



## **FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M. DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

### **A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS**

**L**as autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

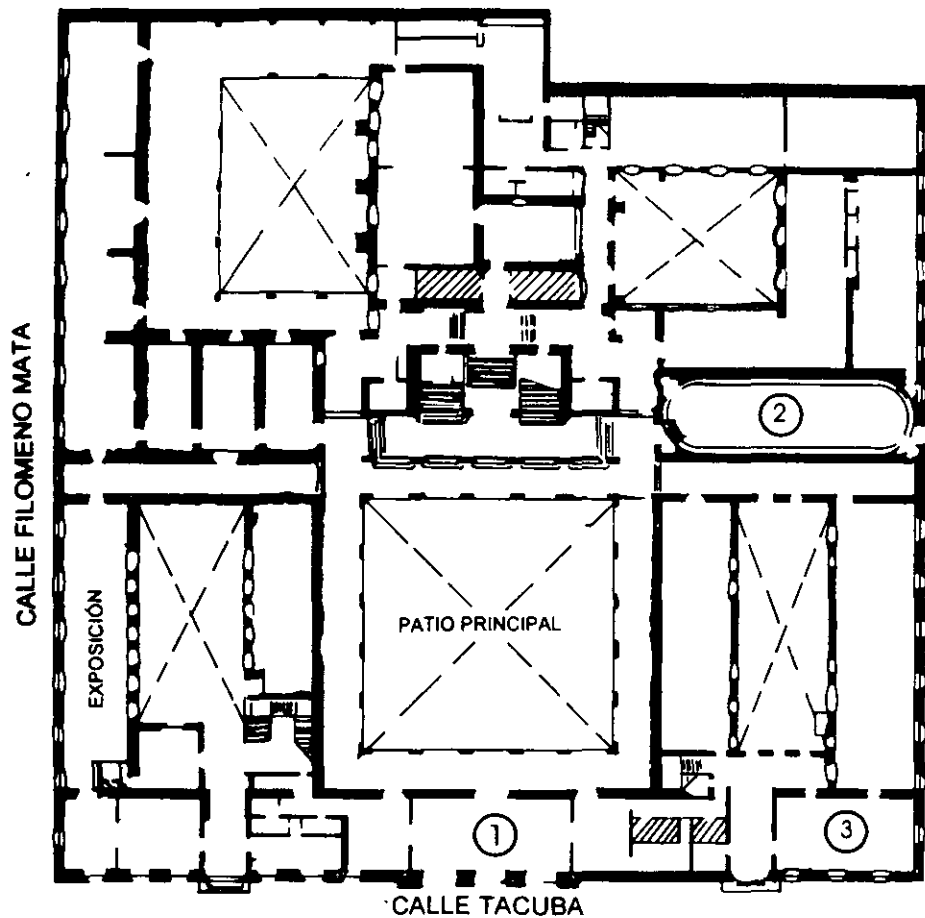
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

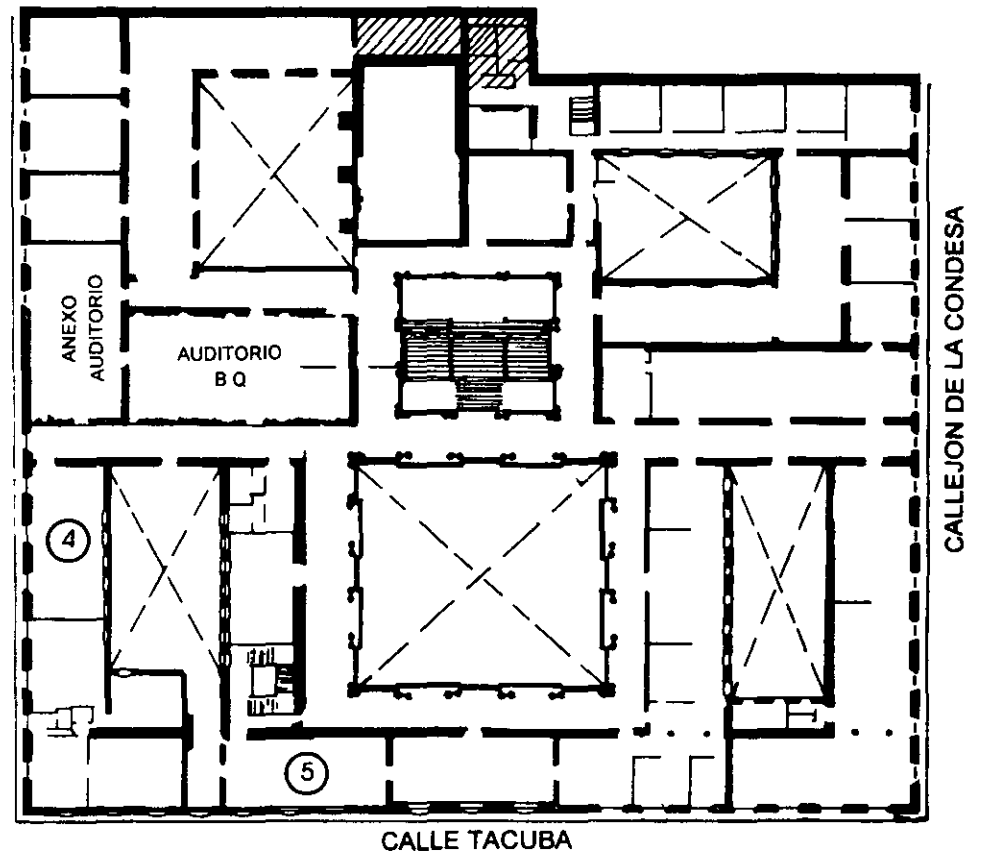
**Atentamente**

**División de Educación Continua.**

# PALACIO DE MINERIA

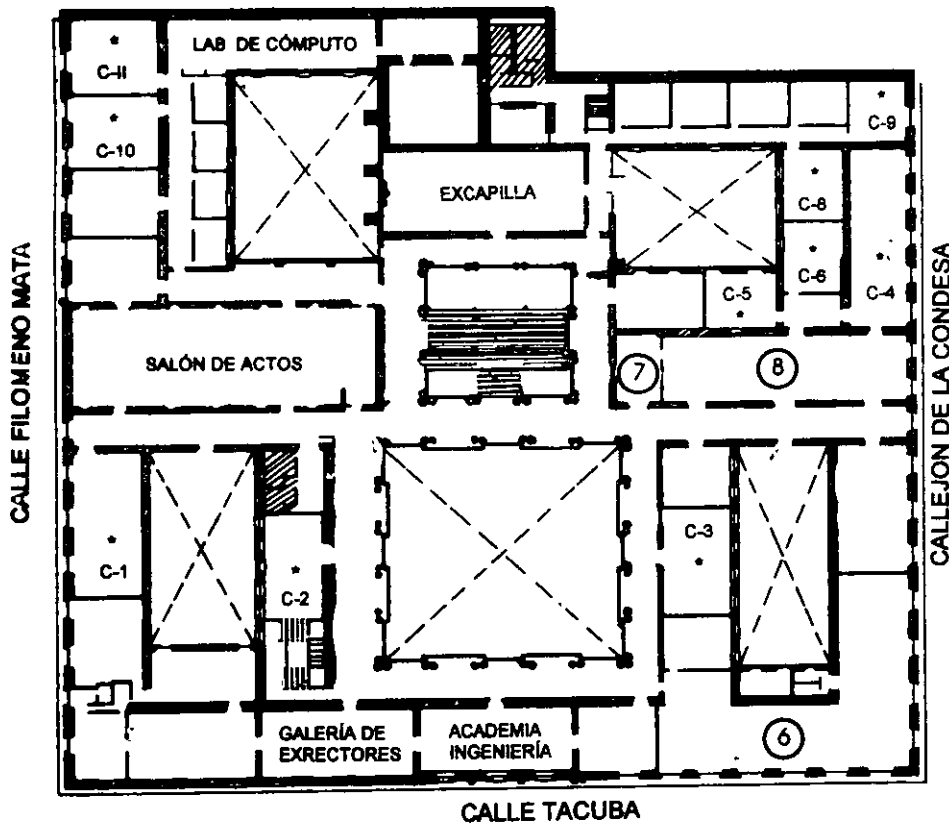


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

# PALACIO DE MINERIA



## GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

SANITARIOS

\* AULAS

**1er. PISO**



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.  
CURSOS ABIERTOS

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA





FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

# CURSOS ABIERTOS

## DIPLOMADO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

MODULO III DISEÑO DE SUBESTACIONES  
ELÉCTRICAS  
CLAVE CA-184

TEMA

INTRODUCCIÓN  
DEL 24 DE MAYO AL 4 DE JUNIO

**EXPOSITOR: ING. JACINTO VIQUEIRA LANDA**  
**PALACIO DE MINERÍA**  
**MAYO DE 2004**

# SUBESTACIONES ELECTRICAS

## Introducción

### 1. DESARROLLO DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS

#### 1.1. Evolución histórica de los conocimientos científicos de electricidad y magnetismo.

El desarrollo de los conocimientos científicos de electricidad y magnetismo fue mucho más lento que el correspondiente a otras ramas de la ciencia, como, por ejemplo, la mecánica. No es sino hasta el siglo XIX cuando se hacen los descubrimientos fundamentales y se desarrollan las aplicaciones industriales que han tenido una repercusión tan importante en la forma de vida moderna.

Pasaremos en primer lugar revista al desarrollo de los conocimientos de electricidad y magnetismo desde la antigüedad y nos referiremos después a los descubrimientos científicos fundamentales que se realizaron en el siglo XIX y a sus primeras aplicaciones industriales.

#### Epoca antigua

En Grecia, Thales de Mileto, el año 585 antes de Cristo, expone las propiedades de atracción del ambar (elektron en griego) y de la magnetita.

El ambar es una substancia fósil de color amarillo, formada de la resina de pinos. Frotada enérgicamente, atrae a otros cuerpos, como partículas de polvo, trozos de papel y, subitamente, también los repele.

La magnetita es un óxido de hierro, de color gris, oscuro, que está magnetizado en forma natural por el campo magnético de la tierra. Tiene la propiedad de atraer al hierro.

Thales de Mileto observó también que la magnetita podía comunicar su propiedad al hierro, que a su vez se convertía en un imán.

En China, el uso de la brújula se remonta al siglo III antes de Cristo. Los chinos sabían magnetizar el acero mediante el óxido de hierro (magnetita).

#### Edad Media

Roger Bacon (nacido en 1214) menciona las propiedades del ambar y la magnetita.

Pierre Perégrin, filósofo e ingeniero francés incorporado

al ejército de Carlos de Anjou, en una carta escrita en 1269, describe las propiedades de una bola de magnetita, sobre la que, con ayuda de una aguja inmantada, localizó zonas opuestas de atracción concentrada o sea polos. Construyó numerosas brújulas, de pivote y flotantes. Tenía conocimientos del poder de atracción del norte.

### Siglo XVII

Jerome Cardan (muerto en 1576) explicó en que se diferenciaban la atracción del ámbar y de la magnetita.

En 1600, William Gilbert, médico privado de la reina Isabel de Inglaterra, publicó en latín el tratado "De Magnete", sobre el magnetismo y las propiedades de atracción del ámbar, tratado que fue muy leído en su época.

Sugirió que la tierra debía ser un imán gigantesco, lo que explicaba la orientación hacia el norte de la brújula.

Llamó a las substancias que, al frotarse, se comportaban como el ámbar, "eléctricas".

Otto von Guericke, de Magdebourg (Alemania) construyó en 1660 la primera máquina que producía una carga eléctrica por fricción de una bola de azufre giratoria y realizó experimentos con la carga eléctrica.

### Siglo XVIII

En 1707, en Inglaterra, Francis Haukebee construyó una máquina eléctrica de fricción perfeccionada y realizó numerosas experiencias.

En 1730, Stephen Gray, del Colegio de franciscanos, en Inglaterra, descubrió la conducción de electricidad enviando una carga de un tubo de vidrio electrizado a una bola de metal a través de una cuerda de lino. Descubrió también que la carga eléctrica no llenaba el cuerpo sino que quedaba en su superficie.

En 1733, en Francia, Carlos-Francisco de Cisternay Dufay, superintendente de los jardines reales de Versalles en la época de Luis XV y el abate Nollet, descubrieron que los objetos cargados con el mismo tubo de vidrio se repelían entre sí y en cambio atraían a los objetos cargados con una varilla de resina electrificada y concluyeron que existían dos clases de electricidad que llamaron vitrosa y resinosa, iniciándose así la teoría de los dos fluidos.

En 1745, en Holanda, el profesor Van Musschenbroek y su alumno Cuneus, de la Universidad de Leyde, desarrollaron la llamada botella de Leyde, capaz de acumular una carga eléctrica mayor que la que podía acumularse en una esfera o un

tubo de vidrio. La botella de Leyde consistía originalmente en un frasco de vidrio parcialmente lleno de agua, que se cargaba mediante una máquina electrostática y constituía lo que se conoce actualmente como un condensador. El vidrio constituía el dieléctrico, que separaba el agua cargada de un conductor que originalmente era la mano húmeda del experimentador. La botella de Leyde se perfeccionó, mediante la aplicación de una capa exterior de estaño sobre la botella, que constituía una placa del condensador y otra capa interior de estaño, que substituía el agua y constituía la otra placa del condensador y que estaba conectada, mediante un conductor que atravesaba un tapón aislante, a una esfera de metal exterior.

La diferencia del potencial  $V$  entre las dos placas del condensador está dada por la siguiente expresión:

$$V = \frac{Q}{C}$$

donde  $Q$  es la carga eléctrica y  $C$  una constante de proporcionalidad, llamada capacitancia, que depende de las dimensiones del condensador y de la naturaleza del dieléctrico.

En 1746 Benjamin Franklin, en Filadelfia, Estados Unidos, experimentó con la botella de Leyde y propuso la teoría de un solo fluido eléctrico. De acuerdo con esta teoría un exceso de fluido produce una carga positiva y una deficiencia de fluido produce una carga negativa.

Franklin demostró también que el rayo es de naturaleza eléctrica y lo comprobó mediante una experiencia con un papalote. Diseñó los primeros pararrayos consistentes en una punta metálica conectada a tierra.

En 1785 Coulomb inventa la balanza de torsión y determina que las cargas eléctricas que pueden considerarse concentradas en puntos geométricos, actúan entre sí con una fuerza que es directamente proporcional a su magnitud e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{E_a r^2}$$

$E_a$  es una constante de proporcionalidad, llamada permitividad, que depende del medio que rodea a las cargas.

### Siglo XIX

En 1796, en Italia, Alejandro Volta, que investigaba partiendo de las experiencias de Galvani con las ancas de rana, desarrolló la pila que lleva su nombre, que consistía

en una batería de discos de dos metales disímiles separados por telas humedecidas. De esta manera se disponía, por primera vez, de una corriente eléctrica continua, lo que inicia la era de las aplicaciones prácticas de la electricidad.

La pila fue perfeccionada en Inglaterra por Humphrey Davy que construyó una "batería" formada por unas doscientas placas de zinc y de cobre.

La explicación científica del funcionamiento de la pila fue dada en 1840 por Faraday, quien sostuvo que la fuente de electricidad residía en una acción química entre el zinc, el cobre y el electrolito.

En 1819, en Holanda, Christian Oersted observó que cuando un hilo metálico, paralelo a una brújula, era recorrido por una corriente la aguja de la brújula se desviaba, de donde se deduce que una corriente eléctrica crea una fuerza magnética. Por primera vez se establece la relación entre la electricidad y el magnetismo.

