



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

# CURSOS INSTITUCIONALES

## DIPLOMADO EN REGULACIÓN Y OPERACION ENERGÉTICA

MOD. V EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE LOS  
RECURSOS ENERGÉTICOS

Del 26 de octubre al 14 de noviembre de 2001

## *APUNTES GENERALES*

Coordinador: Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez  
Secretaría de Energía

Octubre - Noviembre /2001

# MODULO V EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

## LOS SISTEMAS DE ENERGÍA

### 1. INTRODUCCIÓN

El rápido y continuo desarrollo en el consumo de energía, constituye una característica importante de todos los países desarrollados o en vías de desarrollo, ya que constituye la base para obtener una productividad elevada y valores superiores al potencial humano y de materiales; simultáneamente al aumento en el consumo, aparece el requerimiento del desarrollo de una capacidad de producción, transmisión y distribución de energía, lo cual complica la planeación, diseño, construcción, operación, mantenimiento, etc., para la utilización económica de los sistemas de energía

La problemática de los sistemas de energía (SE), es de naturaleza de funcionamiento (operación, conducción, explotación o producción) y de desarrollo; el papel de los especialistas, es de actividades decisionales, que se desenvuelven para optimizar la conducción del funcionamiento y del desarrollo, con relación a la problemática. Las actividades decisionales, implican la elección en forma sistemática, mediante principios y discernimiento, de la solución óptima entre dos o más soluciones.

En general, la complejidad de los problemas que deben resolverse, tiene mayores dificultades, cuando se elige la solución óptima con bases institutivas, no importando que tanta experiencia y preparación tenga el especialista; en éste caso, sólo el método científico es el que puede dar la solución correcta.

En congruencia con el desarrollo de los sistemas de energía, los problemas deben estar en manos de especialistas en proyecto y en operación, y éstos a su vez necesitan desarrollar y perfeccionar métodos y medios de cálculo. Simultáneamente con lo anterior, se requiere una buena organización y un sistema informático de calidad excelente, para garantizar la base de cualquier actividad decisional.

### 2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y FUNCIONALES DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.

Los sistemas eléctricos, representan la totalidad de la instalación, que incluye la producción, transmisión y distribución de energía eléctrica; la existencia de los sistemas eléctricos, supone la realización de conexiones en algunos forma, entre todos los elementos que la componen.

La creación de los sistemas eléctricos tiene un carácter histórico, imponiéndose como una necesidad, dentro de cierta etapa de desarrollo del proceso de producción, transmisión y distribución de energía eléctrica, cuando en cierto momento, en que el

funcionamiento aislado de la instalación, que aseguraba el desarrollo del proceso. no pudo ya justificarse desde el punto de vista técnico y económico. En la actualidad, prácticamente en todos los países desarrollados o en vías de desarrollo, se ha superado ya ésta etapa y la existencia de sistemas eléctricos está generalizada.

Las diferentes ventajas que representa la utilización de energía en la forma de electricidad, determinan el aumento permanente en la utilización de energía eléctrica, en el dominio de nuestras actividades; éstas ventajas, son principalmente las siguientes:

- Obtención de rendimientos elevados
- Libre de residuos
- Posibilidad de transportación a los usuarios
- División a cualquier escala
- Medición precisa
- Etc.

Este fenómeno, encuadrado en el proceso general de crecimiento continuo de consumo de energía, causado por el desarrollo industrial, de transporte, agrícola, consume doméstico, etc., determina la existencia de un ritmo elevado en el aumento del consumo de energía eléctrica; simultáneamente, el número y complejidad, tanto de las instalaciones servidas como los propios sistemas eléctricos, se vuelven más grande y complejos.

A diferencia de otros sectores económicos productivos, los sistemas eléctricos presentan ciertas particularidades específicas, que ocasionan la existencia de una problemática y metodología característica por resolver las principales particularidades de un sistema eléctrico, son las siguientes:

- El sistema se extiende a nivel nacional, representando una instalación única, que cubre las necesidades para todo el territorio.
- El producto (energía eléctrica), no puede almacenarse en cantidades prácticas útiles, por lo que, es necesario que en cada momento el consumo sea el correspondiente, para asegurar el suministro.
- La calidad del producto, debe mantenerse permanentemente elevada y con un alto grado de continuidad.
- La ampliación de los sistemas, implica esfuerzos económicos muy fuertes, del orden del 10 al 15% del esfuerzo nacional destinado a la industria.
- La magnitud y valores grandes de las ampliaciones, que deben efectuarse permanentemente, imponen una política de larga perspectiva en la planeación y proyecto de las instalaciones, con mucho adelanto en relación al momento de realizar los objetivos.
- Una modificación en el régimen de funcionamiento, en una zona del sistema eléctrico, se transmite con mucha velocidad y se siente en múltiples puntos o puede sentirse en todos los puntos del sistema.
- La carga del sistema de suministro de energía eléctrica a los consumidores, no puede compartirse con otros sectores económicos.

- Averías en un componente del sistema, pueden provocar pérdidas materiales importantes en otras ramas de la economía
- A diferencia de otros sectores, en donde una ampliación determina solo un eventual aumento cuantitativo, en los sistemas eléctricos, una ampliación genera también problemas cualitativos, que requieren solución

Estas particularidades, con un elevado grado de complejidad y de interacción con todas las ramas económicas nacionales, determinan que el problema de funcionamiento, proyecto y conducción de los sistemas eléctricos, sea extremadamente complejo y afecta a otras ramas de la economía.

### 3. ESPECTRO TECNOLÓGICO DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

La estructura tecnológica de los sistemas eléctricos, es la que se muestra en la Fig. 70, en donde puede observarse que está constituida por las áreas principales siguientes:

- Generación producción
- Transmisión
- Distribución

Cada uno de los elementos componentes de éstas tres áreas, desde el momento de su previsión hasta que se sustituye o se da de baja, recorre lo que se ha denominado con la Fig. 70 mencionada, el ciclo de producción, que incluye las etapas siguientes:

- Factibilidad
- Planeación
- Ingeniería y diseño
- Fabricación y/o abastecimientos
- Construcción y montaje
- Pruebas y puesta en servicio
- Operación
- Mantenimiento
- Sustitución o eliminación

Puede considerarse que, las primeras seis partes del ciclo de producción, hasta las pruebas y puesta en servicio, es lo que constituye un proyecto.

Adicionalmente, a cada una de las etapas anteriores, se aplica el proceso administrativo o de gestión, que incluye las funciones siguientes:

- Planeación
- Organización
- Integración
- Dirección
- Control

Del análisis de las áreas, etapas y funciones anteriores, puede comprenderse la complejidad y magnitud de los sistemas eléctricos.

Para cada una de las etapas del ciclo de producción, en cada una de las áreas existen especialistas, que además, en algunos casos como diseño y mantenimiento, están divididos en diferentes disciplinas como: mecánica, eléctrica, instrumentación y control, civil, química, etc.

En la etapa de planeación, se hace un análisis de todo el recorrido del proyecto y es donde se decide la realización del elemento del sistema eléctrico

La etapa de operación, es la más importante del ciclo y en general, es la que tiene mayor duración; de hecho, su existencia constituye al haber alcanzado la realización de objetivo.

El tiempo de duración de cada una de las etapas del ciclo, es función de la naturaleza del objetivo analizado; así, por ejemplo, para una planta eléctrica, la duración de cada etapa puede ser del orden de años o decenas de años, en cambio, para elementos simples del sistema, las etapas pueden ser más cortas.

Las actividades decisionales, muestran la actitud activa de parte del elemento humano, para resolver los problemas presentes o futuros, ligados al funcionamiento de los sistemas eléctricos. De las múltiples actividades comprendidas en esta categoría, unas se desarrollan en un período de tiempo mayor y otras deben resolverse en un tiempo muy corto.

En general, las actividades decisionales ligadas a los procesos de planeación y proyecto, se desarrollan en un tiempo más largo y las de procesos de operación y utilización, se desarrollan en un tiempo más corto. Así mismo, es de hacerse notar que, los ingenieros de operación o explotación, están sujetos a presiones nerviosas de duración más corta, estando obligados a adoptar decisiones de carácter operativo, que usualmente se refieren a un número limitado de problemas, por otra parte, los ingenieros de proyectos, que aparentemente disponen de un tiempo para tomar decisiones, estas se refieren a un campo más amplio de problemas.

