática de los sistemas de conexión a tierra presentada permitirá comprender mejor los conceptos involucrados en el diseño, el análisis y la medición de electrodos de conexión a tierra.

La utilización de programas de computadora constituye el enfoque realista más adecuado de que se dispone en la actualidad. Asimismo, se recomienda ampliamente la medición de sistemas antes de la puesta en servicio y a intervalos regulares (periodo de dos años) durante la operación.

Referencias

1. IEEE, *Guide for Safety in Substation Grounding*, IEEE std. 80-1976.
2. Dalziel, C.F. et al., "Re-evaluation of Lethal Electric Currents", *IEEE Transactions IGA-4*, pp. 467-476, 1968.
3. Leoloeian, B. et al., "Review of Analytical Methods for Calculating the Performance of Large Grounding Electrodes, Part I and II", *IEEE Transactions on PAS-104*, pp. 3124-3142, noviembre de 1985.
4. Garret, D.L. y H. Holly, "Calculation of Substation Grounding System Resistance using Matrix Techniques", *IEEE Transactions on PAS-99*, pp. 2008-2011, septiembre de 1980.
5. Heppe, R.J., "Computation of Potential at Surface above an Energized Grid or other Electrode Allowing for Non-Uniform Current Distribution", *IEEE Transactions on PAS-95*, pp. 362-374, noviembre de 1979.

actividades del iie

Efectos de la contaminación en aislamientos*

La contaminación ambiental deteriora los aisladores eléctricos tanto mecánica como eléctricamente; los problemas mecánicos por contaminación se relacionan en forma básica con la corrosión y degradación de los materiales, y los eléctricos se vinculan con el deterioro de su rigidez dieléctrica. Desde el punto de vista eléctrico, los tipos de contaminación que más problemas ocasionan se dividen en: marina, desértica e industrial. Es común encontrar diversas combinaciones de éstas.

Quando las instalaciones eléctricas operan en ambientes contaminados, el comportamiento eléctrico de los aisladores se deteriora, provocando incrementos en los costos de operación, tanto por mantenimiento como por reposición.

México cuenta con grandes extensiones de costas (contaminación marina), donde actualmente se desarrollan ciudades y centros de producción (contaminación industrial); asimismo, en algunos casos para transportar energía, es necesario atravesar grandes extensiones de territorio en las que no existe vegetación alguna (contaminación desértica). Es por ello que el efecto de la contaminación sobre las instalaciones eléctricas debe considerarse para lograr un suministro de energía confiable y económico.

Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), cuenta con experiencia en el campo de la contaminación y, en la medida de lo posible, diseña sus instalaciones y realiza programas de mantenimiento buscando minimizar sus efectos.

Para poder evaluar, en forma técnico-económica, los criterios de diseño y mantenimiento para lugares específicos, es

* La información que se presenta en este artículo, fue recopilada por Lucía González, del Departamento de Difusión Tecnológica; con la asesoría técnica del doctor Gaudencio Ramos Niembro, del Departamento de Impacto Ambiental, de la División de Sistemas de Potencia.

necesario realizar estudios que permitan tipificar las diferentes clases de contaminación en diversas zonas del país; conocer la manera en que los contaminantes se acumulan; evaluar su efecto en la degradación de la rigidez dieléctrica; identificar periodos críticos a lo largo del año, y determinar las condiciones climatológicas bajo las cuales el problema se acentúa, entre otros.

Desde su inicio, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), a través del Departamento de Impacto Ambiental, de la División Sistemas de Potencia, ha colaborado con el sector eléctrico en el análisis y la evaluación de los problemas de contaminación en aislamientos eléctricos.

A partir de 1981, se iniciaron estudios conjuntos en este campo con la CFE, uno de éstos fue "Efectos de la contaminación en las instalaciones eléctricas y su solución", que tuvo por objeto evaluar los problemas de la contaminación a nivel nacional. Entre sus resultados más importantes destacan:

- Estudio bibliográfico de problemas de contaminación en aislamientos.
- Selección de métodos para medición y evaluación del nivel de contaminación.
- Diseño y construcción de equipos para la recolección de parámetros meteorológicos y de corrientes de fuga.