En 1820, en Francia, Ampere presentó el primer análisis cuantitativo del fenómeno observado por Oersted y descubrió que dos corrientes que circulan en la misma dirección en dos conductores paralelos producen una fuerza de atracción y si circulan en sentido contrario una fuerza de repulsión y que una corriente que circule en una bobina produce un campo magnético como el de un imán.

En 1826 Jorge Ohm, en Alemania, formuló la ley según la cual en un circuito la corriente es directamente proporcional a la tensión o voltaje e inversamente proporcional a la resistencia del conductor:

$$I = \frac{V}{R}$$

Ohm estableció que la resistencia de un conductor metálico depende de sus dimensiones y de la composición del conductor.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

donde:

$l$  = longitud del conductor  
 $A$  = área de la sección recta del conductor  
 $\rho$  = resistividad del conductor



La resistividad del conductor puede definirse como la resistencia eléctrica entre las caras de un metro cúbico del material de que está hecho el conductor y se expresa en ohms.

En 1831 Michael Faraday, en Inglaterra, descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética, que dio lugar al invento del transformador y del generador eléctrico. Este descubrimiento puede considerarse el punto de partida de los actuales sistemas de energía eléctrica.

La idea que guió a Faraday en sus investigaciones fué que si una corriente eléctrica producía un efecto magnético, como había descubierto Oersted, debería ser posible que un campo magnético produjese una corriente eléctrica.

Las investigaciones de Faraday culminaron en tres experimentos que demostraron los aspectos fundamentales del electromagnetismo.

En uno de los experimentos enrolló en un anillo de hierro dos bobinas, una de las cuales se conectaba a una batería y la otra a un galvanómetro. Faraday observó que al conectar la primera bobina a la batería la aguja del galvanómetro conectado a la segunda bobina se desviaba momentaneamente en una dirección determinada; al desconectar la batería la aguja del galvanómetro se desviaba momentaneamente en sentido contrario.

La conclusión del experimento es que una corriente variable (la corriente transitoria producida durante la conexión y desconexión del circuito) induce en un circuito próximo un voltaje y hace circular una corriente. Esto constituye el principio del transformador.

Utilizando la notación moderna el fenómeno puede expresarse de la siguiente manera:

$$v_2 = L_{21} \frac{di_1}{dt}$$

donde  $v_2$  es el voltaje inducido en el circuito 2 por la corriente  $i_1$  que circula en el circuito 1.

$L_{21}$  es la inductancia mutua entre los dos circuitos.

En otro de los experimentos realizados por Faraday, comprobó que podía producir el efecto inductivo de otra manera. Conectó a una batería un circuito formado por un hilo de cobre dispuesto en zigzag sobre un soporte aislante. Al aproximarse a este circuito otro circuito similar conectado a un galvanómetro, observó que la aguja del galvanómetro se desviaba en un sentido; al alejar el circuito la aguja se desviaba en sentido contrario.

De este experimento se concluye que se induce una corriente en un circuito cuando este se mueve con respecto a un campo magnético constante. De este principio se deduce la siguiente expresión de la fuerza electromotriz inducida en un conductor recto de un generador eléctrico.

$$e = B \ell v$$

donde:

e = fuerza electromotriz inducida  
B = densidad de flujo del campo magnético  
 $\ell$  = longitud de conductor  
v = velocidad relativa del conductor con respecto al campo magnético, en una dirección perpendicular a la dirección del campo y al conductor.

Si el conductor recto de longitud  $\ell$  que se mueve con respecto a un campo magnético de densidad de flujo B, conduce una corriente I, se produce una fuerza F sobre el conductor cuya magnitud es:

$$F = B \ell I$$

Esta expresión constituye el principio del motor eléctrico.

Faraday mostró también que podía producir el fenómeno de inducción de una corriente variando el campo magnético producido por un imán permanente. Para ello introdujo en una bobina conectada a un galvanómetro un cilindro de hierro dulce. Dispuso dos imanes permanentes en forma de barra de manera que los polos opuestos quedaran en contacto en uno de los extremos de las barras, simulando un imán en forma de herradura y los otros extremos de los imanes los puso en contacto con los extremos del núcleo de hierro de la bobina; al establecer el contacto entre los imanes y el núcleo de hierro de la bobina la aguja del galvanómetro conectado a la bobina se desviaba momentáneamente en un sentido; una vez establecido el contacto la aguja regresaba a su posición de equilibrio. Al abrir el contacto entre los imanes y el núcleo de hierro la aguja del galvanómetro se desviaba momentáneamente en sentido contrario.

El significado de este experimento puede resumirse diciendo que se induce una corriente en un circuito cuando éste se enlaza o eslabona con un flujo variable.

Este principio puede expresarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$e = \frac{d}{dt} (N\Phi)$$

donde:

$e$  = fuerza electromotriz inducida en el circuito  
 $N\Phi$  = eslabonamientos del flujo con el circuito.

Faraday mostró también que el número de eslabonamientos de flujo es igual al producto de la inductancia del circuito por la corriente inducida en el mismo:

$$N\Phi = Li$$

Por lo tanto si se conoce el campo magnético a partir de la geometría del circuito, se puede calcular la inductancia a partir de la siguiente expresión:

$$L = \frac{N\Phi}{i}$$

Joseph Henry, que investigó en Estados Unidos el fenómeno de la inducción electromagnética simultáneamente con Faraday, observó que una variación de la corriente en un circuito induce en el mismo circuito una f.e.m. de sentido contrario. Este fenómeno de autoinducción puede expresarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$e = -\frac{d}{dt} (Li)$$

donde  $e$  es la f.e.m. inducida en el circuito por la variación de la corriente  $i$  y  $L$  es la inductancia del circuito.

Si  $L$  es constante:

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

En 1842 Kirchhoff, en Alemania, formuló las dos leyes que llevan su nombre:

La primera ley de Kirchhoff puede expresarse diciendo que la suma algebraica de las corrientes en cualquier punto de unión de una red eléctrica es igual a cero.

$$\sum i = 0$$

La segunda ley de Kirchhoff puede expresarse diciendo que la suma algebraica de los voltajes en un circuito cerrado es igual a cero

$$\sum v = 0$$

En 1843 James Prescott Joule descubre, en Inglaterra, que el calentamiento producido por una corriente en un conductor es proporcional al cuadrado de la corriente, a la resistencia del conductor y al tiempo. Si  $I$  es constante

la energía eléctrica convertida en calor es:

$$W = Pt = I^2 Rt$$

y la potencia eléctrica correspondiente:

$$\frac{W}{t} = P = RI^2$$

y como, de acuerdo con la ley de Ohm  $R = \frac{V}{I}$ , resulta que la potencia eléctrica es igual al producto del voltaje por la corriente:

$$P = VI$$

El desarrollo de los sistemas de energía eléctrica se basó inicialmente casi exclusivamente en las aplicaciones del electromagnetismo. A medida que los voltajes utilizados se fueron elevando, los fenómenos electrostáticos relacionados con el campo eléctrico existente en el espacio entre dos conductores que están a diferente potencial fueron cobrando mayor importancia.

Si se aplica entre dos conductores separados por un dieléctrico una diferencia de potencial  $v$ , se obtiene una carga eléctrica  $q$  que está dada por la siguiente expresión:

$$q = Cv$$

donde  $C$  es una constante de proporcionalidad llamada capacitancia, que depende de la distancia entre los conductores, de la forma de estos y de la naturaleza del dieléctrico.

Si la carga es variable, circulará una corriente:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$i = \frac{d}{dt} (Cv)$$

Si la capacitancia es constante:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

La relación anterior puede expresarse también de la siguiente forma:

$$q = \int i dt = Cv$$

$$v = \frac{1}{C} \int i dt$$

## 1.2. Sistemas eléctricos de corriente continua.

Como se dijo antes, el invento de la pila eléctrica por Volta proporcionó la primera fuente de una corriente eléctrica continua.

El descubrimiento de la inducción electromagnética por Faraday amplió notablemente la posibilidad de generar ener-

gía eléctrica y de utilizarla en aplicaciones industriales.

En 1832, un año después del descubrimiento de Faraday, un fabricante de aparatos de física de París, Hipólito Pixii, que realizó aparatos para Ampere, presentó un generador eléctrico, movido a mano, que tenía bobinas fijas y un imán permanente, en forma de herradura, que giraba en torno de ellas y estaba provisto de un conmutador para proporcionar corriente continua.

En 1839 Jacobi desarrolló un motor de su invención, consistente en electroimanes montados sobre un disco móvil que se atraían y repelían con otros electroimanes fijos. Enviando, mediante un conmutador movido por el eje del aparato, la corriente a los electroimanes, se obtenía la rotación de la parte móvil. Con este motor, alimentado por una batería, equipó un barco que navegó por el río Neva, en San Petesburgo (Rusia) desarrollando una potencia de unos  $3/4$  de caballo.

Sin embargo, a pesar de estos primeros intentos, el desarrollo de las aplicaciones industriales del generador y del motor eléctricos fue relativamente lento.

Uno de los primeros generadores eléctricos industriales fue presentado por Wermer von Siemens, con el nombre de dinamo, ante la Academia de Ciencias de Berlín en 1866 y su hermano Williams hacía la misma demostración ante la Royal Society en Londres.

En 1870 un hábil obrero de origen belga, Zenobe Gramme, presentó un generador formado por un inducido consistente en un anillo de hierro dulce sobre el que se había enrollado un conductor de cobre aislado, que giraba entre los polos de un imán permanente estacionario.

La corriente inducida en la bobina se captaba mediante escobillas metálicas que hacían contacto con un colector montado sobre la flecha de la máquina, obteniéndose así una corriente continua. Posteriormente el imán permanente fue substituido por un electroimán.

La disposición ideada por Gramme permitía reducir el entrehierro entre las piezas polares y el núcleo del inducido, disminuyendo notablemente la reluctancia del circuito magnético.

En 1873, durante la Exposición de Electricidad celebrada en Viena, el ingeniero Fontaine se dio cuenta accidentalmente de que el dinamo de Gramme era una máquina reversible, que podía funcionar como motor eléctrico.

## Principio de funcionamiento del generador y el motor eléctrico

El funcionamiento de los generadores eléctricos se basa en el principio, descubierto por Faraday, según el cual se induce una fuerza electromotriz en un conductor que se mueve con respecto a un campo magnético constante. La fuerza electromotriz inducida "e" tiene el siguiente valor:

$$e = Blv$$

donde B es la densidad de flujo del campo magnético, l la longitud del conductor y v la velocidad relativa del conductor con respecto al campo magnético, en una dirección perpendicular a la dirección del campo y del conductor.

Si el conductor en el que se induce la fuerza electromotriz forma parte de un circuito cerrado, circulará una corriente i cuya magnitud depende de la fuerza electromotriz y de la resistencia del circuito, de acuerdo con la ley de Ohm. Debido a la existencia de una corriente en el conductor que se mueve con respecto al campo magnético, se ejerce una fuerza F sobre el conductor en dirección opuesta a la del movimiento y cuya magnitud está dada por la siguiente expresión:

$$F = Bli$$

donde B es la densidad de flujo del campo magnético, l es la longitud del conductor, i la corriente que circula por el conductor.

Para mantener el movimiento del conductor habrá que aplicarle una fuerza de la misma magnitud pero de sentido contrario y, en consecuencia, se requerirá una potencia de:

$$Fv = Bli v$$

o dicho en otra forma, se suministrará un trabajo por unidad de tiempo igual a la fuerza ejercida sobre el conductor multiplicada por la velocidad del conductor.

En esa forma la potencia mecánica suministrada a la máquina se convierte en potencia eléctrica generada.

El funcionamiento como motor eléctrico requiere que se haga circular una corriente por el conductor, lo que produce, debido al campo magnético, una fuerza sobre el conductor igual a:

$$F = Bli$$

que produce el movimiento del conductor.

Bajo la influencia del campo magnético de densidad de flujo y de la velocidad v con que se mueve el conductor, se induce en el mismo una fuerza electromotriz:

$$e = Bli v$$

cuya dirección se opone a la circulación de la corriente en el conductor, lo que es una manifestación de la ley de Lenz que se basa en el principio de la conservación de la energía. Para mantener la circulación de la corriente habrá que aplicar, en el circuito del que forma parte el conductor, una fuerza electromotriz de magnitud suficiente para equilibrar la fuerza contraelectromotriz inducida y en consecuencia se requiere suministrar una potencia eléctrica:

$$e_i = B l v i = Fv$$

En este caso de la máquina funcionando como motor eléctrico, la potencia eléctrica se convierte en potencia mecánica.

En las máquinas industriales la parte que produce el campo magnético se llama campo o inductor y la parte donde se genera la fuerza electromotriz en el caso del generador o donde circula la corriente en el caso del motor se llama armadura o inducido. El movimiento relativo de una estructura con respecto a la otra se obtiene haciendo girar una de ellas mientras que la otra permanece fija, por lo que en general las dos partes tienen formas cilíndricas concéntricas.

#### El generador y el motor de corriente continua.

En los generadores y motores de corriente continua generalmente el campo es la parte fija o estator y contiene un devanado recorrido por una corriente continua y la armadura es la parte giratoria o rotor y está constituida por un gran número de conductores distribuidos en la periferia del rotor e interconectados entre sí.

Para analizar el funcionamiento de un generador de corriente continua, considerese primero un generador elemental como el mostrado en la Fig. 1.1a. con un par de polos y los  $Z$  conduc-

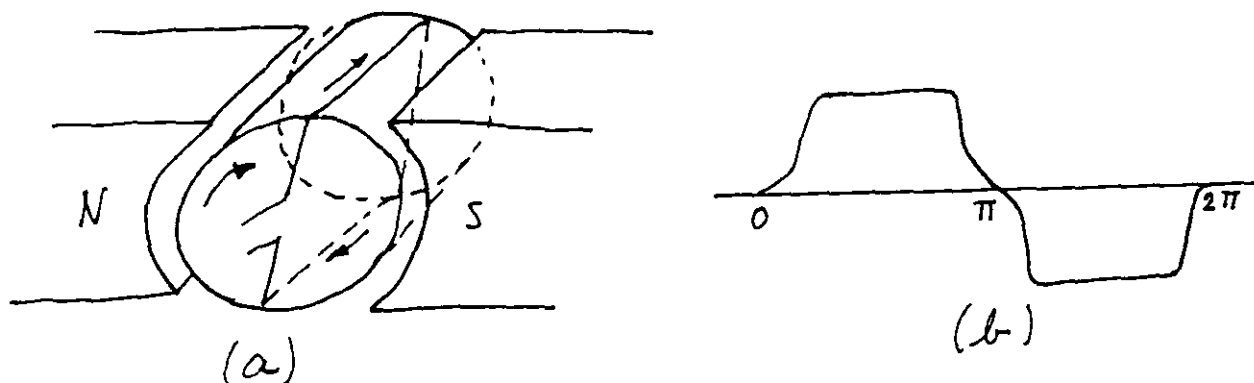


Fig. 1.1 Generador eléctrico elemental

tores de la armadura se suponen conectados en serie y concentrados en una sola bobina de  $N = \frac{Z}{2}$  vueltas, que gira en el campo magnético producido entre los dos polos.

En las máquinas de corriente continua el entrehierro entre las caras de los polos y el núcleo de la armadura es constante y la densidad de flujo se distribuye a lo largo del entrehierro como se indica en la Fig.1.1b, donde puede verse que prácticamente se mantiene constante bajo cada polo pero de signo contrario según corresponda al polo norte o al sur.