El desarrollo de los sistemas eléctricos, se basa en complejos estudios de planeación, que contienen la principal problemática que requiere resolverse para realizar el sistema; los principales estudios son los siguientes, entre los que existe una estrecha interdependencia:

- Pronóstico de consumo de potencia y energía
- Estabilidad de la planta eléctrica
- Estabilidad del sistema de transmisión
- Estabilidad de la red de distribución.

El objetivo técnico de la planeación del desarrollo de los sistemas eléctricos, es el de prever las necesidades futuras, que aseguren la calidad correspondiente al suministro, con un costo mínimo y sin que afecte el buen funcionamiento de la instalación existente; la calidad de la energía eléctrica, comprende factores siguientes principalmente:

- Continuidad en el suministro
- Mantenimiento constante del voltaje o tensión nominal
- Mantenimiento constante de la frecuencia nominal
- Contenido mínimo de armónicas.

Con objeto de asegurar la calidad de la energía eléctrica, se proveen en el sistema reservas de potencia, con relación a la potencia o demanda "pico" (máxima), en la instalación proyectada: en general, éstas reservas tienen el siguiente valor (con relación a la demanda máxima):

- 10 a 20 % en instalaciones de producción de energía eléctrica
- 40 a 400% en redes de transmisión
- 30 a 100% en instalaciones de distribución o bien instalaciones, que permitan mantener la tensión en los límites normales, como "escalones" (taps) de transformadores, compensadores de potencia reactiva (y capacitativa), condensadores serie, etc.

Para establecer la solución óptima, de los diversos componentes de los sistemas eléctricos, es necesario tomar en cuenta el desarrollo futuro del consumo, por lo que, se tiene una primera etapa con el periodo mas largo de tiempo, para una visión general, y la solución definitiva en un periodo más corto, que solo es algo más largo que el periodo de realización efectiva del objetivo. En general, éstos periodos para las tres áreas, son los que a continuación se indican:

Instalaciones de producción o generación:

- 7 a 30 años, estudios de tipificación de la instalación.
- 7 a 20 años, estudios generales
- 4 a 7 años, estudios en detalle.

Instalaciones de transmisión:

- 7 a 20 años, estudios de tipificación de la instalación
- 6 a 10 años, estudios generales
- 3 a 6 años, estudios en detalle.

## Instalaciones de distribución

- 5 a 15 años, estudios de tipificación de la instalación
- 3 a 6 años, estudios generales
- 2 a 4 años, estudio en detalle.

En el marco de actividades decisionales, se funciona con factores medibles como son costos, parámetros de la instalación, etc, y con factores no-medibles como son las consideraciones sociales, políticas, etc.

Para los factores medibles, en las actividades de optimización, se toma un modelo matemático que describa las relaciones entre variables, las restricciones impuestas por las actividades económicas respectivas, los objetivos de las actividades, etc.

En la resolución del modelo matemático, con el enfoque de obtener la solución óptima, se puede utilizar el método directo o el indirecto.

En el método directo, se incluye la investigación manual, investigación detallada, programación lineal, programación dinámica, programación cuadrática, etc; en este método, la solución óptima se obtiene recorriendo múltiples variantes o múltiples pasos. Al principio, se elige un conjunto inicial de variables independientes, que satisfacen el modelo matemático, calculándose los valores de la función objetivo; enseguida, se deduce un nuevo conjunto anterior, dentro de una metodología bien determinada y se obtiene un nuevo valor de la función objetivo. Se continúa el paso anterior, hasta obtener el valor extremo de la función objetivo.

En el método indirecto, la optimización se obtiene por diferenciación de la función objetivo, con relación a la variable independiente y determinación de las condiciones extremas.

La solución a problemas decisionales es de la mayor importancia, debido a que involucra grandes sumas de dinero y frecuentemente a factores sociales y de otra naturaleza, que no pueden expresarse en términos económicos; por lo anterior, el problema de la decisión óptima, no debe reducirse solamente a obtener lo máximo matemáticamente, que es lo más importante de la problemática y que después se corrige, tomando en cuenta también a los factores no-medibles.

Normalmente no puede asegurarse el empleo de un método determinado, si no que éste depende del tipo de problemas.

## 4. EL PRONOSTICO DE CONSUMOS

El cálculo de consumo de energía y potencia, representa el primer problema que debe resolverse en el marco de una actividad decisiva, con objetivos en el futuro; el suministro de datos cuantitativos y cualitativos sobre el consumo, asegura la información, para obtener los objetivos energéticos.

El pronóstico, representa una actividad científica, que incluye análisis, cálculos, interpretaciones, etc. en tal forma que al final los datos de consumo estimado, están de acuerdo con los datos de consumo efectivamente realizado.

En el marco de actividades de sistemas de energía, el resultado de los pronósticos, se utiliza para resolver un número grande de problemas de carácter decisional. Así, en función de la duración en el futuro, donde el pronóstico suministra datos y para cierto dominio más importante, donde es necesario que se utilice, los pronósticos pueden clasificarse de las siguientes forma.

a) Previsión operativa, con enfoque de hora, día semana o mes de período futuro y que se utiliza para:

- Conducir y dirigirse el régimen operativos y configuración de la red de transmisión y distribución existente.
- Establecer el momento más adecuado, de entrada y salida de funcionamiento de una instalación
- Determinar el "pico" de carga, en el mes o año próximo, etc.

b) Pronósticos para períodos futuros de 2 a 3 años, que se utilizan para tomar decisiones definitivas de inversión o de carácter funcional, como puede ser:

- Apreciación de las modificaciones necesarias en la red o sistema, en el periodo inmediato siguiente.
- Establecer el régimen óptimo de carga, en las plantas existentes.
- Programación definida, para asegurar los recursos energéticos primarios, para la etapa inmediata siguiente, etc.

c) Pronósticos para periodo de 5 a 10 años, que se utilizan para adoptar decisiones, referidas a inversiones más importantes del sistema, como pueden ser:

- Construcción de nuevas plantas
- Elección de la arquitectura óptima y nivel óptimo de la tensión o voltaje de la red.
- Escalonamiento óptimo de las inversiones, etc.

d) Pronósticos para períodos de 10 a 30 años, que se utilizan para:

- Establecer políticas generales
- Conceptos generales de desarrollo futuro del sistema a largo plazo
- Ofrecer una imagen a largo plazo, de orientación para actividades decisionales, que cubran período mas cortos.

Una planeación racional y correcta, debe ser precedida de un pronóstico correcto.



Las actividades de pronósticos, ofrecen datos sobre consumos futuros. para períodos cortos o largos. pero no todos éstos datos pueden constituir una base segura. que permita tomar una decisión de realización correcta para un objetivo. La práctica, muestra que los valores calculados de pronósticos, concuerdan bien con la realidad y pueden ser una base segura, para adoptar decisiones de realizaciones efectivas. para lograr objetivos, para periodos en avance de 5 a 7 años; mas allá de este periodo. las estimaciones de consumos futuros no pueden utilizarse con certeza

Aunque los pronósticos pueden cubrir periodos más largos de 5 a 7 años. Los datos de después de este periodo no son confiables, pero su conocimiento es necesario, para orientar la planeación en la dirección correcta.

En virtud de que los pronósticos no ofrecen datos totalmente exactos, existe cierta resistencia a usarlos, aunque ésta resistencia no se justifica del todo, debido a que las decisiones para el futuro, no deben tomarse sin un conocimiento de necesidades, y los pronósticos, son los medios que pueden ofrecer los datos más probables de consumo, por la vía científica.