FIGURA 1

Localización de las estaciones terrenas



- Diseño de estaciones de prueba para la medición del nivel de contaminación.

- Creación en el IIE, de la infraestructura experimental y de recursos humanos para la evaluación de los problemas de contaminación en aislamientos eléctricos.

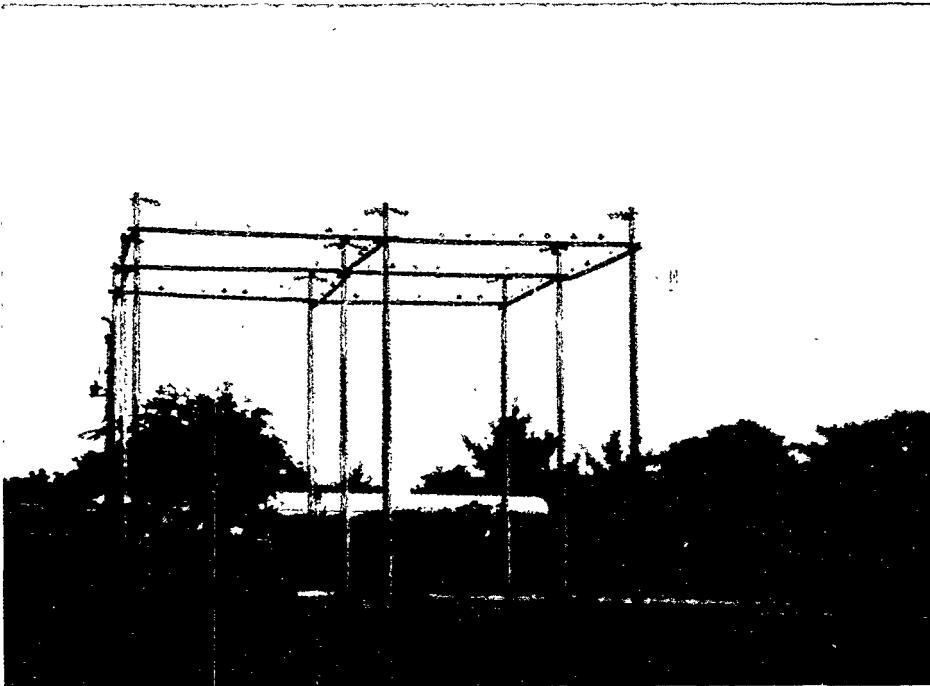
En 1985, como consecuencia del proyecto mencionado, se decidió realizar la investigación "Efectos de la contaminación en aislamientos eléctricos", que ten-

drá una duración de cuatro años a partir de abril del año mencionado. El objeto de este estudio es desarrollar una guía de diseño y mantenimiento de aislamientos eléctricos, tomando en cuenta la contaminación ambiental. Para realizar dicho estudio, se cuenta con veintitrés estaciones experimentales en la República Mexicana (véase la Fig. 1) y con los laboratorios necesarios tanto en el IIE como en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México (LAPEM), de la Comisión.

Actividades del proyecto

Los resultados de análisis, laboratorio y campo que se obtienen, se agrupan en ocho actividades de investigación:

- Pruebas de campo en estaciones experimentales. En esta actividad se lleva a cabo la recolección de muestras para recabar información de las diversas condiciones de contaminación existentes, utilizándose los métodos de densidad equivalente



Area de distribución de una estación de prueba

de sal depositada (DESD), colectores direccionales de polvo (CDP) y muestreo de partículas suspendidas en la atmósfera (MPSA). Además, en diecisiete estaciones se monitorean los parámetros meteorológicos (velocidad de viento, dirección de viento, humedad relativa, temperatura, punto de rocío, precipitación pluvial y presión barométrica) y en tres de ellas, corrientes de fuga (CF), que es otro método de medición de severidad de la contaminación.

Los aisladores se muestrean periódicamente para llevar un control de las variaciones del nivel de contaminación. Los parámetros meteorológicos y las corrientes de fuga se monitorean en forma continua.

- Análisis e interpretación de contaminantes. Se busca caracterizar cualitativa y cuantitativamente los contaminantes típicos de cada estación.