La fuerza electromotriz inducida en cada conductor está dada por la expresión:

$$e = B l v$$

Si el diámetro de la armadura es  $d$  centímetros y su longitud  $l$  centímetros y gira a una velocidad constante de  $n$  revoluciones por minuto, la velocidad tangencial de los conductores de la armadura es

$$v = \pi d \frac{n}{60} \text{ cm/seg}$$

y la fuerza electromotriz inducida en cada conductor es

$$e = B l \pi d \frac{n}{60} \text{ volts}$$

Como se supone que los  $Z$  conductores están concentrados en una sola bobina, la fuerza electromotriz inducida en todos los conductores es la misma en cada instante y como están conectados en serie la fuerza electromotriz total es:

$$e_t = B l \pi d \frac{n}{60} Z \text{ volts}$$

En la expresión anterior todas las cantidades son constantes menos  $B$ , que varía a lo largo del entrehierro como se indica en la Fig.1.1b. Por lo tanto la variación de la fuerza electromotriz en función del tiempo es idéntica a la distribución espacial de la densidad de flujo, teniendo sucesivamente valores positivos y negativos y constituyendo en consecuencia una fuerza electromotriz alterna.

Para obtener una fuerza electromotriz continua se requiere - disponer de un conmutador, como se indica esquemáticamente - en la Fig.1.2a.

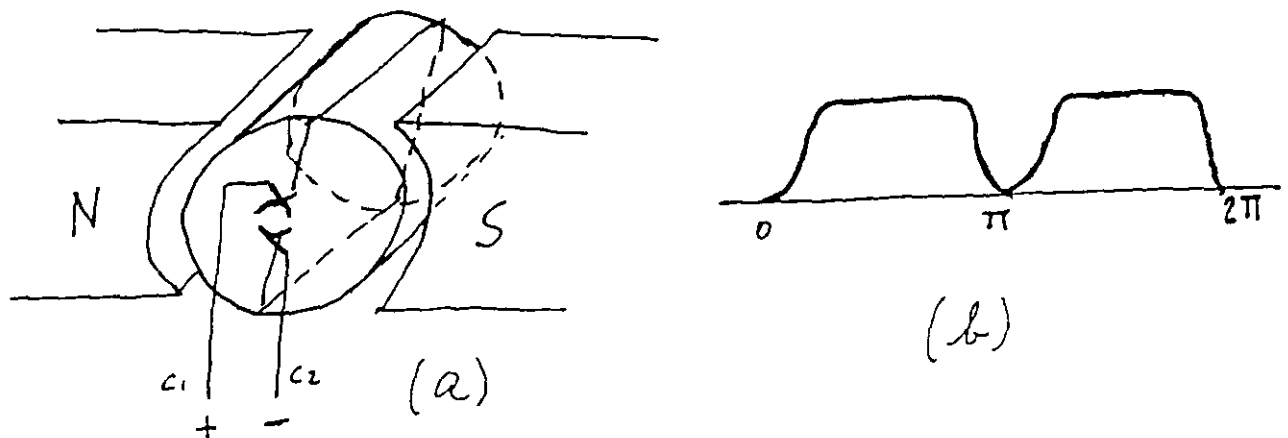


Fig.1.2 Generador eléctrico elemental con conmutador



Las terminales de cada conductor se conectan a un segmento del conmutador giratorio el cual a su vez hace contacto con el circuito exterior mediante dos escobillas conductoras. En esa forma el conductor  $c_1$  será siempre de polaridad positiva y el  $c_2$  de polaridad negativa y el voltaje entre los conductores  $c_1$  y  $c_2$  variará en función del tiempo en forma idéntica a la distribución espacial indicada en la Fig.1.2b. La existencia del conmutador permite invertir la parte negativa de la fuerza electromotriz de manera que por lo que respecta al circuito exterior a la máquina se obtiene un voltaje unidireccional, pero en el caso de la máquina con solo dos conductores de la Fig.1.2, la magnitud del voltaje es pulsante y varía de cero al valor máximo, como se muestra en la Fig.1.2b.

En las máquinas de corriente continua reales se tienen numerosos conductores distribuidos en la periferia del rotor y conectados en serie y a los segmentos respectivos del conmutador y generalmente más de un par de polos. Con esto se logra que en el circuito exterior la fuerza electromotriz resultante resulte unidireccional y prácticamente constante.

En las primeras máquinas de corriente continua el campo magnético se producía mediante imanes permanente. Esta solución está limitada actualmente a máquinas pequeñas en aplicaciones especiales. Excepto en esos casos, el campo magnético se obtiene mediante electroimanes, haciendo circular una corriente continua por un devanado enrollado en el núcleo de acero magnético de las piezas polares.

Si la corriente continua para la excitación del campo se suministra de una fuente independiente de la máquina, se tiene una máquina de excitación separada. Si el devanado del campo es recorrido por corriente continua producida por la propia máquina se tiene una máquina auto-excitada. En este caso se tienen tres posibilidades: que el devanado del campo quede conectado en paralelo con el de la armadura, o bien en serie con el de la armadura, o una combinación de ambos. Las características de operación de las máquinas de corriente continua dependen en forma importante del tipo de excitación.

#### Sistemas de energía eléctrica con corriente continua.

Generalmente se considera que los sistemas de energía eléctrica se inician en 1882 con las instalaciones de Edison en Nueva York, aunque existían ya algunas instalaciones de alumbrado utilizando lámparas de arco eléctrico.

En un principio el suministro de energía eléctrica se hizo mediante corriente continua a baja tensión, utilizando el generador de corriente continua (dinamo) desarrollado en 1866 por Siemens y perfeccionado en 1870 por Gramme. Inicialmente la carga estaba constituida por lámparas de arco eléctrico, que se utilizaban para alumbrado exterior. El invento de las lámparas incandescentes con filamento de carbón, que

fue realizado en 1879 por Edison en Estados Unidos y Swan en Inglaterra, abrió la posibilidad de utilizar la energía eléctrica para el alumbrado interior, desplazando el alumbrado con gas. En 1881 Siemens presentó un tranvía eléctrico movido con un motor de corriente continua.

Los primeros sistemas para transmitir la corriente continua, concebidos por Edison y sus asociados, eran de dos conductores y funcionaban a un voltaje prácticamente constante, con las cargas conectadas en paralelo.

El uso de sistemas de corriente continua a baja tensión limitaba, por razones económicas, la distancia a que podía transmitirse la energía eléctrica con una regulación de voltaje aceptable.

Es fácil ver que si la tensión de transmisión se hace  $n$  veces mayor, el peso del conductor necesario para transmitir una potencia dada, con unas pérdidas determinadas, se reduce  $n^2$  veces.

En efecto, considérese el sistema de corriente continua de dos conductores representado en la Fig.1.3.

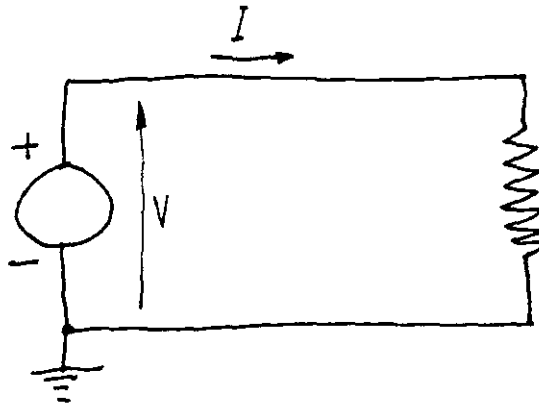


Fig.1.3 Sistema de corriente continua de dos conductores.

Si se aumenta la tensión de  $V$  a  $V_1 = nV$  manteniendo la potencia suministrada  $P = VI$  constante, la corriente eléctrica en los conductores disminuye a

$$I_1 = \frac{I}{n}$$

Puesto que las pérdidas por efecto Joule en los dos conductores de la línea se van a mantener al mismo valor:

$$I^2 R = I_1^2 R_1 = \frac{I^2}{n^2} R_1$$

$$R_1 = n^2 R$$

O sea, la resistencia de los conductores, cuando se usa una tensión  $n$  veces mayor, puede ser  $n^2$  veces mayor que la que se tiene con la tensión original  $V$ , para cumplir con la condición de que las pérdidas sean iguales; por lo tanto la sección, el volumen y el peso del conductor son  $1/n^2$  veces menores.

Si el criterio de comparación es que la caída de tensión en la línea represente el mismo porcentaje de la tensión entre hilos utilizada, la sección de los conductores (y por lo tanto su peso) puede reducirse  $n^2$  veces cuando la tensión de transmisión aumenta  $n$  veces, como se muestra a continuación.

La caída de tensión en la línea, referida al voltaje entre conductores está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{RI}{V} = \frac{R_1 I_1}{V_1} = \frac{R_1 I}{nV}$$

$$R = n^2 R_1$$

El problema con los sistemas de corriente continua es que no existe una tecnología sencilla y económica para elevar la tensión.

En la Fig.1.4 se muestra un sistema de corriente continua de tres conductores, que fué la solución ideada por Edison para duplicar la tensión de transmisión, conectando en serie dos ge

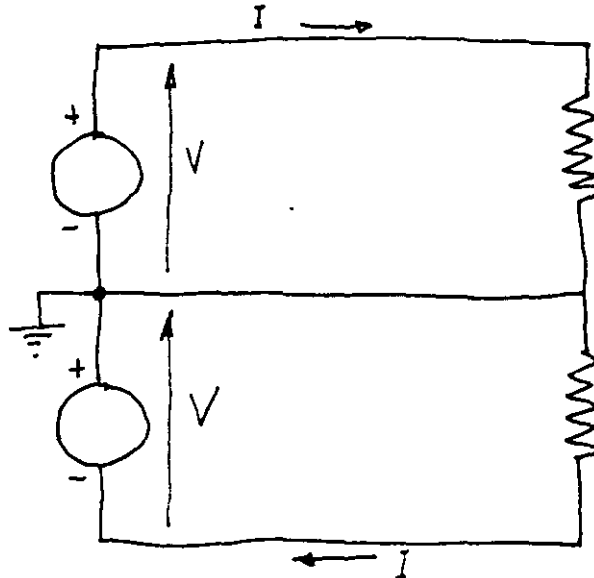


Fig.1.4. Sistema de corriente continua de tres conductores

neradores de corriente continua y utilizando un tercer conductor como neutro.

La idea de conectar varios generadores de corriente continua en serie para aumentar la tensión de transmisión dio lugar a la transmisión con corriente continua a alta tensión, que tuvo algunas aplicaciones industriales limitadas, de las cuales la más importante fue el sistema Thury, que consistía en conectar en serie varios generadores de corriente continua con excitación serie, funcionando a corriente constante. En otro extremo de la línea la carga estaba constituida por motores de corriente continua de excitación serie, conectados en serie. Uno de estos sistemas funcionó en la región de Lyon (Francia), transmitiendo con una corriente constante de 75 amperes, a una tensión variable con un máximo de 60000 volts.

### 1.3. Sistemas eléctricos de corriente alterna.

En 1831 Gaulard y Gibbs desarrollaron el transformador industrial, basado en el descubrimiento de Faraday de que una corriente eléctrica variable que circula por un circuito induce en otro circuito próximo una fuerza electromotriz también variable. El invento del transformador hizo posible la elevación eficiente y económica de la tensión utilizando corriente alterna. Los sistemas de corriente alterna para la generación y transmisión de energía eléctrica desplazaron a los de corriente continua, debido a un ahorro muy importante en el costo de los conductores, permitiendo la transmisión a grandes distancias. Además los generadores de corriente alterna resultaron más sencillos que los de corriente continua, pues no requieren colector y la interrupción de la corriente alterna resultó más fácil que la interrupción de la corriente continua, ya que su magnitud se reduce a cero cada semiciclo, lo que se aprovecha para facilitar su interrupción, especialmente en alta tensión.

Los primeros sistemas de corriente alterna fueron monofásicos.

En 1884 Gaulard realizó una transmisión con corriente alterna monofásica de 40 Km de longitud en la región de Turin (Italia). En 1886 se puso en servicio en Estados Unidos un sistema de corriente alterna monofásico, usando transformadores con tensión primaria de 500 volts y tensión secundaria de 100 volts. En 1887 entró en servicio un sistema de transmisión y distribución con corriente alterna en la ciudad de Lucerna (Suiza) y en 1888 otro en Londres, concebido y realizado por Ferranti.

En 1883 Tesla inventó los sistemas polifásicos, en 1886 desarrolló un motor polifásico de inducción, lo que amplió enormemente las aplicaciones de la corriente alterna y en 1887 patentó en Estados Unidos un sistema de transmisión de energía eléctrica trifásico.

La primera línea de transmisión trifásica se construyó en 1891 en Alemania, con una longitud de 180 Km y una tensión de 12000 volts.

Los sistemas de corriente alterna trifásicos se desarrollaron rápidamente y son actualmente de empleo general, ya que presentan claras ventajas sobre otros sistemas de corriente alterna. Desde el punto de vista del costo de los conductores un sistema trifásico de tres conductores requiere un peso total de conductores que es la cuarta parte del requerido por un sistema monofásico de conductores, para transmitir la misma potencia eléctrica, con las mismas pérdidas, a la misma distancia y con la misma tensión a tierra; esta última condición determina el aislamiento de las líneas de transmisión.

Otros sistemas polifásicos han tenido un desarrollo limitado. Por ejemplo, en un sector de París se instaló un sistema de distribución llamado bifásico, pero que en realidad era un sistema de cuatro fases, con cuatro tensiones de la misma magnitud y desfasadas  $90^\circ$ . Las alimentaciones troncales estaban constituidas por cuatro hilos de fase y un neutro; los ramales constaban de dos hilos de fase, que correspondían a dos tensiones en oposición y un neutro.

Actualmente se usan sistemas de corriente alterna monofásicos en algunos sistemas de distribución y para la alimentación de sistemas de tracción eléctrica.

Por lo que hace a los sistemas de corriente continua, la superioridad del motor de corriente continua sobre el de corriente alterna para las aplicaciones de tracción contribuyó a que se mantuviesen en sistemas de tracción de corriente continua, con tensiones hasta de 3000 volts; sin embargo actualmente se prefiere hacer la alimentación con corriente alterna y realizar la conversión de alterna a continua en las locomotoras.

En los sistemas de corriente alterna trifásica se usan tres conductores siempre que el desequilibrio entre las potencias de las tres fases es pequeño, que es el caso en las aplicaciones de transmisión. En los sistemas de distribución se usa frecuentemente el cuarto conductor que corresponde al neutro, especialmente en los circuitos de baja tensión.

En lo que se refiere a la frecuencia eléctrica utilizada en los sistemas de corriente alterna, inicialmente se prefirieron frecuencias bajas para disminuir las reactancias inductivas de las líneas y por razones de diseño de los motores de tracción, lo que hizo que se extendiera el uso de la frecuencia de 25 Hz. Posteriormente se fue imponiendo el uso de frecuencias más elevadas, de 50 Hz y 60 Hz, debido a que una frecuencia mayor permite utilizar circuitos magnéticos de menor sección, lo que da como resultado aparatos de menor tamaño y más baratos. No se ha llegado a una normalización internacional de la frecuencia eléctrica. Los países de Europa, la mayor parte de los de Asia y Africa y algunos de Sudamérica han adoptado una frecuencia de 50 Hz. En Estados Unidos y otros países del continente americano los sistemas eléctricos funcionan a 60 Hz. En algunos países, como Japón, coexisten sistemas de 50 Hz y 60 Hz. En México donde se daba esa misma circunstancia, se terminó en

1976 la unificación de la frecuencia a 60 Hz de todos los sistemas de energía eléctrica.

A partir de la introducción de la transmisión con corriente alterna trifásica a fines del siglo pasado, la cantidad de energía transmitida, la longitud de las líneas y la tensión de transmisión han aumentado considerablemente.

En 1896 se instaló una línea de 25 KV en Estados Unidos.