## **5. CLASIFICACIÓN DE ACTIVIDADES DE PRONÓSTICOS**

Existen numerosos criterio de clasificación de métodos y conceptos. adoptados en el marco de actividades de pronósticos; algunos de éstos criterios, se dan a continuación en forma ilustrativa:

a. Desde el punto de vista del período cubierto en el futuro, las actividades de pronósticos; se clasifican en:

- Corto período, 1 a 3 años
- Mediano período, 5 a 10 años
- Largo período, 10 a 30 años

La elección del periodo para el que se efectúa el pronóstico. es función de la naturaleza del objetivo para el que se va a utilizar los datos, como se indicó en la Sección 4 anterior.

b. Desde el punto de vista de la extensión de los consumidores analizados, la clasificación puede ser por:

- Consumidores individuales
- Consumidores comprendidos dentro de una zona
- Consumidores comprendidos en todo el territorio

La extensión de la zona geográfica, para la que se efectúa el pronóstico, es función de la extensión del objetivo que se pretende realizar y la influencia de las zonas vecinales, sobre el objetivo respectivo.

c. Desde el punto de vista del número de componentes de consumos considerados, la clasificación puede ser por:

- Método analítico, que se basa en el pronóstico de componentes de consumo y mediante sumas, se obtiene el pronóstico de consumo total.
- Método sintético o global, que se basa en el pronóstico de consumo total.

Esta diferenciación, es posible solo cuando existen datos, tanto del consumo total, como de los componentes de consumo.

d. Desde el punto de vista de la naturaleza de la variable independiente del modelo matemático, la clasificación puede ser por:

- Método directo o endógeno, en que el valor del consumo se expresa directamente, en función de la variable independiente tiempo ( $W = f(t)$ )
- Método indirecto o exógeno, en que el valor del consumo, se expresa en función de ciertos indicadores económicos o de otra naturaleza, como son el nivel industrial, productividad, cantidad de población, etc, los que a su vez se expresan por relación conocida o pronóstico, en función del tiempo ( $W = f(t)$ ,  $I = f(t)$ ).

La elección de un método u otro, es función en primer lugar, del período para el que se efectúa el pronóstico. Para períodos de menos de un año, es suficientemente el método directo; para períodos entre 1 y 5 años, se necesita tanto el método directo como el indirecto, y para períodos de más de 5 años, el método indirecto da resultados satisfactorios.

e. En función de la naturaleza del método matemático usado, la clasificación del pronóstico puede ser por:

- Método determinístico, en que el valor del consumo está bien determinado, en función de los valores dados a la variable independiente
- Método probabilístico, en que el valor del consumo se coloca como una cierta probabilidad, dentro de una banda de consumos, para un cierto valor de la variable independiente.

El método probabilística, cubre mas campo que el método determinístico; el método probabilístico, añade al pronóstico una nueva dimensión: la probabilidad, y ofrece al ingeniero una mayor seguridad, sobre la validación del resultado. En el método determinístico, se tiene la seguridad de que el consumo real, no va a ser igual al valor

fijado por el pronóstico, mientras que en el método probabilístico, se tiene la seguridad de que el valor del consumo va a quedar dentro de una gama de pronósticos. el método probabilístico, permite elegir el ancho del intervalo, en función de la exactitud deseada en el resultado.

Es de hacerse notar que, no puede darse una recomendación única del método y conceptos, que deben utilizarse en los diversos casos. La longitud del período de pronóstico, y las dimensiones y número de componentes del consumo, para el que se efectúa el pronóstico, determinan el método a usar, que se elija en función del caso concreto que debe resolverse, teniendo en cuenta la precisión acordada; en ocasiones, es recomendable iniciar en el paralelo varios métodos, para poder elegir el óptimo

Para determinar el consumo futuro, la mayoría de los métodos de pronóstico, utilizan datos de consumos o de otros indicadores, de períodos pasados; la serie cronológica de valores realizados en el pasado, de consumo de energía eléctrica, potencia eléctrica o de otro indicador económico, se llama crónica económica.

Si se designa como  $W$ , al consumo anual de energía eléctrica de un consumidor, la crónica económica de valores pasados registrados, entre el año inicial 1 y el año  $t$  cuando se efectúa el pronóstico, se presenta bajo la forma:

$$W_1, W_2, \dots, W_t$$

Calculando el pronóstico, se obtiene una serie de valores para el periodo futuro, de longitud 8, bajo la forma:

$$W_{t+1}, W_{t+2}, \dots, W_{t+8}$$

Normalmente, entre el valor efectivo real de consumo anual de energía eléctrica y el valor estimado del pronóstico, puede existir una diferencia; si se utiliza el método probabilístico para el resultado del pronóstico, simultáneamente con el valor medio más probable estimado, se indica una banda dentro de la cual va a quedar el resultado, con una cierta probabilidad. Se puede afirmar que, en el marco de una cierta probabilidad, el valor efectivo real de consumo en el futuro, va a satisfacer la relación:

$$W_{t+i} - \Delta w_{(t-i)-}, W_{t+i} - \Delta w_{(t-i)-}, W_{t+i} + \Delta w_{(t+i)+}, W_{t+i} + \Delta w_{(t+i)+}$$

En donde  $\Delta w$ , representa el ancho superior e inferior de la banda determinada, con una cierta probabilidad.

## 6. ETAPAS DE UN ESTUDIO DE PRONOSTICO

Las actividades de pronóstico, representan actividades complejas, que requieren de las tres etapas principales siguientes:

- Colección, selección y elaboración de información, referida al período pasado de consumo o de un indicador correlacionado con el consumo
- Establecimiento de un modelo matemático conveniente, para el desarrollo del consumo
- Análisis y elaboración de resultados.

A continuación, se hará una breve descripción de éstas etapas.

### a. COLECCIÓN, SELECCIÓN Y ELABORACIÓN DE DATOS INICIALES.

Las actividades de pronóstico, se inician definiendo y recolectando un volumen importante de datos, referidos al período pasado de consumo de energía o potencia eléctrica o de otros factores correlacionados con éstos.

Los datos utilizados, pueden ser de muy diversa naturaleza, como por ejemplo:

- Naturaleza de la información existente
- Finalidad u objetivo del pronóstico
- Período para el que se efectúa el pronóstico
- Experiencia obtenida en la aplicación de diferentes métodos de pronósticos.

En función de su naturaleza, los datos iniciales utilizados para el pronóstico, pueden ser:

- Obtenidos por mediciones efectuadas en el pasado
- Obtenidos en base a la intuición. En éste caso, es necesario aplicar una investigación técnico-científica, para apreciar las modificaciones al consumo.

Cada una de éstas categorías de datos, pueden ser:

- Datos de proceso en estudio
- Datos de un proceso semejante;

Y que puede tener la forma de:

- Datos directos, es decir, datos del pasado, precisamente de consumo de energía eléctrica (crónica endógena)
- Datos indirectos, es decir, datos del pasado, referidos a indicadores correlacionados con el consumo de energía eléctrica (crónica exógena).

Es conveniente aclarar que, no existe un método simple, dato sencillo o de naturaleza simple predeterminado, que asegure certidumbre sobre la tendencia del desarrollo posterior, por lo que, es necesario que se utilice en paralelo, datos de diversos tipos y después confrontar y elaborar los resultados.

Antes del cálculo del pronóstico, se debe seleccionar y elaborar la relación de datos necesarios; ésta operación, tiene el papel de preseleccionar los datos, para que en la etapa siguiente, no se utilicen datos que puedan introducir errores o que se requiera repetir el cálculo del pronóstico.

Dentro de la operación anterior, se eliminan datos que representen puntos singulares en la tendencia de modificación del consumo y que probablemente representen datos especiales registrados o casos no significativos.

Para poder definir el modelo matemático en forma correcta, es necesario que se disponga de datos en cantidad suficiente; en éste sentido, es necesario que se utilice datos de un período pasado, aproximadamente igual a la longitud del siguiente período, para el que se efectúa el pronóstico.

Durante ésta etapa, es de mucha utilidad la representación gráfica de la crónica pasada; aún con la sola observación de la gráfica de la crónica, se puede obtener cierta información sobre el desarrollo del consumo, como:

- Si existe o no-relación entre variables (consumo de energía eléctrica y tiempo, consumo y producción, etc)
- Si la relación anterior es simple o compleja
- Que curva es conveniente que se use en el modelo de desarrollo del consumo, si es indicado que se pruebe un modelo bajo la forma de recta, curva de crecimiento continuo, curva con saturación, etc
- En que medida, los puntos medidos se aproximan a la curva media imaginaria, lo que indica la dispersión de datos; lo anterior, va a señalar el grado de correlación o de liga entre las dos variables.

Al final de ésta etapa, se dispone de múltiples series de datos, que se consideren correctos; así mismo, se va a formar ya una imagen preliminar, orientativa sobre la forma que debe tener el primer modelo matemático y el cual será la variable independiente más adecuada.