Para ello, a partir de los datos obtenidos utilizando los diferentes métodos de medición de contaminación y las condiciones climatológicas de la zona, se establecerán relaciones entre las diversas variables y parámetros, que contribuirán a determinar la severidad de la contaminación en los sitios de prueba.

- Pruebas de laboratorio en cámara de niebla. Consisten en pruebas de contaminación artificial, tanto en aisladores de distribución como de transmisión, para observar su comportamiento bajo diferentes niveles de severidad; es decir, se simulan en el laboratorio las condiciones de operación de los aislamientos.

Además de efectuar las pruebas con contaminantes típicos de laboratorio, a partir del análisis químico de las muestras obtenidas en campo, se contaminarán los aisladores con diferentes clases de contaminantes para obtener las curvas de voltaje de aguante en relación con el nivel de contaminación. Dichas curvas se utilizan en el diseño de nivel de aislamiento por contaminación.

- Caracterización de tipos y niveles de contaminación en el país. Su propósito es obtener un mapa de contaminación nacional para aislamientos eléctricos.

Debido a ello, es necesario realizar un estudio de las líneas más importantes instaladas por la CFE, para conocer cuál ha sido el comportamiento de sus aisladores bajo diversas condiciones de operación, correlacionando dichos datos con los que se obtengan en las estaciones de prueba.

- Diseño y mantenimiento de instalaciones eléctricas. La finalidad de esta actividad es evaluar las diferentes técnicas para el mantenimiento de aislamientos, tales como grasas y lavado automático o manual, entre otras.

Esta información puede obtenerse parcialmente de los fabricantes de dichos equipos; sin embargo, es necesario complementarla con la experiencia de la CFE. De los resultados de este estudio se realizará un informe de las diversas técnicas utilizadas y sus resultados en campo.

- Análisis técnico-económico de opciones. Se analizarán las soluciones propuestas en las actividades anteriores, buscando el punto de equilibrio económico.

Los resultados obtenidos tanto en campo como en laboratorio, sumados a la experiencia de la CFE, se evaluarán de acuerdo con la experiencia del IIE, en lo que respecta a modelos económicos, para la selección de aislamientos y su mantenimiento, tanto preventivo como correctivo.

- Procedimientos de diseño de aislamientos por contaminación. Con base en la información obtenida, se documentarán los criterios de diseño y mantenimiento de aislamientos eléctricos bajo condiciones de contaminación.