En 1905 entró en servicio una línea de 60 KV entre la planta hidroeléctrica de Necaxa y la ciudad de México, con una longitud de 154 Km, que constituyó en aquel momento la tensión más elevada en el mundo.

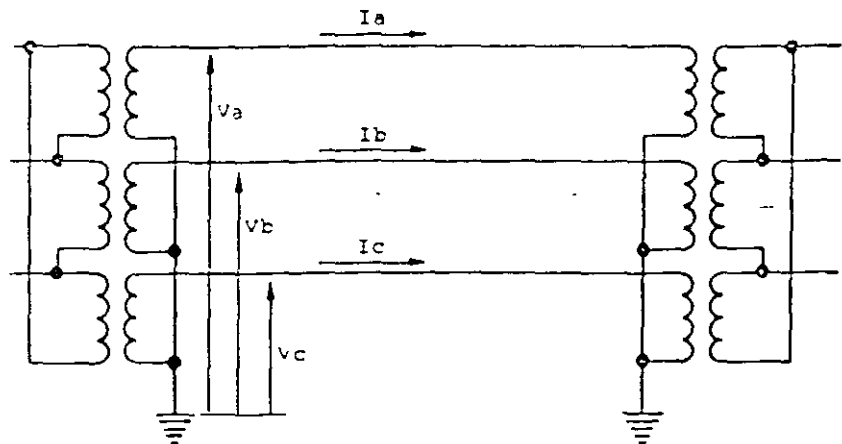
En 1913 las tensiones de transmisión subieron a 150 KV, en 1923 a 220 KV y en 1935 a 287 KV, en Estados Unidos. En 1952 entró en servicio en Suecia un sistema de transmisión de 400 KV, en 1958 uno de 500 KV en la Unión Soviética, en 1965 una línea de 735 KV en Canadá y poco después una de 765 KV en Estados Unidos. Existen actualmente algunas instalaciones de transmisión eléctrica con voltajes del orden de 1000 KV.

#### Transmisión con corriente continua a alta tensión.

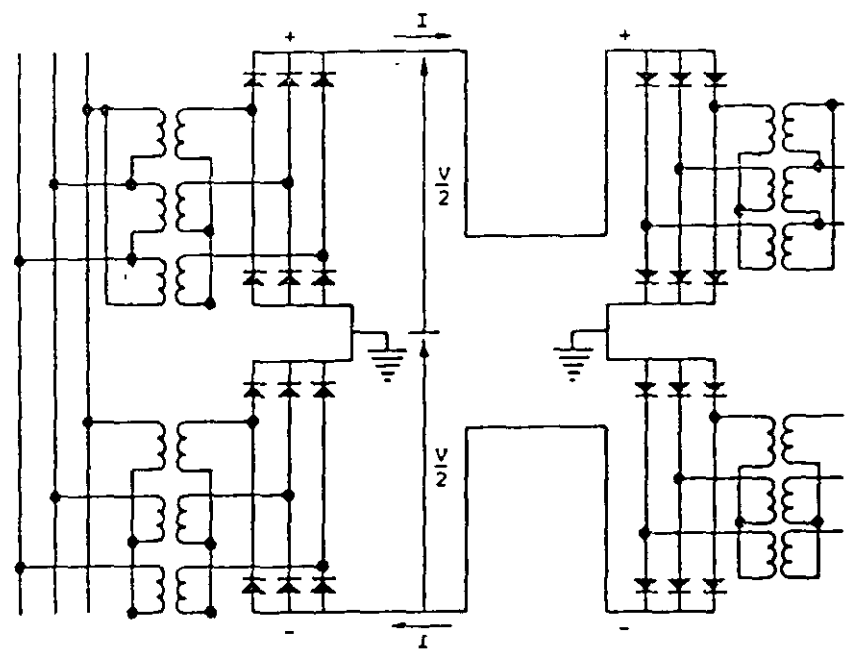
A partir de los años cuarenta se empezaron a desarrollar sistemas de transmisión con corriente continua a alta tensión. La energía eléctrica se genera con corriente alterna, la tensión se eleva mediante transformadores al valor necesario y se rectifica para realizar la transmisión con corriente continua; en el extremo receptor se sigue el proceso inverso. La primera instalación industrial de éste tipo entró en servicio en Suecia en 1954, transmitiendo 20000 KW a una distancia de 97 Km a través de un cable submarino a una tensión de 100 KV; se utilizaron equipos rectificadores e inversores de alta tensión, constituidos por válvulas de arco de mercurio con rejilla. Las instalaciones recientes de equipos de conversión se han realizado con rectificadores controlados de silicio (thyristores).

En todos los casos el sistema de corriente continua interconecta dos sistemas de corriente alterna, ya que el funcionamiento de los equipos como inversores requiere de la existencia de una fuente de corriente alterna que proporcione potencia reactiva.

Los sistemas desarrollados permiten invertir el sentido de la transmisión de potencia eléctrica, haciendo que la estación rectificadora funcione como inversora y viceversa.



a) Transmisión con corriente alterna



b) Transmisión con corriente continua

Fig.1.5. Sistemas de transmisión de corriente alterna y de corriente continua de alta tensión.

En el caso de las líneas de transmisión aéreas el interés que presenta la transmisión con corriente continua se debe a que considerando únicamente la línea de transmisión, excluyendo el equipo terminal, la transmisión con corriente continua resulta más económica que con corriente alterna. En efecto, el sistema de corriente continua, para transmitir la misma potencia eléctrica a la misma distancia, con las mismas pérdidas y el mismo calibre de conductores que el sistema de corriente alterna, requiere únicamente dos conductores en vez de tres para la corriente alterna, como se indica en la Fig. 1.5 y una tensión a tierra cuya magnitud es el 87% del valor de cresta de la tensión del sistema de corriente alterna y por lo tanto su nivel de aislamiento puede reducirse en esa proporción. Además es evidente que el número de aisladores y las dimensiones de las estructuras de soporte se reducen para el caso de la línea de corriente continua.

Para que la línea de corriente continua resulte más económica que la de corriente alterna es necesario que el ahorro que se obtiene en la línea misma compense el costo de las instalaciones terminales de rectificación e inversión. Como el costo de una línea de transmisión es directamente proporcional a su longitud, mientras más larga sea la distancia a que se requiere transmitir la energía eléctrica, mayor será el ahorro que se obtiene con la línea de corriente continua y existirá una longitud para la cual los costos de los dos sistemas (de corriente continua y de corriente alterna), incluyendo las instalaciones terminales, serán iguales. Para longitudes mayores el costo de la transmisión con corriente continua será menor que el de transmisión con corriente alterna. Esta distancia, actualmente, es mayor de 500 Km.

Para el caso de la transmisión con cables subterráneos o submarinos, en un sistema de corriente alterna, debido al elevado valor de la capacitancia de los cables, la corriente capacitiva puede alcanzar valores muy altos, incluso para distancias relativamente cortas. La longitud de un cable para la que la corriente capacitiva resulta igual a la corriente que puede conducir el cable se llama longitud crítica; para el caso de un cable de 220 KV es del orden de 45 Km.

En cambio con corriente continua no existe esa limitación. Por eso gran parte de las instalaciones con corriente continua a alta tensión que se han realizado consisten en aplicaciones con cables submarinos de alta tensión, con tensiones que llegan a 500 KV entre conductores ( $\pm$  250 KV a tierra).

Por lo que hace a líneas aéreas de corriente continua, existen actualmente en servicio líneas con tensión entre los conductores de hasta 800 KV ( $\pm$  400 KV a tierra).



## Sistemas de transmisión y de distribución

En la Fig. 3.13 se representan esquemáticamente los principales elementos de un sistema de suministro de energía eléctrica.

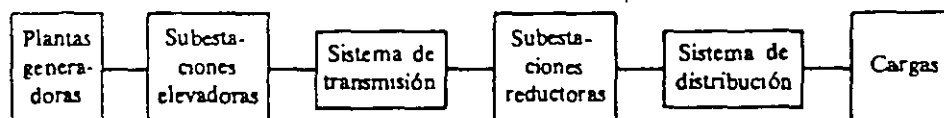


Fig. 3.13 Representación esquemática de un sistema de energía eléctrica.

Los sistemas de transmisión y distribución tienen como función hacer llegar a las instalaciones de los consumidores la energía eléctrica producida en las plantas generadoras.

En la Fig. 3.14 se muestra el diagrama unifilar simplificado de la red de alta tensión de un sistema eléctrico, indicando también las plantas generadoras y las cargas conectadas a la red. Estas cargas están constituidas por las subestaciones del sistema de distribución, el cual alimenta a los distintos consumidores servidos por el sistema. En la Fig. 3.15 se muestra un sistema de distribución radial.

En general, como ya se dijo, las plantas generadoras están alejadas de los centros de consumo y conectadas a éstos a través de una red de alta tensión, aunque algunas plantas generadoras pueden estar conectadas directamente al sistema de distribución.

La tensión se eleva a la salida de los generadores para realizar la transmisión de energía eléctrica en forma económica y se reduce en la proximidad de los centros de consumo para alimentar el sistema de distribución a una tensión adecuada. Esta alimentación puede hacerse directamente desde la red de transmisión, reduciendo la tensión en un solo paso al nivel de distribución, o a través de un sistema de subtransmisión o repartición, utilizando un nivel de tensión intermedio.

La elevación y la reducción de la tensión y la interconexión de los distintos elementos del sistema se realiza en las subestaciones, que constituyen los nudos de la red, cuyas ramas están constituidas por las líneas. De acuerdo con la función que realizan, las subestaciones pueden clasificarse en:

- a) Subestaciones elevadoras de las plantas generadoras.
- b) Subestaciones de interconexión de la red de alta tensión.
- c) Subestaciones reductoras para alimentar los sistemas de subtransmisión o de distribución.

Los sistemas de distribución pueden adoptar diversas disposiciones, ya sea que la distribución se haga con líneas aéreas o subterráneas y diversos arreglos de la topología del sistema: radial, en anillo o en red. Esto depende en gran parte de la densidad de carga en un área determinada y del tipo de carga.

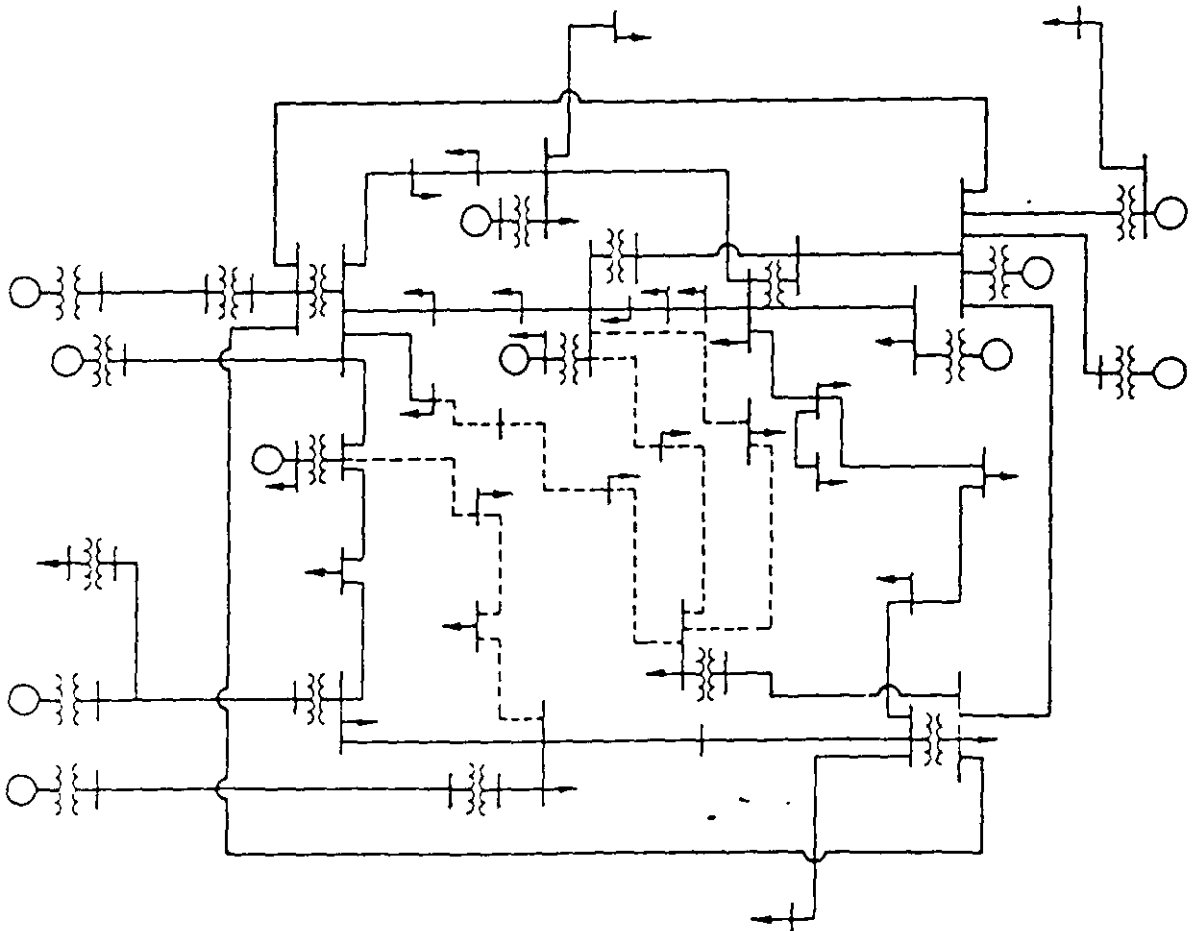


Fig. 3.14 Diagrama unifilar de una red de transmisión

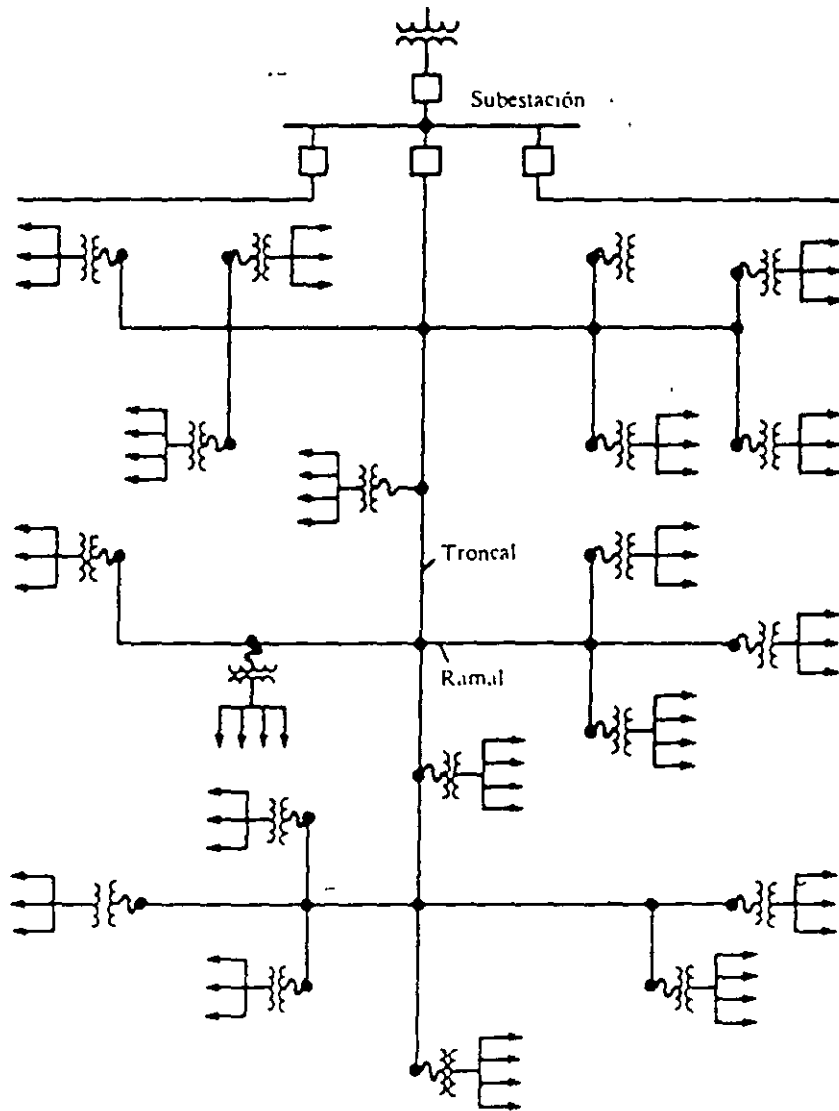


Fig. 3.15 Diagrama unifilar de un sistema de distribución radial

## Calidad del servicio

La energía eléctrica ha adquirido tal importancia en la vida moderna que una interrupción de su suministro causa trastornos y pérdidas económicas insoportables e incluso puede tener consecuencias sociales graves como ocurrió con el "apagón" de más de 9 horas que afectó a la ciudad de Nueva York el 13 de julio de 1977.