## **b. MODELO MATEMÁTICO PARA LA CURVA DE TENDENCIA**

En el marco de ésta etapa, se elige la curva de mejor tendencia, cuyo modelo se ajuste mejor al período pasado y su tendencia. En general, la crónica económica de consumo de energía en función del tiempo, contiene 4 componentes principales.

- Componente media o de tendencia (T)
- Componente cíclica (C)
- Componente estacional (S)
- Componente aleatoria (A)

La componente media  $T$ , representa la componente principal, que ilustra la tendencia constante de modificación del consumo: ésta, está determinada por las causas esenciales, con efecto continuo sobre el consumo, como: aumento de población, consumo per cápita, grado de industrialización, etc. En el caso de procesos ligados a fenómenos demográficos, muchas veces esta componente está afectada exponencialmente.

La componente cíclica  $C$ , tiene la forma de una senoide o sobre posición de múltiples senoides, con período mayor de un año; ésta, es causa por factores fluctuantes de acción lenta, como puede ser el balance de demanda y oferta.

La componente estacional  $S$ , es causada por modificaciones en el consumo, en diversos períodos del año calendario, por causa de cambios en las condiciones del clima, intensidad de actividades industriales, agrícola, administrativas, etc; ésta componente, tiene una forma aproximadamente idéntica todos los años.

La componente aleatoria  $A$ , llamada de perturbaciones fortuitas, es causa por fenómenos aleatorios, que no entran en ninguna de las categorías anteriores.

En un tiempo dado  $t$ , el valor del consumo  $w$ , puede ser expresado por la relación:

$$W_t = T_t + C_t + S_t + A_t$$

O bien por

$$W_t = T_t^1 \cdot C_t^1 \cdot S_t^1 \cdot A_t^1$$

que por logaritmos puede reducirse a la primera expresión

En general, en el cálculo práctico, no se acostumbra introducir todas las componentes en la curva de tendencia; en el caso de consumo de energía eléctrica o potencia de "pico", la componente cíclica no tiene una ponderación esencial, aunque para pronósticos de menos de un año, debe tomarse en consideración. Para actividades decisionales futuras, con períodos mayores de un año, las componentes cíclicas y estacional no deben tomarse en consideración.

Para la curva de tendencia de consumo de energía eléctrica, de potencia eléctrica o de otros indicadores económicos, se utilizan curvas continuas, que principalmente se dividen en curvas de crecimiento continuo y curvas con límite, las cuales se presentan a continuación, con una breve descripción sobre su utilización.

Curvas de crecimiento continuo.

- Recta, con ecuación:  $Y = A + Bx$
- Parábola, con ecuación:  $Y = A + Bx + Cx^2$
- Cúbica, con ecuación;  $Y = A + Bx + Cx + Dx^3$
- Polinómica, con ecuación:  $Y = A + Bx + Cx^2 + \dots + Nx^n$
- Exponencial, con ecuación;  $Y = e^{(A+Bx)}$  ó bien:  $Y = Ae$

Estas curvas, son adecuadas para el caso en que la variable dependiente crece más rápido que la variable independiente, como es el caso del consumo anual por rama de energía eléctrica, valores anuales "pico" de potencia, etc. Dentro de ésta categoría, tiene una larga difusión las exponenciales, adecuadas en especial a los procesos ligados a los fenómenos demográficos.

Curvas con crecimiento limitado.

- Curva con potencia, con ecuación:  $Y = Ax^b$
- Curva exponencial modificada, con ecuación  $Y = A - Be^{cx}$
- Curva logística, con ecuación:  $Y = 1/(A + Be^{cx})$
- Curva combinada, con ecuación:  $Y = A + Bx + Ce^{Dx}$

Estas curvas, presentan en general, en el inicio una parte de tendencia de crecimiento continuo y después, sigue una porción de saturación de crecimiento mas lento; éstas curvas, son adecuadas para consumo de energía eléctrica en periodos largos de tiempo o para la dinámica de ciertos indicadores económicos, como puede ser el consumo específico de energía, etc.

Con relación a la curva de tendencia y a la determinación de las constantes características, son muy útiles las siguientes consideraciones.

- Es conveniente que se inicie la obtención del pronóstico, utilizando múltiples tipos de curvas para la tendencia, porque no se puede contar a priori, con la elección óptima del tipo de curva, solo por el juicio humano. Todos los datos de las múltiples series de resultados, permiten que se efectúe un análisis mas profundo, de los resultados que ofrecen mayor seguridad, sobre el resultado correcto.
- Es recomendable que se elija la curva más simple, aunque no demasiado simple que desnaturalice el fenómeno; una curva complicada, de grado elevado o con términos en logaritmos, crea dificultades en la determinación de las constantes de la curva y además, no es seguro que ésta curva modele correctamente la tendencia.
- Es recomendable se sigan los resultados obtenidos de experiencias pasadas, porque para ciertos tipos de consumidores, la curva de tendencia los contiene.
- En caso de que se utilicen datos indirectos para el pronóstico, es posible que se introduzcan múltiples variables independientes en la curva de tendencia; éste modelo, no dá buena precisión a en los resultados, por introducir mayor complicación en la determinación de las constantes.
- La función del modelo de tendencia, no debe ser estrictamente solo en base a la gráfica de desarrollo pasado, si no que es necesario, que se analicen cuantitativamente factores técnicos y económicos, que determinen la modificación de tendencia del consumo. En éste sentido, la apreciación humana, en la elección de la mejor curva de tendencia, es esencial.
- Es conveniente que se efectúe un tanteo preliminar, antes de decidir el tipo de curva a adoptar.

- Finalmente, se tiene idea que para el consumo global de energía eléctrica o potencia de "pico", la tendencia actual es de crecimiento continuo y ésta tendencia, se va a conservar por muchos años, por lo que, es recomendable que para éste consumo, se elija la tendencia de un modelo matemático de crecimiento continuo.

Dentro del juicio y la institución humano, está la decisión del tipo de curva de tendencia, que mejor modele el desenvolvimiento pasado y futuro, seguida de la determinación de los valores de las constantes, en la expresión matemática de la curva del modelo y cuantitativamente, la mejor crónica económica. En éste contexto, se efectúan ajustes a la curva, utilizando normalmente el método de mínimos cuadrados; en el caso de curvas mas complicadas, antes de la aplicación del método de mínimos cuadrados, se lleva a la curva a la forma de una receta, usualmente por transformaciones matemáticas.

Una vez determinadas las constantes de la curva de tendencia, el modelo matemático está completamente definido y puede ser utilizado, para prever el desarrollo del consumo o de otros indicadores económicos.

### **c. ANÁLISIS Y ELABORACIÓN DE RESULTADOS**

Como resultado del recorrido de la etapa anterior, se obtiene una o múltiples curvas, para la modelación dinámica del consumo o de otro indicador económico; para la utilización correcta de éste resultado, es necesario que se analicen, elaboren y separen correctamente las variantes. Dentro de éste marco, se puede utilizar el método siguiente

- Verificar los valores indicados en el modelo de pronóstico, en cada punto para el que son conocidos los valores.
- Confrontar los valores estimados del modelo de pronóstico, con datos estimados por otro método o por otra fuente de información.
- Comparar los resultados obtenidos, con múltiples métodos de pronóstico; si estos son consistentes, es una buena indicación que los resultados son de buena calidad.
- Utilizar el modelo probabilística para el pronóstico y analizar los valores índices de calidad de la curva, como puede ser por ejemplo, el coeficiente de correlación.

Al final de ésta etapa, es necesario que se indique en forma tabular o gráfica, los valores pronosticados de consumo, calidad de resultados, intervalo de confianza de resultados, etc, la forma en que, con los datos del pronóstico, se pueden adoptar decisiones con pleno conocimiento de causa, considerando el punto de vista de que, en el dominio de pronósticos de consumo de energía eléctrica, es más perjudicial subestimar un valor que sobre estimarlo.

Así mismo es necesario tomar en cuenta que, en una política racional y correcta, debe ser una práctica, la reanudación del pronóstico total, cada 2 ó 3 años y en especial, antes de tomar una decisión de inversión inmediata, para la que se debe tomar en cuenta las últimas modificaciones, en el desarrollo real del consumo.