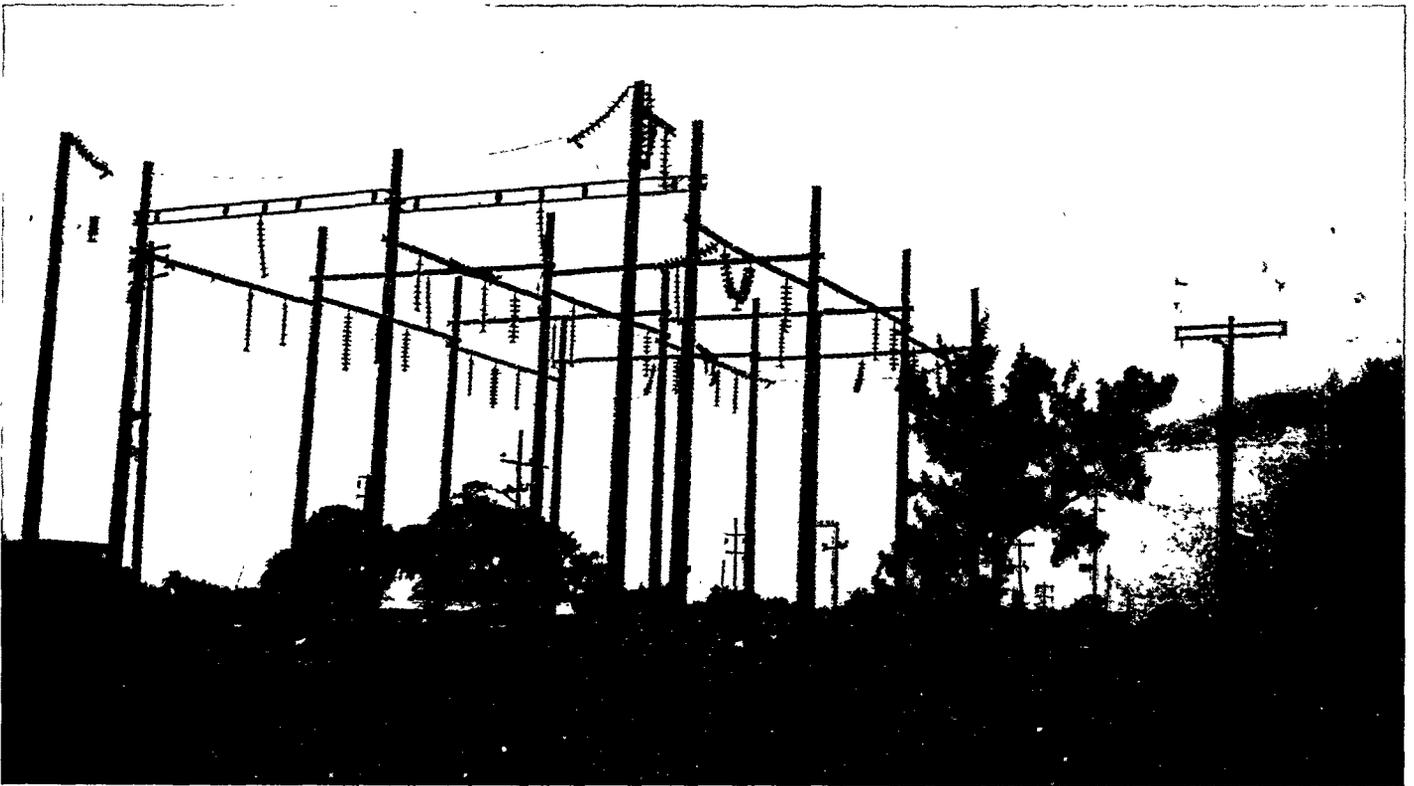
A partir de dichos resultados, la CFE podrá actualizar su guía de diseño y mantenimiento en ambientes contaminados.

- Nuevos métodos de evaluación de severidad de niveles de contaminación. Actualmente, en las estaciones de prueba se utilizan cuatro métodos para caracterizar y medir niveles de contaminación (DESD, CDP, MPSA y CF). Cada uno de éstos tiene alcances y limitaciones y/o ventajas y desventajas, tanto técnicas como económicas.

- El objetivo de esta actividad es, por medio de los resultados que se obtengan, evaluar los métodos mencionados y proporcionar diferentes opciones a la CFE, para medir niveles de contaminación a un menor costo.

Resultados obtenidos

De las veintitrés estaciones de prueba, una se instaló en 1983; seis, en 1984; quince, en 1985, y una, en 1986. En la actualidad, se entrega a la CFE un informe del com-



Area de transmisión en la que se observan el poste con los sensores de parámetros meteorológicos y la caseta con equipo electrónico de una estación de prueba.

portamiento de cada una de las estaciones de prueba; a la fecha, se han entregado ocho informes y se espera presentar dieciséis en lo que resta de 1986.

Asimismo, se ha corroborado cuantitativamente que la forma de los aisladores influye en la captación de contaminantes y que la velocidad de acumulación en las superficies (superior e inferior) varía, según el tipo de zona bajo estudio.

Respecto a los efectos de la topografía y la velocidad y dirección del viento, algunos resultados corroboran su importancia en los niveles de contaminación. Por ejemplo, en lugares cercanos a la costa, se han encontrado niveles bajos de contaminación, en tanto que en otros bastante alejados, niveles altos, mayores aún que de

los que se informa en la literatura especializada internacional.

En relación con los métodos de medición de severidad, en particular el DESD y los CDP, de las mediciones realizadas a la fecha puede observarse que éstas tienen la misma tendencia, excepto en algunas mediciones en zonas semidesérticas.

Otro resultado importante fue la terminación de la cámara de niebla, validada contra las normas internacionales existentes.