El suministro de energía eléctrica tiene características específicas, que lo diferencian del suministro de otras energías secundarias, como son, por ejemplo los productos petrolíferos o el gas. La energía eléctrica no puede almacenarse económicamente en cantidades significativas por lo que la potencia eléctrica generada debe ser igual en cada instante a la potencia demandada por los consumidores más las pérdidas del sistema.

Además, la energía eléctrica debe suministrarse con una calidad adecuada, de manera que los aparatos que la utilizan funcionen correctamente. La calidad del suministro queda definida por los siguientes tres aspectos: continuidad prácticamente total del servicio, control de la frecuencia a un valor prácticamente constante y regulación del voltaje dentro de límites aceptables.

Las anteriores características han determinado la estructura actual de los sistemas eléctricos y condicionarán cualquier cambio que se pretenda hacer a esa estructura.

Continuidad del servicio. - Para mejorar la continuidad del servicio se ha recurrido a la interconexión de las plantas generadoras de electricidad mediante la extensión del sistema de transmisión de alta tensión, cuya finalidad inicial era básicamente transmitir la energía eléctrica generada hasta las cargas eléctricas. Esta interconexión permite, además, obtener economías de escala al utilizar unidades generadoras más grandes y compartir la reserva de generación para casos de emergencia, reduciendo así las inversiones necesarias en capacidad de generación.

La interconexión tiene una serie de consecuencias sobre la operación de los sistemas eléctricos.

En primer lugar hay que concebir y operar el sistema de manera que las corrientes que circulan por los elementos de la red no los sobrecarguen. En caso de falla de uno de esos elementos (un generador, una línea de transmisión o un transformador), la nueva distribución de las corrientes no debe provocar una desconexión en cascada de otros elementos por sobrecarga, que podría conducir a un colapso del sistema.

En segundo lugar en los sistemas eléctricos de corriente alterna todos los generadores deben funcionar en sincronismo, o sea - -

girar a la velocidad angular de rotación nominal, proporcional a la frecuencia eléctrica del sistema y al número de polos magnéticos de los generadores y deben mantener ese sincronismo -- tanto en operación normal, con cambios graduales de la carga, como en condiciones anormales, cuando pueden producirse cambios bruscos debidos a fallas de aislamiento en algún punto o a otras causas.

La preservación del equipo y de las instalaciones en caso de falla hace necesario disponer de un sistema de protección automático, que desconecte rápidamente la sección del sistema eléctrico afectada por la falla, para limitar los daños y para conservar el funcionamiento en sincronismo de los generadores y evitar así la desarticulación del sistema. Este sistema de protección es actuado generalmente por señales de corriente y de voltaje locales y actúa a su vez, también localmente, sobre dispositivos de interrupción.

Control de la frecuencia..- Considérese ahora otro de los factores que contribuyen a la calidad del servicio: el control de la frecuencia eléctrica del sistema. Una variación de la frecuencia con respecto a su valor nominal (60 ciclos por segundo en México) refleja un desequilibrio entre la potencia eléctrica total que están generando las unidades generadoras y la potencia total que están demandando las cargas eléctricas más -- las pérdidas reales del sistema. Este desequilibrio se manifiesta en cada unidad generadora por una variación de su velocidad de rotación. Los reguladores de velocidad o gobernadores de cada turbina u otro primomotor que impulse al generador, registran esta variación de velocidad y actúan sobre las válvulas de admisión de fluido al primomotor, llegándose a un nuevo estado de equilibrio; sin embargo esto se logra a una frecuencia ligeramente distinta de la nominal, debido a las características de operación de los reguladores de velocidad, necesarias para lograr que la operación de varias unidades generadoras en paralelo sea estable. Para restablecer la frecuencia -- del sistema a su valor nominal se requiere un control adicional centralizado, que establece el error de frecuencia del sistema y actúa sobre las unidades generadoras para anularlo. Este control centralizado se puede regionalizar si al error de frecuencia se le añade el error de intercambio de potencia entre subsistemas.

Regulación del voltaje..- Por último considérese el tercer factor que contribuye a la calidad del servicio: la regulación -- del voltaje.

Los aparatos conectados a los sistemas eléctricos están diseñados para operar a un valor determinado del voltaje, característica que ya se cumplía en el sistema de voltaje constante con cargas conectadas en paralelo concebido por Edison. El funcionamiento de esos aparatos será satisfactorio siempre que el --

voltaje aplicado no varíe más allá de ciertos límites; una variación de  $\pm 5\%$  en los puntos de utilización, con respecto al voltaje nominal, se considera generalmente adecuada.

Si un sistema tuviese una carga fija y un régimen de generación fijo, sería posible mantener un voltaje determinado en cualquier punto del sistema mediante la elección adecuada de la relación de transformación de los transformadores. Sin embargo la carga de un sistema eléctrico varía considerablemente durante el transcurso de cada día. En los sistemas de corriente alterna esa carga está constituida por la potencia real o activa que requieren los aparatos que utilizan la energía eléctrica (entre los que los motores representan una proporción elevada) y también por la potencia reactiva, que es el resultado de la oscilación de potencia entre las inductancias y las capacitancias del sistema debido al cambio de polaridad de la corriente, que ocurre 120 veces en cada segundo en un sistema con frecuencia de 60 Hz.

La variación de la carga obliga a variar la generación para adaptarla en cada instante a la demanda de los consumidores, todo lo cual modifica la potencia real y reactiva que circula por las líneas de transmisión y los transformadores, lo que causa una modificación de las caídas de voltaje en los distintos elementos del sistema eléctrico. En efecto la variación de voltaje en cualquier punto del sistema es función de la variación de la potencia real y de la potencia reactiva en ese punto.

La potencia real se produce en los generadores eléctricos y se transmite a las cargas a través de los sistemas de transmisión y de distribución. En cambio la potencia reactiva puede suministrarse, además de hacerlo con los generadores funcionando con factor de potencia atrasado (sobre-excitados), mediante capacitores (condensadores industriales) y motores síncronos y es absorbida por las inductancias del sistema y por los generadores y motores síncronos funcionando con factor de potencia adelantado (sub-excitados) y por los motores de inducción.

En consecuencia la potencia reactiva puede y debe suministrarse lo más cerca posible de las cargas que van a absorberla, adaptando ese suministro a las necesidades de la carga, que varían a lo largo del día, disminuyendo así las variaciones de voltaje en el sistema y las pérdidas de potencia real, que serían mayores si toda la potencia reactiva se suministrara con los generadores.

Además hay que tener en cuenta que los distintos elementos inductivos del sistema absorberán más o menos potencia reactiva, según sea la magnitud de la corriente que circule por esas inductancias. Como esta corriente varía al variar la carga y el régimen de generación, hay que prever los medios de compensación de potencia reactiva adecuados para mantener los voltajes dentro de límites tolerables en los distintos puntos del sistema.

Lo anterior muestra que la regulación del voltaje da lugar a un control descentralizado, que pueda responder a señales de voltaje y corriente locales.

Las características de los sistemas eléctricos que se acaban de describir indican que estos sistemas deben concebirse y operarse como un conjunto donde todos los elementos y funciones, desde las plantas generadoras a las cargas, están estrechamente relacionados.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

# CURSOS ABIERTOS

## DIPLOMADO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

### MODULO III DISEÑO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

CLAVE CA-184

#### TEMA

### LA GENERACIÓN Y LA TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO

DEL 24 DE MAYO AL 4 DE JUNIO

**EXPOSITOR: ING. JACINTO VIQUEIRA LANDA**  
**PALACIO DE MINERÍA**  
**MAYO DE 2004**



## LA GENERACION Y LA TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA EN MEXICO

Cuando el presidente Lázaro Cárdenas promulgó la ley que creó la Comisión Federal de Electricidad, el 24 de agosto de 1937, el suministro de energía eléctrica en México estaba limitado a los centros urbanos y algunas zonas rurales próximas a ellos, así como a ciertas instalaciones mineras e industriales.

La capacidad instalada para la generación de electricidad en 1937 era de 457 MW, correspondiendo el 77.7% a plantas hidroeléctricas y el 22.3% a plantas termoeléctricas, la energía eléctrica generada ese año fue de 2110 millones de KWh y el consumo de energía eléctrica por habitante de 109 KWh

Cincuenta años después, en 1987, la capacidad instalada había alcanzado el valor de 23145 MW, la generación anual el de 96310 millones de KWh y el consumo por habitante se había incrementado hasta 1505 KWh.

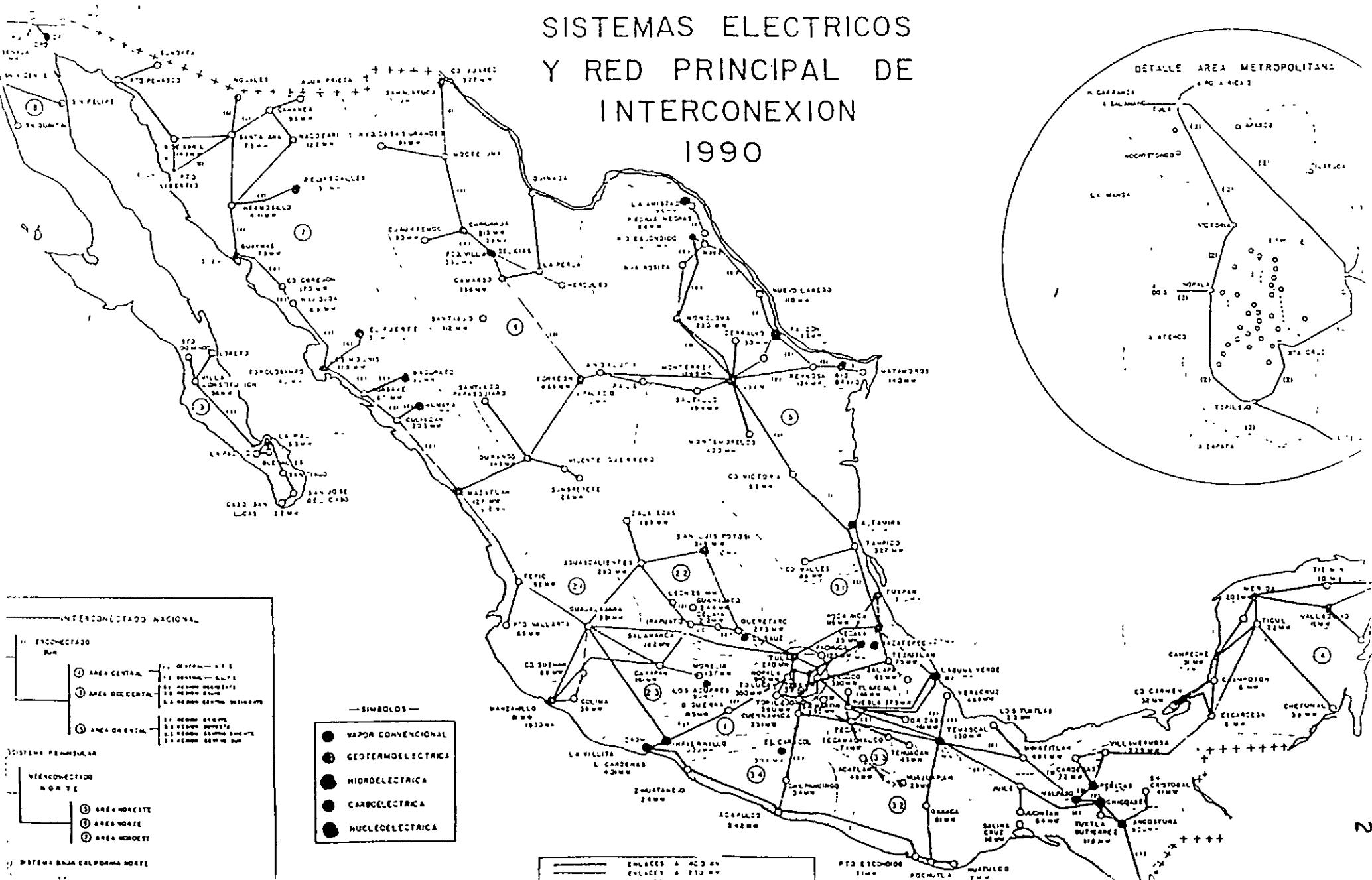
Los sistemas eléctricos, antes dispersos, se han interconectado mediante una red de líneas de transmisión de alta tensión que se extiende por el país, desde la frontera con Estados Unidos hasta la frontera con Guatemala, como puede verse en el mapa de la Fig No 1

El crecimiento anual promedio de la capacidad instalada en plantas generadoras ha sido durante estos cincuenta años de 8.17% y el de la energía eléctrica generada de 7.94%.

Pueden distinguirse dos épocas en el desarrollo de las instalaciones de generación y transmisión de la Comisión Federal de Electricidad. En la primera, que va de 1937 a 1960, la Comisión coexistente con las dos empresas eléctricas privadas extranjeras que operaban en el país y se dedica principalmente a la construcción y operación de plantas hidroeléctricas y de las líneas de transmisión correspondientes, vendiendo en bloque la energía eléctrica generada a las empresas privadas, que realizaban la distribución y comercialización de esa energía además de la producida en sus propias plantas, generalmente termoeléctricas. El primer proyecto hidroeléctrico importante de esta primera época fue el de Ixtapantongo, que se inició dos años después de la creación de la CFE y cuya operación comercial comenzó en 1944. En las gráficas de las figuras 2 y 3 se muestra el crecimiento de la capacidad instalada y de la generación bruta entre 1937 y 1959.

Fig. N° 1

# SISTEMAS ELECTRICOS Y RED PRINCIPAL DE INTERCONEXION 1990



En esta primera época las plantas termoeléctricas se localizaban cerca de los principales centros de consumo, en zonas urbanas, ya que era más económico transportar el combustible, constituido por combustóleo o gas natural, que la electricidad, además, como las unidades generadoras eran relativamente pequeñas se podía obtener localmente agua para el enfriamiento de los condensadores

La segunda época se inicia en 1960, año en el que el Gobierno Federal adquirió los bienes de una de las empresas privadas, la Impulsora de Empresas Eléctricas, filial de la corporación norteamericana American and Foreign Power Company y la gran mayoría de las acciones de la otra empresa, la Mexican Light and Power Company, cuya casa matriz estaba en Canadá. En ese año el Congreso de la Unión aprobó la modificación del artículo 27 de la Constitución, propuesta por el presidente Adolfo López Mateos, en el sentido de que corresponde a la nación generar, transformar, distribuir y abastecer la energía eléctrica para la prestación de servicio público.