## 7. ACTIVIDADES QUE UTILIZAN LA INFORMACIÓN DE PRONÓSTICOS

A continuación, se presentan algunas actividades que utilizan la información de los pronósticos, para optimizar las decisiones.

### A. REPARTICIÓN DE LA INVERSIÓN ENTRE DIVERSOS TIPOS DE CENTRALES O PLANTAS

La planeación de la inversión en centrales de un sistema eléctrico, debe hacerse en tal forma que, se haga con el mínimo gasto y al mismo tiempo, que se cumpla con un cierto objetivo, de naturaleza técnica y económica; dentro de los modelos posibles, debe elegirse uno que cumpla con los siguientes objetivos.

- La potencia total disponible, de todas las centrales construidas, debe ser cuando menos, igual a la potencia media horaria requerida, en tiempo de horas de trabajo en verano (o invierno.)
- La energía anual por la que se construye ésta central, teniendo en cuenta el paro planeado para revisión y reparación mayor, debe ser mayor o cuando menos igual, con la energía eléctrica anual consumida.
- La inversión en la construcción de nuevas centrales, no debe sobrepasar un cierto valor tope.

Estas consideraciones, son para todos los tipos de centrales eléctricas, con la hipótesis de que, todas las instalaciones de éste tipo son idénticas, entendiéndose por instalación, un tipo de central, con características determinadas de cierta unidad.

### B. DETERMINACIÓN DE LA RESERVA OPTIMA DE POTENCIA

El valor de seguridad de funcionamiento es un unívoco, determinado del valor de reserva de potencia. Se entiende como seguridad, a la probabilidad de que un sistema cumpla su función, dentro de un intervalo de tiempo determinado. En el caso de los sistemas eléctricos, por seguridad se entiende a la probabilidad de salida de funcionamiento de una potencia, igual a la potencia de reserva, es decir, una medida de la confiabilidad del sistema eléctrico.

En un sistema formado por unidades idénticas, en donde conforma la reserva de potencia, el valor de seguridad es igual a la suma de  $m-1$ , término desarrollado del binomio:

$$(p + q)^n = 1$$

en donde:

$p$  = probabilidad de avería de una unidad

$q$  =  $1 - p$  = probabilidad de funcionamiento sin avería de una unidad

Así, por ejemplo, para un sistema de cinco unidades idénticas teniendo  $p=0.1$  y  $q=0.9$ , la probabilidad correspondiente de todos los eventos posibles, se ubica en la suma:

$$(p + q)^5 = q^5 + 5 q^4 p + 10 p^3 q^2 + 10 q^2 p^3 + 5 q p^4 + p^5$$
$$= 0.59049 + 0.32805 + 0.07290 + 0.00810 + 0.00045 + 0.00001$$

en donde:

$q^5$ = Valor de la probabilidad de que, las cinco unidades estén en funcionamiento simultáneamente.

$5q^4p$ = valor de la probabilidad de que, cuatro unidades estén en funcionamiento simultáneamente y una unidad averiada

Etc, etc...

Si la carga del sistema, es igual a la potencia de tres unidades, la reserva de potencia es igual a la de dos unidades, es decir,  $m = 2$ , y el valor de seguridad del sistema es:

$$q^5 + 5 q^4 p + 10 q^3 p^2 = 0.99144$$

Para un valor de potencia de unidad dado y un determinado valor de seguridad del sistema, el valor absoluto de la reserva de potencia, crece con el número de unidades del sistema y el valor relativo de la reserva de potencia disminuya con éste número: en la Fig. 71, se muestra ésta variación para un sistema formado por unidades idénticas, con el valor de la probabilidad de funcionamiento de una unidad sin avería de 0.93 y al valor de seguridad del sistema de 0.97.

Con el aumento del valor de seguridad, el valor de la reserva de potencia también aumenta y a la inversa con la disminución. Las implicaciones económicas de una reserva de potencia dada, están representadas por daños debidos a interrupciones en las unidades de reserva de potencia; un valor elevado de seguridad del sistema, con alta reserva de potencia, implica pocos daños pero importante inversión. A un valor bajo de seguridad del sistema, con poca reserva de potencia, corresponden daños elevados e inversión reducida.

La reserva de potencia óptima, es decir, la seguridad óptima de funcionamiento del sistema, debe ser el resultado de un cálculo técnico-económico, en donde se consideren el valor de los daños y el de la inversión en reserva de potencia.

### C. DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE LA RED ELÉCTRICA

La alimentación, de un número de consumidores con energía eléctrica de las fuentes de suministro, se puede hacer mediante múltiples variantes: los datos conocidos, son los sitios de las fuentes y de los consumidores, la disponibilidad de potencia de cada fuente y la potencia demandada por cada consumidor. Para elegir la variante que va a realizarse, se efectúan cálculos técnico-económicos correspondientes a cada variante y se elige la que tenga características técnico-económicas más favorables.

En el caso de un número grande de fuentes y consumidores, el número de variantes posibles es también grande, por lo que, solo un cierto número limitado entre ellas, puede ser tomado en consideración; en éste caso, es muy importante la experiencia del proyectista, para decidir la elección de las variantes retenidas para el cálculo, pero aún así, no existe la seguridad de que, entre las variables seleccionadas se encuentre la óptima.

El criterio para apreciar la configuración de una red, es utilizando el valor de las pérdidas de potencia activa; para una línea de transmisión, la expresión de pérdidas de potencia activa es:

$$p = 3 R I^2 = 3P \frac{1}{s} I^2 = 3P \frac{1}{s} \frac{P}{3^2 V^2 \cos^2} = \sqrt{3} \frac{P}{3^2 V \cos} P$$

$$p = K P^2$$

Considerando que la duración anual de utilización, la potencia máxima y el factor de potencia, tienen un valor apropiado para todos los consumidores, resulta que las pérdidas de potencia en cada línea, son proporcionales al producto  $P^2$ , factor de proporcionalidad expresado como  $K$ . En consecuencia, la configuración óptima de la red, es aquella a la que corresponde el valor mínimo de la suma del producto  $P^2$ , en un momento de la carga.

Para la solución óptima de un problema de éste tipo, se recorren las siguientes etapas.

- Se verifica el balance de potencia, que es la suma de potencia disponible y la suma de potencia requerida por los consumidores, a la que se le agrega el valor estimado de las pérdidas de potencia en la red, y se calculan las distancias de las fuentes a los consumidores.
- Se determina el esquema óptimo de alimentación, que corresponde a la suma mínima de carga momentánea: la gráfica obtenida, está formada solo por la cadena radial, central-consumidor.
- Del esquema obtenido, se construye la gráfica de la red real, unificando los trozos que se aproximan a esta dirección.
- Se elige el voltaje o tensión de la red
- Las variantes obtenidas, se comparan en base a cálculos técnico-económicos que resultan complejos.

## D. OPTIMIZACIÓN DE LA REPARTICIÓN DE CARGA ENTRE CENTRALES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO.

Desde el punto de vista técnico, es posible un número infinito de regímenes de carga, en las instalaciones electro energéticas funcionando en paralelo: desde el punto de vista económico, existe solo un régimen que corresponda a la eficiencia máxima

La necesidad de determinar el régimen óptimo, desde el punto de vista económico de los equipos, ha surgido con la formación de los grandes sistemas. Los sistemas grandes, están formados por emplazamientos de centrales eléctricas, en fuentes de energía apropiadas y por el transporte de energía eléctrica hacia los centros de consumo, a distancias relativamente grandes.

El régimen óptimo económico, puede ser determinado a diferentes niveles: calderas, turbogeneradores, unidades, centrales y sistema electro energético. Para un sistema eléctrico, el efecto de optimizar el régimen de funcionamiento, es mucho más potente cuando el sistema está mas diversificado en tipos de centrales, condiciones de funcionamiento de las centrales, tipo de combustible, etc. porque entonces, la calidad de régimen óptimo, difiere mucho mas de la calidad de os otros regímenes

Para la-elaboración del modelo matemático, del proceso de producción de energía eléctrica, para determinar el régimen óptimo, debe definirse el objetivo y función económica. Los objetivos del proceso de producción de energía eléctrica son

- Igualdad entre la producción y el consumo, en la unidad de tiempo.
- Respecto a las condiciones tecnológicas: no sobrepasar la carga disponible, no bajar de la carga mínima admisible, relación entre los diferentes combustibles usados simultáneamente, no sobrepasar el volumen de agua disponible en las hidroeléctricas. respecto a las normas y programas de revisión y mantenimiento, etc.
- Establecer el funcionamiento en paralelo.
- Seguridad en la alimentación a los consumidores. Los modelos matemáticos, del proceso de producción de energía eléctrica, difieren entre ellos en el modo en que reflejan este objetivo.