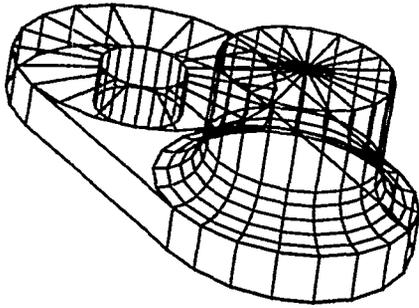
En cuanto a programas de cómputo, se desarrolló una base de datos compleja, debido a la cantidad de información que es necesario manejar. Fue indispensable realizar un estudio complementario para el diseño y la elaboración de la base de datos.

Infraestructura experimental

Para el desarrollo del proyecto, se cuenta con el apoyo experimental de los laboratorios de análisis físico-químico y de electrónica, del Departamento de Impacto Ambiental. Además, se utiliza la infraestructura del IIE, siendo la más importante la cámara de niebla, del Departamento de Materiales; el cromatógrafo de iones y el equipo de difracción por rayos X, del Departamento de Geotermia, y el equipo de absorción atómica, del Departamento de Combustibles Fósiles.

Asimismo, las pruebas de laboratorio de los aislamientos de transmisión se realizan en la cámara de niebla del LAPEM, de la Comisión Federal de Electricidad.

II REUNION NACIONAL DE CAD/CAM



17 y 18 de noviembre de 1986

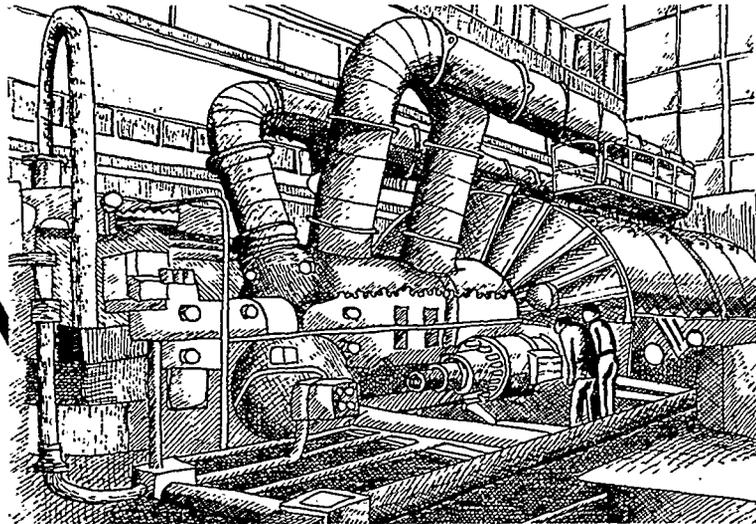
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Interior Internado Palmira
Auditorio IIE, edificio 12, PB
Cuernavaca, Morelos, México

OBJETIVO

Reunir a diferentes representantes de la industria, de la investigación y de la educación en un ambiente abierto y propicio para el intercambio de experiencias que permita crear y reforzar vínculos que estimulen la utilización, el desarrollo y la transferencia de tecnologías CAD/CAM/CAE.

INFORMACION GENERAL

Ing. Marisela Torres Anaya
Unidad de Cómputo-Edificio 1
Apartado 475
Cuernavaca, Morelos.
62000 México.
Tel: (73) 143 811 ext. 3045



becas-tesis

licenciatura maestría doctorado

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

Egresados de:

- Ingenierías eléctrica, mecánica, electrónica, química, civil, de sistemas en computación
- Química
- Física

Beneficios:

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

Requisitos:

- Ser mexicano.
- Tener menos de 30 años de edad para tesis nivel Licenciatura, de 35 para nivel Maestría y de 40 para nivel Doctorado.
- Promedio mínimo 80/100 o su equivalente en otros sistemas.
- Haber cubierto 100% de los créditos y requisitos correspondientes del plan de estudios.
- Disponibilidad de residir en Cuernavaca, Mor.; D.F.; Ciudad Hidalgo, Mich.; Mexicali, B.C.; o Guadalajara, Jal.

Mayores informes

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



INSTITUTO DE
INVESTIGACIONES
ELÉCTRICAS