Esta segunda época se caracteriza, en primer lugar, por un cambio en la escala de los proyectos hidroeléctricos. A diferencia de la primera época, en la que se construyeron 41 plantas hidroeléctricas relativamente pequeñas, que aprovechaban fundamentalmente los escurrimientos de las partes altas de las cuencas hidrográficas, con gastos de agua bajos y caídas grandes, en la segunda se realizaban proyectos grandes en partes más bajas de las cuencas, con caudales importantes y caídas menores. El primer proyecto de este tipo es el de Infiernillo, en el río Balsas, que entra en servicio en 1965, para transmitir la energía eléctrica generada en estas grandes plantas hidroeléctricas, más alejadas de los centros de consumo, fue necesario recurrir a un voltaje de transmisión más alto, de 400 KV, que casi duplicó el de 230 KV que se había introducido a principios de los años cincuenta.

La década de los años sesenta es, a nivel mundial, un período de petróleo abundante y barato y se caracteriza por la penetración creciente de los hidrocarburos como energéticos para la generación de energía eléctrica. México no fue la excepción y así vemos como en esta segunda época de la Comisión Federal de Electricidad se le da preferencia a las plantas termoeléctricas, especialmente a las que usan combustóleo o gas natural como combustible. El número de proyectos hidroeléctricos realizados se reduce, aunque el tamaño de cada uno es mayor, como ya se dijo, y crece considerablemente el de los proyectos termoeléctricos, aumentando el tamaño de las unidades generadoras. A partir de esa época la importancia relativa de la generación termoeléctrica aumenta, pasando de representar un 48% de la generación total en 1960 a un 81% en 1987. En las gráficas de las figuras 4 y 5 se muestra el crecimiento de la capacidad instalada y de la generación bruta entre 1960 y 1991.

Fig.N°2. CAPACIDAD INSTALADA

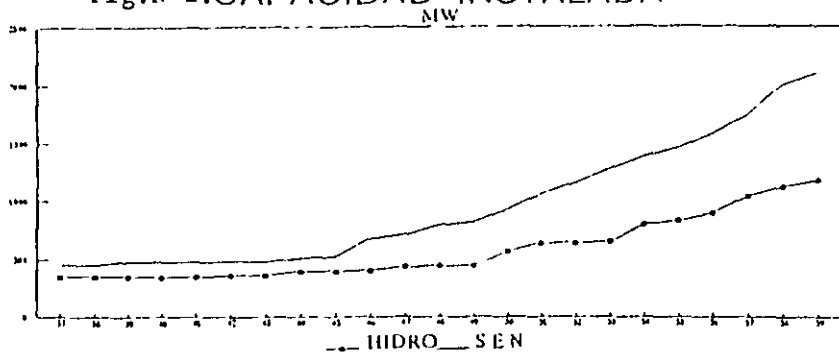


Fig.N°4. CAPACIDAD INSTALADA

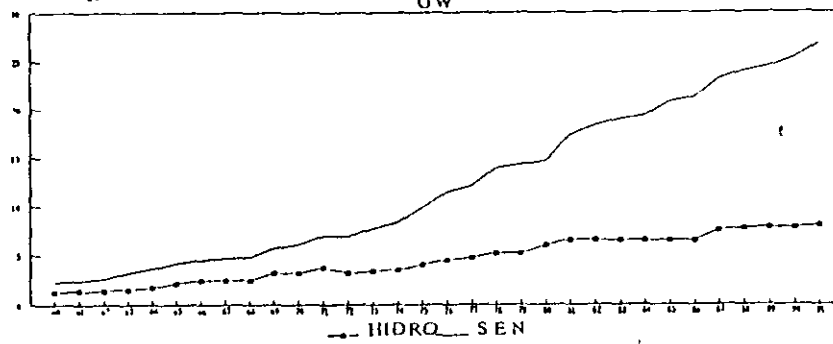


Fig.N°3. GENERACION BRUTA

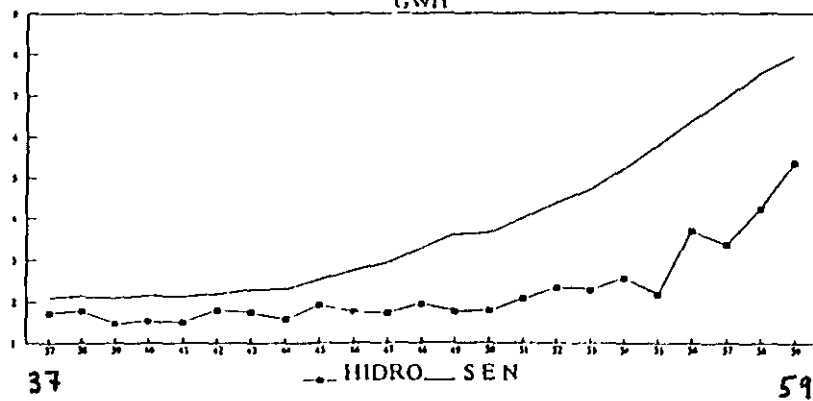
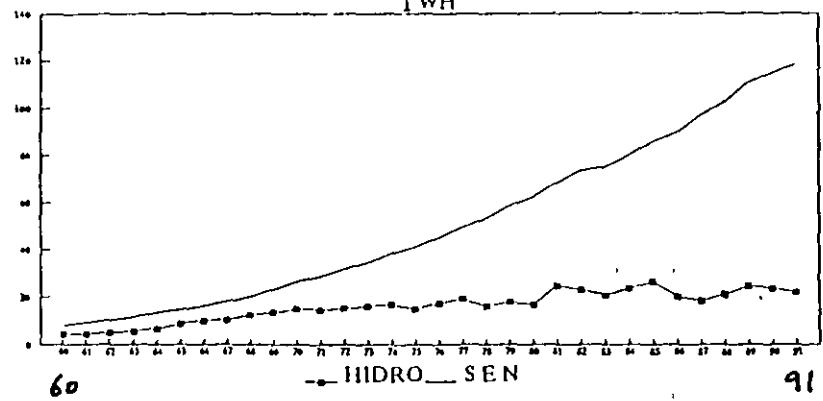


Fig.N°5. GENERACION BRUTA



El aumento del tamaño de las unidades generadoras termoeléctricas obligó a buscar localizaciones en las que se tuviera acceso fácil a los combustibles y al agua de enfriamiento. Esto condujo a localizar varias plantas termoeléctricas cerca de refinerías de Petroleos Mexicanos y posteriormente a situarlas en las costas para utilizar el agua del mar para el enfriamiento de los condensadores.

Sin embargo este proceso de crecimiento de la generación termoeléctrica a base de hidrocarburos, que ha seguido hasta el presente, pasa por un período de cuestionamiento a fines de los años sesenta y principios de los setenta. La causa fué la preocupación que existía en esos años por la declinación de las reservas petroleras mexicanas frente a un consumo creciente de productos petrolíferos, lo que causó finalmente que México se convirtiera en un importador neto de petróleo entre 1970 y 1973. Esta situación hacía aconsejable buscar nuevas fuentes de energía para generar electricidad, que contribuyesen a disminuir la dependencia con respecto a los hidrocarburos.

De esa época de crisis petrolera mexicana y de preocupación por la diversificación energética en la expansión del sector eléctrico procede la decisión de realizar un primer proyecto nucleoelectrico, el de Laguna Verde, incluso se llegó a proponer que la Comisión Federal de Electricidad no realizase ni una planta generadora más que utilizase hidrocarburos y que el desarrollo futuro se basara fundamentalmente en un programa nucleoelectrico de gran magnitud.

El descubrimiento de una nueva y rica provincia petrolera en el sureste de México, que empezó a producir a principios de 1973, permitió superar la crisis, haciendo que se recuperara la autosuficiencia petrolera e incluso que se generaran excedentes para la exportación. Sin embargo la elevación considerable de los precios mundiales del petróleo y del gas natural, debida a los choques petroleros de 1973 y 1979, restaron competitividad a los hidrocarburos para la generación de electricidad. Finalmente los precios del petróleo se desplomaron a mediados de la década de los ochenta, para iniciar después una lenta recuperación.

A pesar de algunas propuestas extremas, como la antes mencionada para eliminar drásticamente los hidrocarburos de la generación de energía eléctrica, las decisiones que se tomaron en la Comisión Federal de Electricidad a mediados de los años setenta para la expansión del sector eléctrico se basaron en una estrategia de diversificación energética más prudente y equilibrada, se inscribieron a partir de 1974 en el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico varios proyectos hidroeléctricos como Chicoasen y Peñitas en el río Grijalba y El Caracol en el río Balsas, se amplió el programa de plantas geotermoeléctricas y se promovió un programa para la utilización del carbón en el norte del país, con una primera etapa consistente en la construcción de la planta termoeléctrica de Río Escondido. Al mismo tiempo se mantuvo un programa de plantas termoeléctricas que utilizarán el combustoleo producido en las refinerías.

de Petroleos Mexicanos como subproducto de la refinación del petróleo para la obtención de gasolinas y otros productos ligeros.

La crisis económica que se inicia a mediados de 1982 y que se caracteriza fundamentalmente por el problema de la deuda externa, redujo drásticamente la disponibilidad de recursos financieros para el desarrollo del sector eléctrico durante varios años. A pesar de que la economía nacional prácticamente no creció durante ese período el consumo de energía eléctrica sí lo hizo, aunque a una tasa menor que en el pasado. La falta de inversiones suficientes agravó el problema del deterioro de las instalaciones existentes, principalmente de las plantas termoeléctricas, a causa de la imposibilidad de proporcionar oportunamente el mantenimiento necesario. También empeoró el problema de las pérdidas excesivas en los sistemas de transmisión y sobre todo de distribución, debido a no haberse realizado las ampliaciones que requería el aumento de la carga. Estos problemas configuran una situación típica de muchos países en desarrollo, donde la capacidad de generación realmente operable es inferior a la capacidad nominal y donde las pérdidas de transmisión y distribución llegan a exceder al 20% de la energía neta generada, cuando deberían ser inferiores al 10%. En el caso de México las pérdidas de transmisión y distribución representaron en 1990 el 15% de la energía neta generada.

En esas condiciones de limitación de recursos financieros se dio prioridad a soluciones que requiriesen un mínimo de inversión y diesen resultados a corto plazo. El programa nucleoelectrico se redujo primero y se aplazó por tiempo indefinido después (excepto la terminación de las dos unidades de Laguna Verde) debido a sus altos costos de inversión y largos períodos de construcción, así como por la falta de un consenso suficiente en la opinión pública sobre la conveniencia de utilizar esa tecnología. En cambio la baja de los precios del petróleo, y en consecuencia del combustóleo, propició la realización de nuevos proyectos de plantas termoeléctricas que usan ese combustible. Además se implantó un programa para rehabilitar las instalaciones existentes.

La situación a diciembre de 1999 de los sistemas de generación y transmisión en México es la siguiente

Se cuenta con una capacidad instalada de generación de 35651 MW, de la cual el 27.1% corresponde a plantas hidroeléctricas, el 67.1% a termoeléctricas que utilizan como combustible combustóleo, gas natural o carbón, 3.7% a la planta nucleoelectrica de Laguna Verde y 2.1% a geotermoeléctricas y eoloelectricas.

El suministro de energía eléctrica en 1998 alcanzó el valor de 137200 millones de KWh, del cual correspondió a la industria el 59.8%, al sector residencial el 23.1%, al comercial el 7.7%, al agrícola el 5.6% y a los servicios el 3.8%

La red de transmisión formada por líneas de 400 K y 230 KV tenía en 1997 una longitud de 31586 Km. Los sistemas de subtransmisión, que utilizan voltajes de 69 a 161 KV, suman una longitud de 39174 Km y los sistemas de distribución, con voltajes de 24 a 34.5 KV, una longitud de 317718 Km de los cuales 9799 son subterráneos.

En cuanto al futuro de la generación y transmisión de la energía eléctrica puede señalarse que la Comisión Federal de Electricidad, al igual que las empresas eléctricas en todo el mundo, debe tener en cuenta aspectos que si bien no eran totalmente inexistentes en el pasado, no habían alcanzado la importancia que tienen ahora. Estos aspectos se refieren a la protección del medio ambiente y a la conservación de la energía. La prioridad que se otorga actualmente a la solución de estos problemas condiciona no solo las tecnologías que se usarán en el futuro, sino también la futura estructura de las empresas eléctricas.

Uno de los problemas ambientales que influirá en el desarrollo futuro de los sistemas de generación es el causado por la utilización de combustibles fósiles (carbón, combustóleo y gas natural) en las plantas termoeléctricas, lo que da lugar a impactos ambientales de mayor o menor magnitud, según el tipo de combustible, que pueden tener efectos a corto y a largo plazo. Estos impactos ambientales se manifiestan por la producción de óxidos de azufre y de nitrógeno que a su vez causan la lluvia ácida; además la combustión de esos energéticos produce inevitablemente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y este gas contribuye al aumento del efecto invernadero en la atmósfera, lo que podría producir a largo plazo un incremento de la temperatura de la superficie terrestre y un cambio global del clima. Existe actualmente en todo el mundo una gran preocupación por este problema y los diferentes países tendrán que comprometerse a limitar su contribución a la producción de  $\text{CO}_2$ .

¿Qué influencia tendrán estos problemas ambientales en el futuro desarrollo de la generación de energía eléctrica?

En primer lugar constituyen una motivación para usar energéticos más limpios para generar electricidad. En el caso de los combustibles fósiles es clara la tendencia mundial a usar preferentemente gas natural en lugar de carbón y combustóleo, ya que en comparación con el carbón el gas natural produce el 59% de  $\text{CO}_2$  por unidad de energía generada y con respecto al combustóleo el 72%; cuando esta sustitución no es posible se recurre a tecnologías para obtener una combustión menos contaminante, como la desulfuración previa del combustóleo, la combustión en lecho fluidizado del carbón o la gasificación del mismo.

En segundo lugar, cualquier aumento de la eficiencia en el proceso de conversión de los combustibles fósiles en energía eléctrica contribuirá a disminuir su impacto ambiental, ya que se requerirá menos combustible para producir una cantidad dada de energía eléctrica. Por esta razón existe actualmente una preferencia en varios países por las plantas de ciclo combinado, empleando gas natural como combustible, con lo que pueden alcanzarse eficiencias de conversión del 50%, bastante mayores que con una planta termoeléctrica convencional.

Las plantas de ciclo combinado aprovechan las cualidades termodinámicas de las turbinas de gas en el rango de temperaturas altas y la eficiencia de las turbinas de vapor en el rango de temperatura más bajas. En el esquema más utilizado la energía del combustible en la forma de gases de combustión muy calientes a presión se suministra a la turbina de gas, que impulsa a un generador eléctrico, los gases que salen de la turbina se utilizan en un cambiador de calor para vaporizar agua y mover una turbina de vapor que impulsa, a su vez, otro generador eléctrico. Las plantas de ciclo combinado pueden utilizarse asociadas a una planta de gasificación del carbón, lo que permite una utilización más limpia de ese energético.

La utilización de los recursos energéticos renovables, como la energía hidroeléctrica, la energía solar directa y la energía del viento, evita los problemas de contaminación atmosférica por los gases resultantes de la combustión y presenta, en consecuencia, ventajas ambientales indiscutibles. Desde el punto de vista económico la generación hidroeléctrica resulta competitiva con respecto a la generación de electricidad con combustibles fósiles y, además, existe en México un potencial hidroeléctrico no aprovechado muy importante, como puede verse en la tabla No 1.