La función económica, mide la calidad económica de producción de energía eléctrica; las dimensiones para expresar la calidad de acción, pueden ser. costo total en el sistema, combustible convencional total consumido en el sistema, consumo total de energía para los servicios propios y pérdidas de energía e las redes del sistema. A las primeras dos dimensiones. Les corresponden los índices técnico-económicos, de apreciar el funcionamiento de un sistema: Costo específico de producción de energía eléctrica ( $\$/Kw-h$ ) y consumo específico de combustible convencional ( $cc/Kw-h$ ).

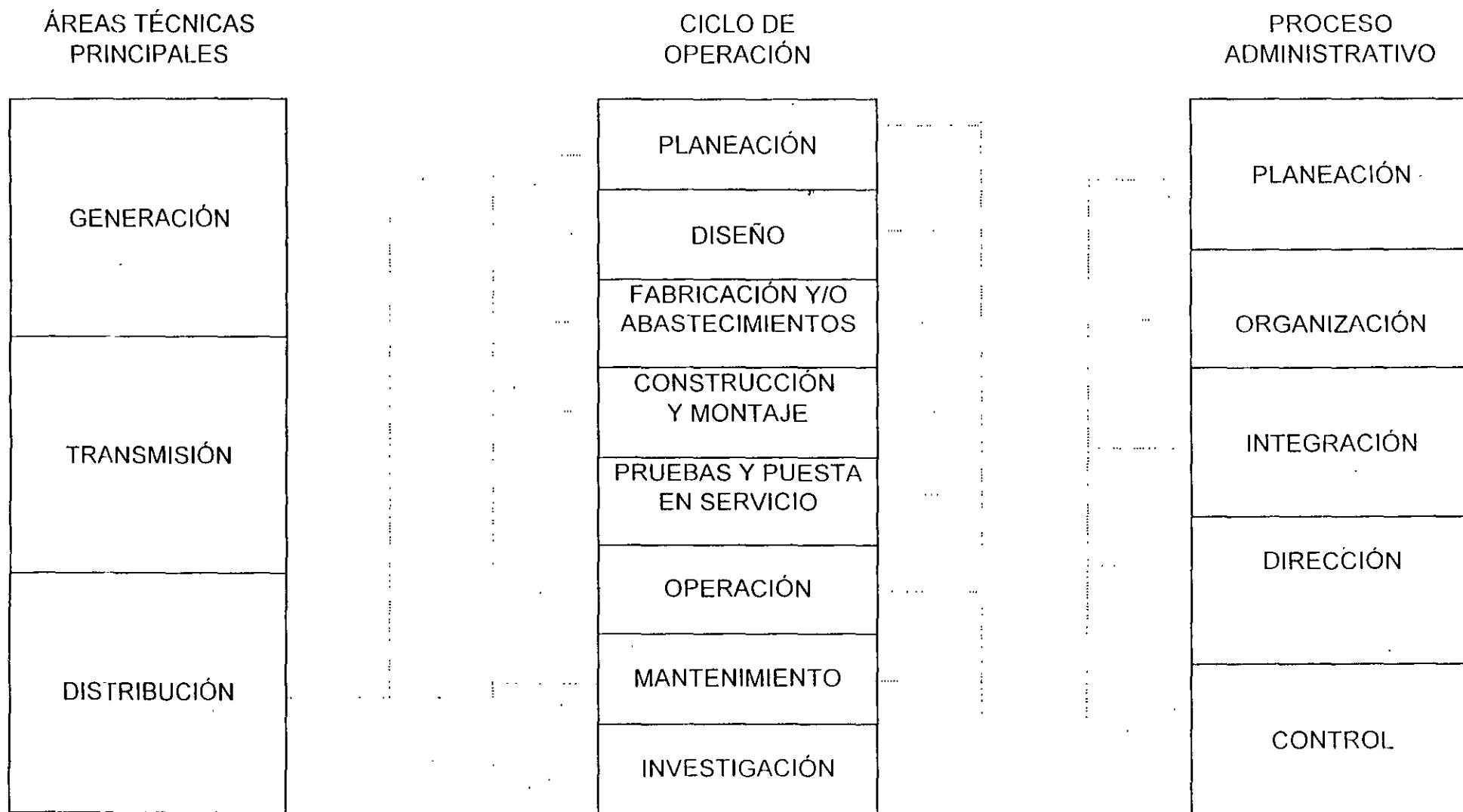


FIG. 70 ESPECTRO TECNOLÓGICO DE LAS COMPAÑÍAS ELÉCTRICAS.

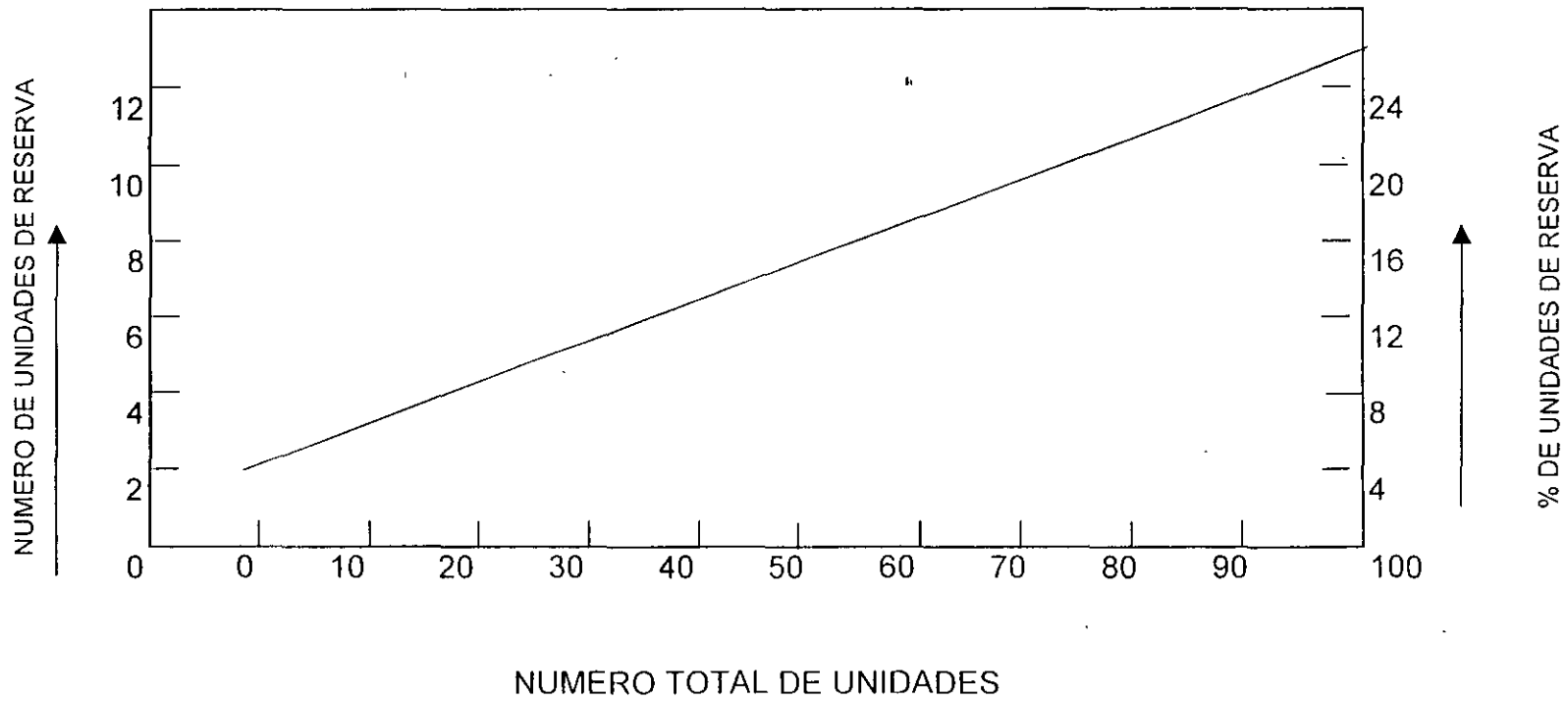


FIG.71 EJEMPLO DE RESERVAS NECESARIAS CON 93% DE CONFIABILIDAD DE UNIDADES

## GRÁFICAS DE CRECIMIENTO LINEAL, SEMILOGARITMICO Y EXPONENCIAL.

Muchas relaciones en la naturaleza y sus gráficas de dependencias con el tiempo son lineales; un ejemplo podría ser el despliegue graficando la distancia de una persona que se aleja de una ciudad a una velocidad constante. Si la velocidad  $\underline{s}$  es de 80kph, la gráfica podría ser parecida a la Fig. 1; en este caso, hay una relación obvia entre la distancia  $\underline{d}$  y el tiempo  $\underline{t}$ , que puede representarse algebraicamente como:

$$d = s t$$

Si el tiempo  $\underline{t}$  se mide en horas y la velocidad  $\underline{s}$  en kilómetros por hora (p.e. 80 kph), la ecuación anterior podría escribirse como:

$$d \text{ (km)} = \frac{80 \text{ km}}{\text{Hora}} \times t \text{ (horas)}$$

Esta ecuación dice que la cantidad de distancia agregada en cualquier hora es una constante, es decir, 80 km.

Muchas dependencias del tiempo interesantes no son lineales y requieren otro método para dibujar sus gráficas.

La gráfica semilogarítmica como las usadas en las Fig. 3 y 4 es un medio conveniente y útil de mostrar datos que no son lineales y que pueden variar sobre un rango grande; este tipo de gráfica revela detalles tanto de magnitudes grandes como pequeñas en la misma gráfica.

Una segunda propiedad de la gráfica semilogarítmica es que cuando el eje vertical se construye de forma que la distancia es una progresión lineal del tiempo la tendencia verdadera exponencial puede verse como una línea recta perfecta. En esta

forma es fácil hacer una extrapolación en línea recta de una tendencia exponencial en el futuro

Es común tener cantidades que se comportan en el tiempo de forma que los incrementos no son constantes para cada unidad de tiempo que pase, sino que crecen más que el avance de tiempo, p.e. , La cantidad de interés ganada anualmente en un depósito de banco cuando está a una tasa de interés ganado compuesto. Si no se saca dinero, el interés ganado en el segundo año será mayor que el ganado en el primer año. En el caso anterior, la cantidad ganada es proporcional a la cantidad presente, y en el segundo año hay más presente por el interés sumado al final del primer año; la ecuación que expresa lo anterior es:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = (\text{constante}) \times N = \lambda N$$

En donde:

$\Delta$  (delta)= Cambio de las variables N y  $\lambda$  que si es un número positivo, es un crecimiento constante.

La ecuación dice que la cantidad agregada por unidad de tiempo es proporcional ( $\lambda$  es la constante de proporcionalidad) de la cantidad presente. Con métodos de cálculo integral, puede demostrarse que esta puede transformarse en la forma más útil:

$$N = N_0 e^{\lambda t}$$

En dónde:

$N_0$ = Cantidad de la variable N al principio del periodo de tiempo bajo consideración, es decir, para  $t = 0$



$e$  = Constante usada frecuentemente en cálculo, que siempre tiene un valor de 2.718.

Una cantidad  $N$  que se comporta en el tiempo de acuerdo con esta ecuación, se dice que crece exponencialmente; una gráfica de esta variable en gráfica lineal se muestra en la Fig. 2.

El logaritmo es la potencia a la cual un número debe ser elevado para hacer éste (número) igual a algún número dado; hay dos convenciones.

- Uno basado en el número 10, llamado logaritmo común y abreviado log.
- Otro basado en el número  $e = 2.718$ , llamado logaritmo natural y abreviado ln.

Debido a que  $e^{3.25} = 25.8$ , puede decirse que el logaritmo natural de 25.8 es 3.25, es decir,  $\ln 25.8 = 3.25$ .

Similarmente  $1000 = 10^3$  de forma que el  $\log 1000 = 3$ .

Tomando logaritmos naturales de ambos lados de la ecuación anterior y aplicando la regla para el logaritmo de un producto, la ecuación puede re-escribirse en forma diferente sin cambiar su significado:

$$\ln N = \ln N_0 + \lambda t, \text{ o bien.}$$

$$\ln N - \ln N_0 = \lambda t$$

Esta última ecuación muestra que  $\ln N$  es lineal mente dependiente del tiempo; una gráfica de esta ecuación se muestra en la fig. 3. Con ésta gráfica no es necesario involucrarse en la computación de logaritmos ya sea para graficarlas o comprender variables que se comportan exponencialmente.

Si se usa una gráfica que tenga el eje vertical con escala logarítmica, la ecuación exponencial aparece como en la Fig. 4: no es necesario de hacer otra cosa más que poner directamente las cantidades  $N$  a su correspondiente tiempo  $t$  y si las cantidades se incrementan o decrecientan exponencialmente, entonces resulta una línea recta.

Para crecimiento exponencial también es interesante considerar el tiempo para duplicar  $t_d$ ; si se considera una situación en la cual una cantidad exponencial crece al doble, se puede escribir:

$$e^{\lambda t_d} = 2 = e^{0.693}$$

La última mitad de esta ecuación expresa el hecho que el  $\ln 2 = 0.693$  como puede comprobarse; igualando el primer y tercer término de la ecuación muestra que  $\lambda t_d = 0.693$ . un ligero re-arreglo da:

$$t_d = \frac{0.693}{\lambda}$$

Lo que dice esta ecuación es que cuando el exponente de  $e$  es igual a 0.693, la cantidad  $N$  se incrementa por un factor de 2; así, el periodo de tiempo  $t_d$  se conoce como tiempo de duplicación. Si el crecimiento constante  $\lambda$  es 10% por año, ó 0.10 por año, entonces

$$t_d = \frac{0.693}{0.10 \text{ /año}} = 6.93$$

Con frecuencia es conveniente usar la expresión aproximada siguiente:

$$\text{Tiempo de duplicación en años} = \frac{70}{\% \text{ de crecimiento /año}}$$

O bien.

$$\% \text{ de crecimiento / año} = \frac{70}{\text{Tiempo de duplicación en años.}}$$

No es necesario que el tiempo este dado en años, sino que puede ser en minutos o cualquier otro intervalo, con tal que las unidades de tiempo sean iguales en ambos lados de la ecuación.

Con frecuencia el incremento de población se cita como otro ejemplo de crecimiento exponencial p.e., si la población de México es de 100 millones y se incrementa 1.5% por año, el primer año el incremento sería  $0.015 \times 100 = 1.5$  millones. El segundo año sería  $0.015 \times 101.5 = 1.52$  y así sucesivamente: con esta tasa de crecimiento la población podría duplicarse en  $70/1.5 = 46.6$  años.

No hay razones fundamentales para que la tasa de % de crecimiento o el tiempo de duplicación sea constante por periodos extendidos, por que las tasas de nacimientos y muertes pueden cambiar por varias razones, pero de hecho, muchos grupos de población tienden a crecer exponencialmente con un valor aproximadamente constante para  $\lambda$ .

La palabra exponencial se ha usado en la conversación diaria sin el significado exacto; es común oír que algo se “incrementa exponencialmente”, cuando de hecho no es así, de acuerdo con el entendimiento científico del término; exponencial no significa necesariamente “muy rápidamente”.

Para que una patrón de crecimiento logre la definición estricta de crecimiento exponencial, tanto el tiempo de duplicación como la

tasa de incremento deben ser constantes en el periodo de tiempo bajo consideración; estos son estándares equivalentes.

Un patrón de crecimiento puede probarse para ver si realmente es exponencial examinando su gráfica semilogarítmica de la cantidad contra el tiempo. Si los datos se ajustan a una línea recta, el crecimiento es indudablemente exponencial. En el caso de la energía el crecimiento es solo aproximadamente exponencial, pero es una buena aproximación para la mayoría de los propósitos.