Entre los desarrollos futuros para generar electricidad, destaca por sus características favorables para la preservación del medio ambiente la conversión directa en celdas de combustible de la energía contenida en el gas natural o en el hidrógeno en electricidad, con eficiencias de conversión hasta del 55%. Están disponibles comercialmente celdas de 20 y 50 MW con electrolito de ácido fosfórico, cuyo diseño está basado en el de una instalación de demostración de 11 MW realizada conjuntamente por Estados Unidos y Japón.

Los problemas ambientales que causa el uso de los combustibles fósiles y principalmente el de la producción de CO<sub>2</sub> y su posible repercusión en un cambio climático global, se han presentado por la industria nuclear como un argumento para promover la generación nucleoelectrónica, sin embargo no parece probable que la virtual moratoria nuclear que existe actualmente en muchos países pueda desaparecer mientras no se resuelvan dos problemas tecnológicos fundamentales. el de la seguridad, mediante el desarrollo de una nueva generación de reactores intrínsecamente seguros y el de la disposición final de los desechos radiactivos de alto nivel y muy larga vida.



Tabla No 1  
**POTENCIAL HIDROELECTRICO DE MEXICO**  
 1992

Nivel de desarrollo	No de proyectos	Potencia instalada MW	Generación media anual GWh
Identificación	416	28,788	81,362
Evaluación	61	5,786	15,191
Prefactibilidad	19	3,882	10,929
Factibilidad	13	3,941	10,728
Diseño	7	1,814	4,628
Construcción	4	1,608	4,006
Operación	42	7,850	25,747
Operación Suspendida	3	69	269
<b>TOTAL</b>	<b>565</b>	<b>53,738</b>	<b>152,860</b>

**DISTRIBUCION DEL POTENCIAL HIDROELECTRICO**

Región	No de proyectos	Generación media anual GWh	% de la generación total
Norte	13	1196	0.8
Pacífico Norte	159	38103	24.9
Pacífico Sur	142	35623	23.3
Golfo	147	31148	20.4
Sureste	104	46790	30.6
<b>TOTAL</b>	<b>565</b>	<b>152860</b>	<b>100.0</b>

Analizaremos ahora la posible influencia en el futuro desarrollo de los sistemas de generación y transmisión de la conservación de energía, o sea del uso eficaz y racional de la energía y de los recursos energéticos

Es un hecho plenamente demostrado en numerosos países que es posible mantener un desarrollo económico con un consumo de energía considerablemente menor por unidad de producto producido que en el pasado, cuando los bajos precios de los energéticos no incitaban a un uso más eficiente de estos

Por lo que hace a la industria eléctrica, actualmente es una práctica extendida de planeación, denominada planeación para el costo mínimo, el analizar si resulta más conveniente aumentar la capacidad de generación o, por el contrario, el invertir para impulsar la implantación de medidas de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica.

Existen nuevas tecnologías, tanto en iluminación como en diseño de motores y de aparatos eléctricos, o de sistemas que utilizan energía eléctrica, que permiten obtener los resultados deseados con consumos de energía considerablemente menores a los tradicionales. Por ejemplo las lámparas fluorescentes compactas consumen 80% menos energía eléctrica que las incandescentes, para el mismo nivel de iluminación y no requieren ningún dispositivo especial para su instalación. Un aumento de la eficiencia de los motores eléctricos, que consumen más de la mitad de la energía eléctrica generada, puede significar ahorros de energía eléctrica muy importantes con inversiones adicionales relativamente bajas que se amortizan en períodos de tiempo muy cortos. Igualmente el perfeccionamiento del diseño de aparatos eléctricos domésticos, como refrigeradores, lavadoras, etc., puede reducir sus consumos de energía eléctrica a menos de la mitad.

Por otra parte pueden lograrse ahorros importantes de energía mediante la producción combinada de energía eléctrica y calor, lo que se conoce con el nombre de cogeneración. Frecuentemente esas dos funciones de generar electricidad y producir calor para procesos industriales o para calefacción se hacen por separado, si se combinan en un sistema de cogeneración puede lograrse una eficiencia considerablemente más alta que con los procesos separados.

Resulta evidente que el uso eficaz y racional de la energía tiene un efecto favorable sobre el medio ambiente, ya que permite obtener los bienes y servicios necesarios con un menor consumo de energía y en consecuencia con un menor impacto ambiental.

La importancia primordial que han alcanzado los dos factores antes mencionados: la protección del medio ambiente y la conservación de los recursos energéticos, tendrán una repercusión decisiva en el desarrollo futuro de los sistemas de generación y transmisión y de las propias empresas eléctricas. Los principales aspectos en que esto empieza a manifestarse son los siguientes

Colaboración de las empresas eléctricas con los consumidores de electricidad para implantar medidas de conservación de energía e introducir tecnologías más eficientes para el uso final de la energía eléctrica

Fomento de la cogeneración en colaboración con los consumidores industriales.

Implantación de procedimientos para facilitar la introducción de nuevas tecnologías para generar electricidad.

Estos nuevos enfoques de las actividades de las empresas eléctricas tendrán consecuencias en su organización y funcionamiento. Las empresas no se dedicarán únicamente a suministrar energía eléctrica con la calidad adecuada y al menor costo posible, sino que deberán convertirse también en empresas de servicio que fomenten y apoyen el uso eficiente de la energía eléctrica y la preservación del medio ambiente

México, D.F., mayo de 2001.

Ing Jacinto Viqueira Landa.

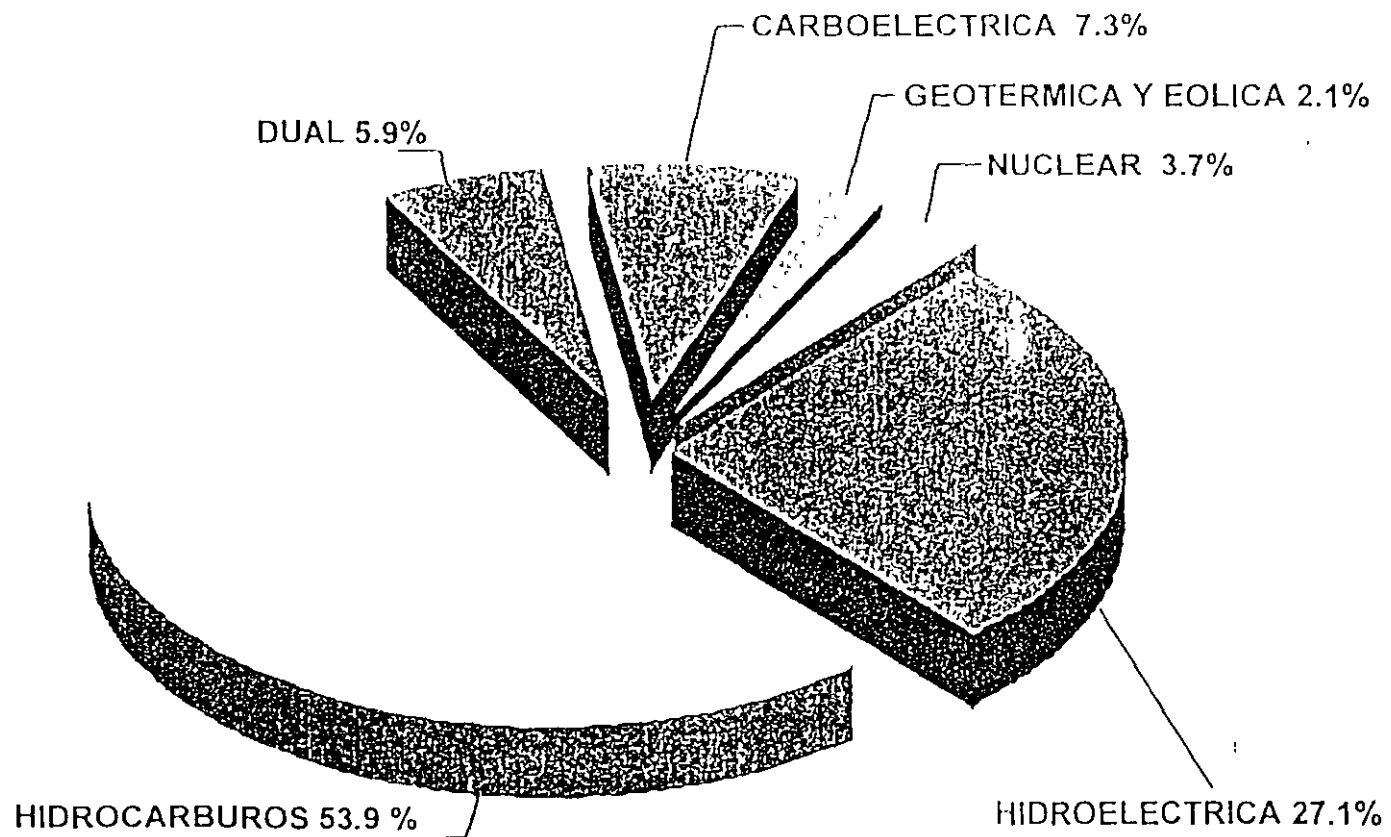
ANEXO  
ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DEL SECTOR ELECTRICO  
DE MEXICO

1. Capacidad efectiva de generación al 31-XII-1999
2. Principales centrales generadoras de México
3. Red principal de transmisión
4. Historia y estimación del consumo futuro de energía eléctrica
5. Ubicación de centrales en proceso de construcción
6. Ubicación de centrales en proceso de licitación
7. Requerimiento de capacidad adicional de generación hasta el año 2008
8. Unidades generadoras en proceso
9. Red actual de gasoductos
10. Consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en 1998 y 2008.

# CAPACIDAD EFECTIVA, SECTOR ELECTRICO MEXICANO

AL 31 DE DICIEMBRE DE 1999

35,651 MW \*



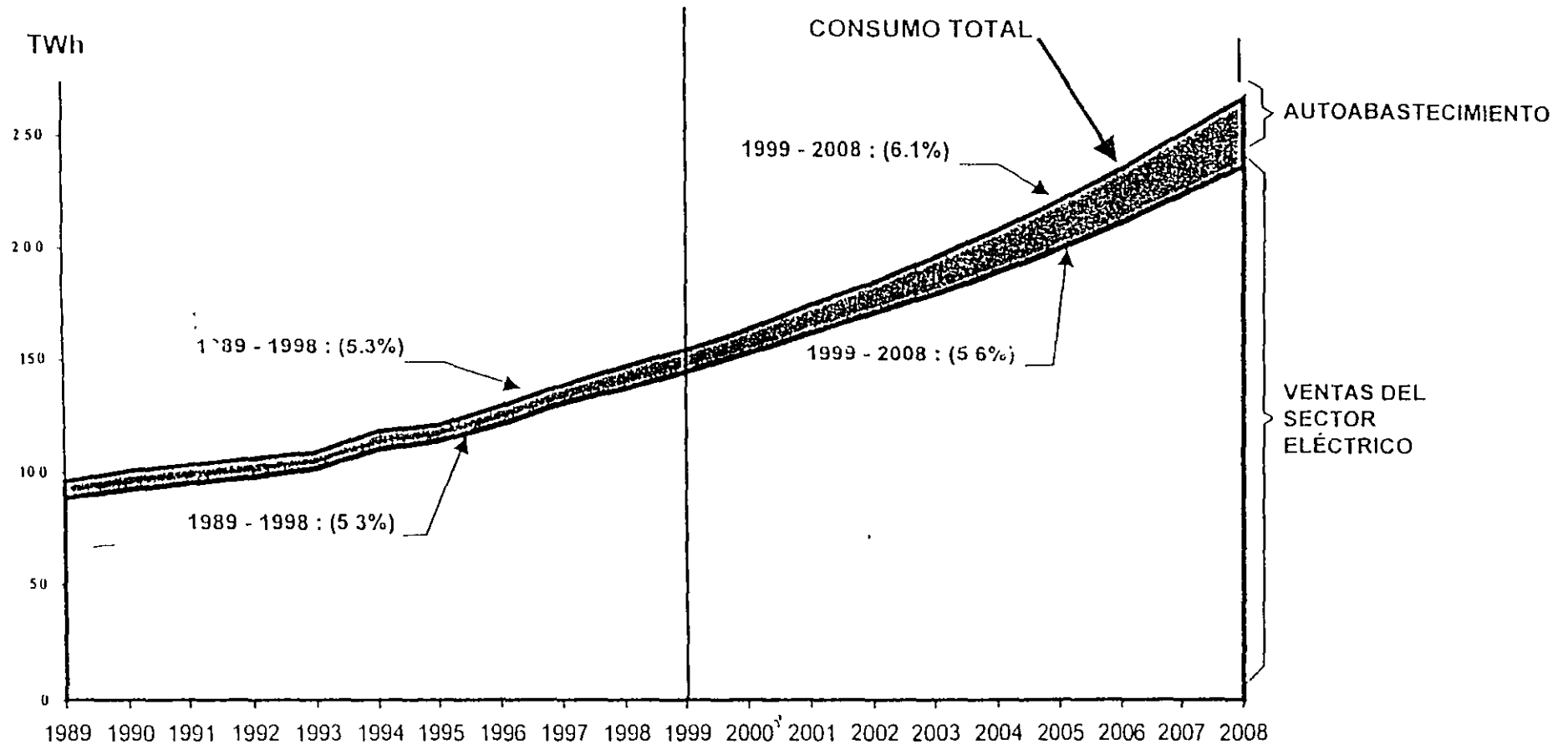
\* Incluye 871 MW de Luz y Fuerza del Centro

# PRINCIPALES CENTRALES GENERADORAS DE MÉXICO





# HISTORIA Y ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

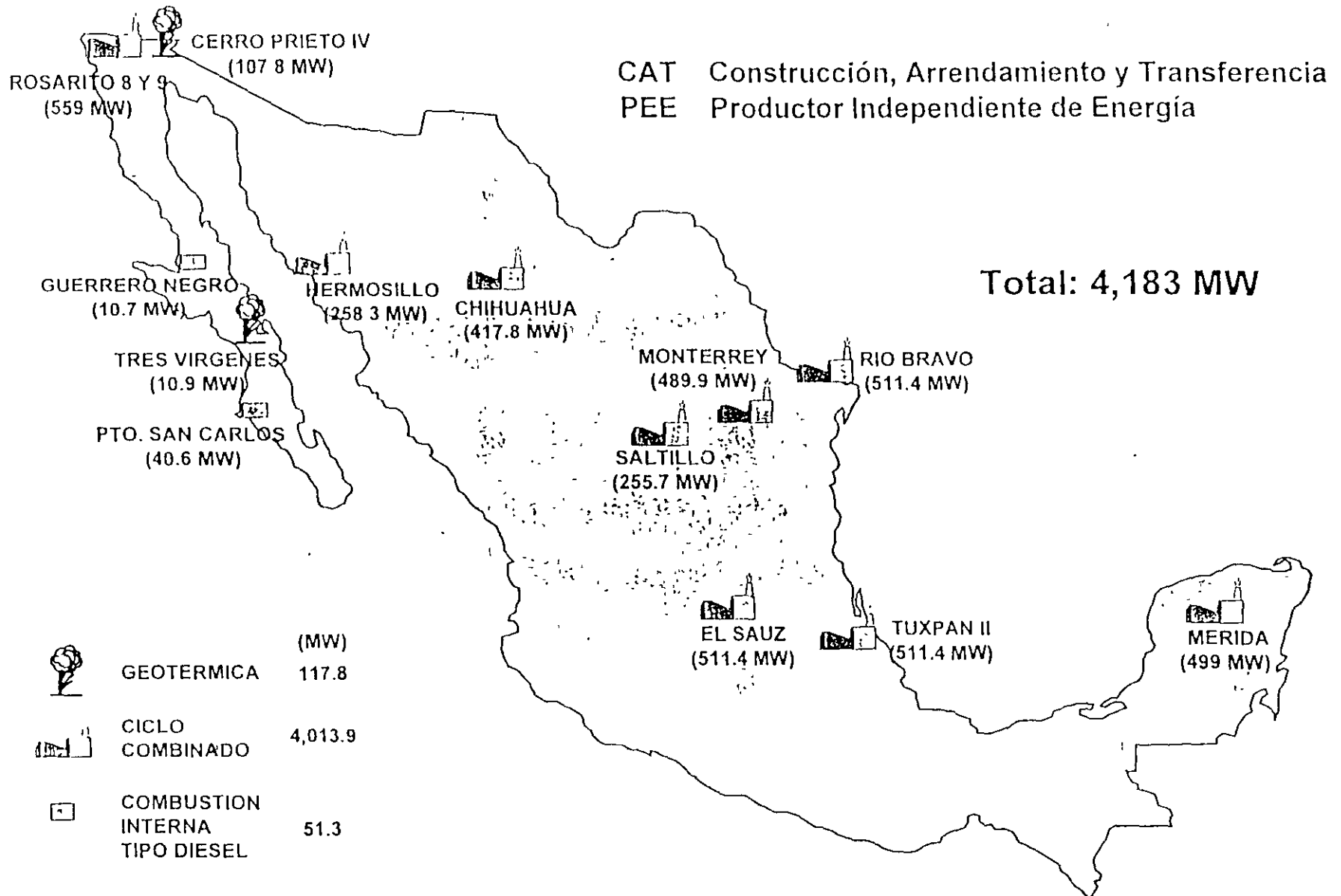


(Crecimiento anual promedio)

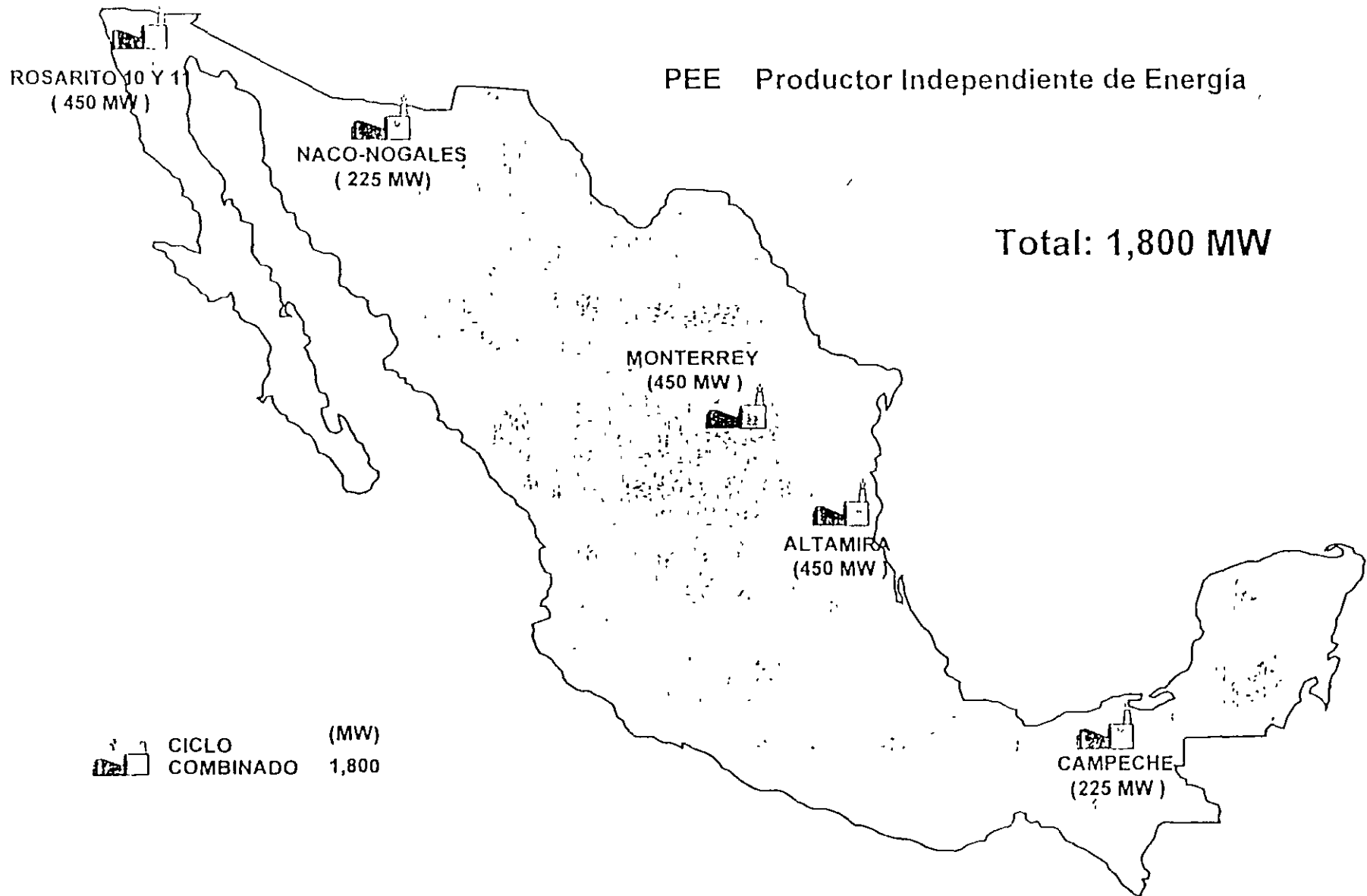
\* No incluye exportación



# UBICACIÓN DE CENTRALES EN PROCESO DE CONSTRUCCIÓN O ASIGNACIÓN



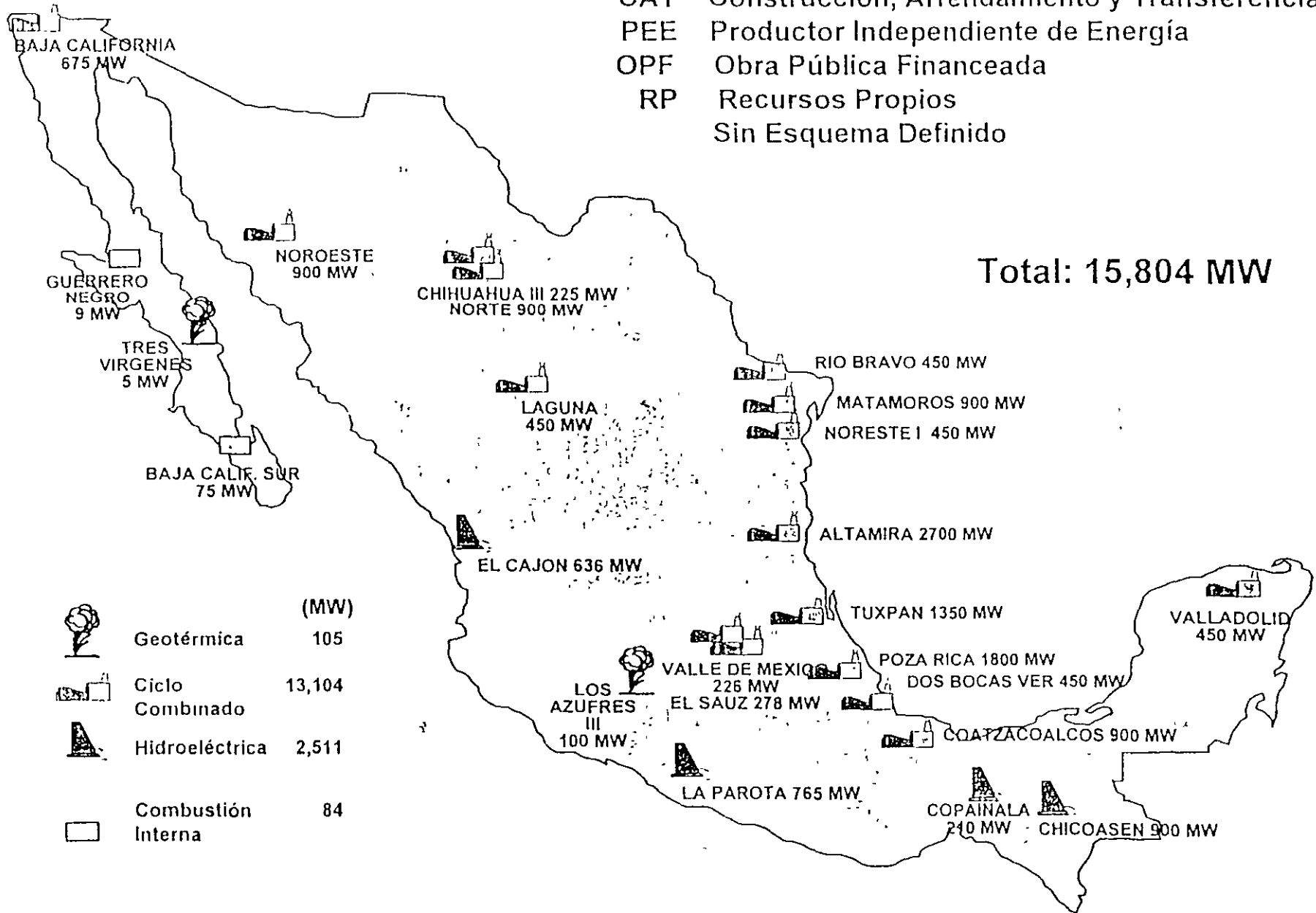
# UBICACIÓN DE CENTRALES EN PROCESO DE LICITACIÓN



# REQUERIMIENTOS DE CAPACIDAD ADICIONAL

- CAT Construcción, Arrendamiento y Transferencia
- PEE Productor Independiente de Energía
- OPF Obra Pública Financada
- RP Recursos Propios
- Sin Esquema Definido

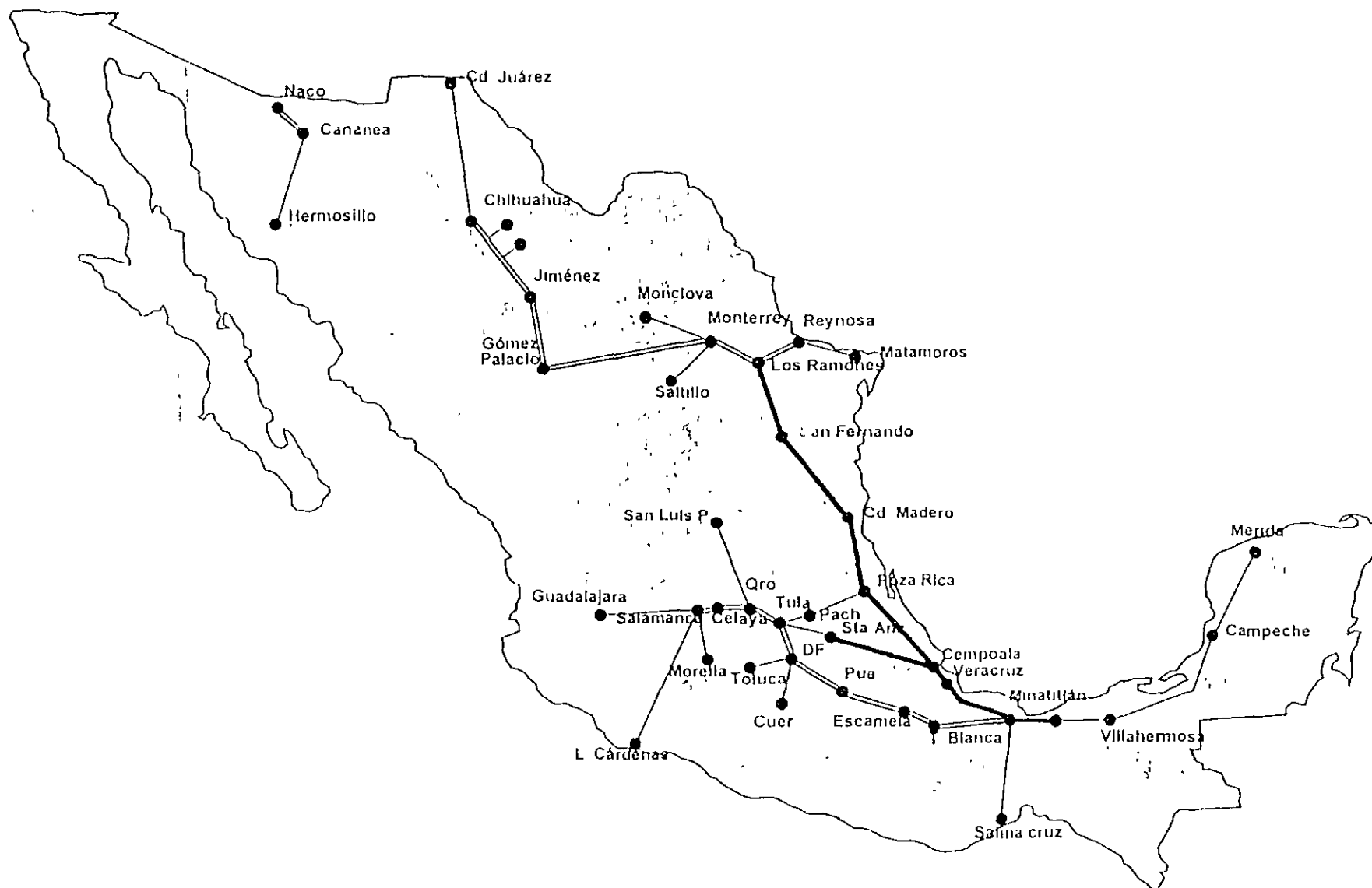
Total: 15,804 MW



## UNIDADES GENERADORAS EN PROCESO

	EN PROCESO DE CONSTRUCCIÓN Ó ASIGNACIÓN	EN PROCESO DE LICITACIÓN	CAPACIDAD ADICIONAL	TOTAL
CICLO COMBINADO	4,014	1,800	13,104	18,918
HIDROELÉCTRICA	0	0	2,511	2,511
GEOTÉRMICA	118	0	105	223
COMBUSTIÓN INTERNA	51	0	84	135
T O T A L	4,183	1,800	15,804	21,787

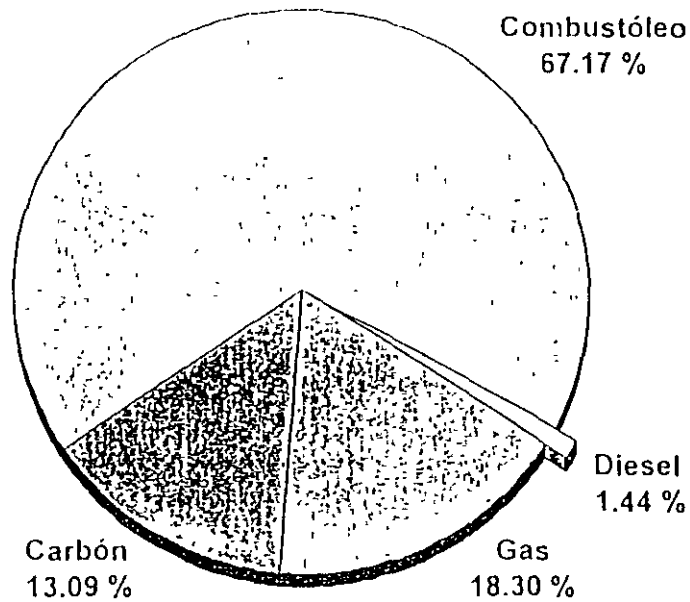
# RED ACTUAL DE GASODUCTOS



# CONSUMO DE COMBUSTIBLES FOSILES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Total en 1998 :  
3,686 TJ por día



Total en 2008 :  
5,865 TJ por día