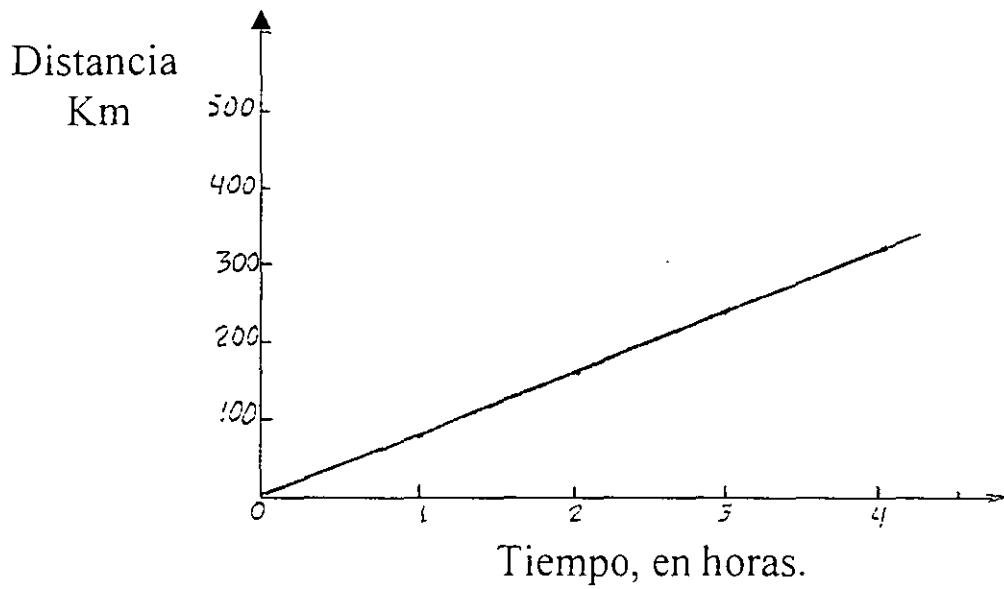


Fig. 1. DISTANCIA VIAJADA DESDE UN PUNTO DE INICIO COMO UNA FUNCIÓN DEL TIEMPO VIAJADO.

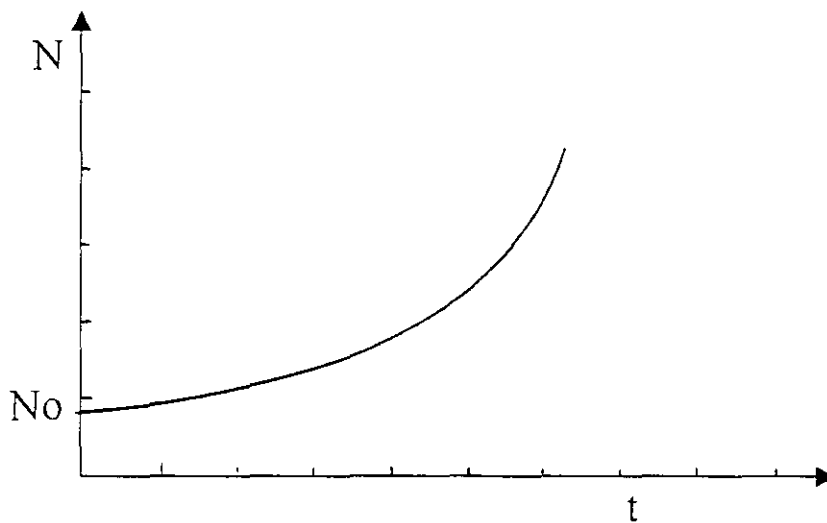


Fig. 2. PATRÓN DE CRECIMIENTO, INDICATIVO DE CRECIMIENTO EXPONENCIAL, O  $N = N_0 e^{\lambda t}$ , GRAFICADO SOBRE UNA GRÁFICA LINEAL.

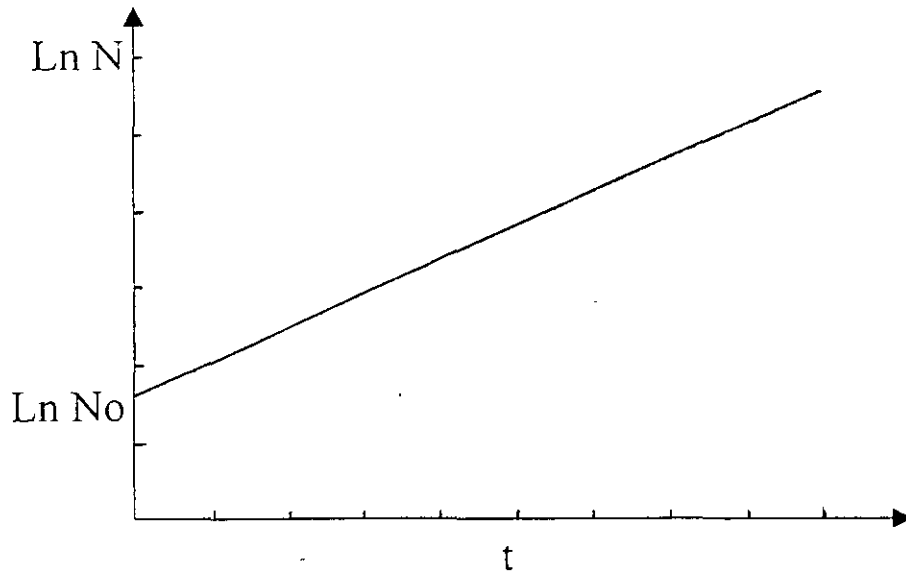


FIG. 3. LA ECUACIÓN  $\ln N = \ln N_0 + \lambda t$ , DIBUJADA EN UNA GRÁFICA LINEAL.

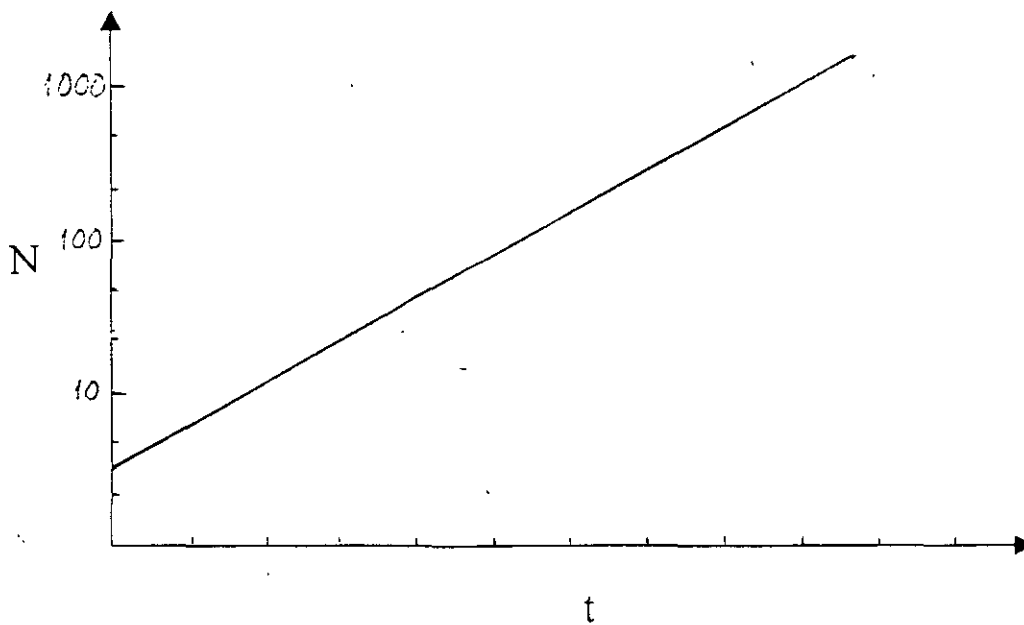


FIG. 4. GRÁFICA SEMILOGARITMICA DE UNA VARIABLE DE INCREMENTO EXPONENCIAL.

# Metodología de las proyecciones

2000-2009

Las proyecciones de demanda de gas natural de los sectores industrial, transporte vehicular, residencial y de servicios fueron desarrolladas por el IMP con base en diferentes escenarios de crecimiento. Este anexo presenta la metodología aplicada en cada sector para una mejor comprensión de los resultados expuestos en la Prospectiva.

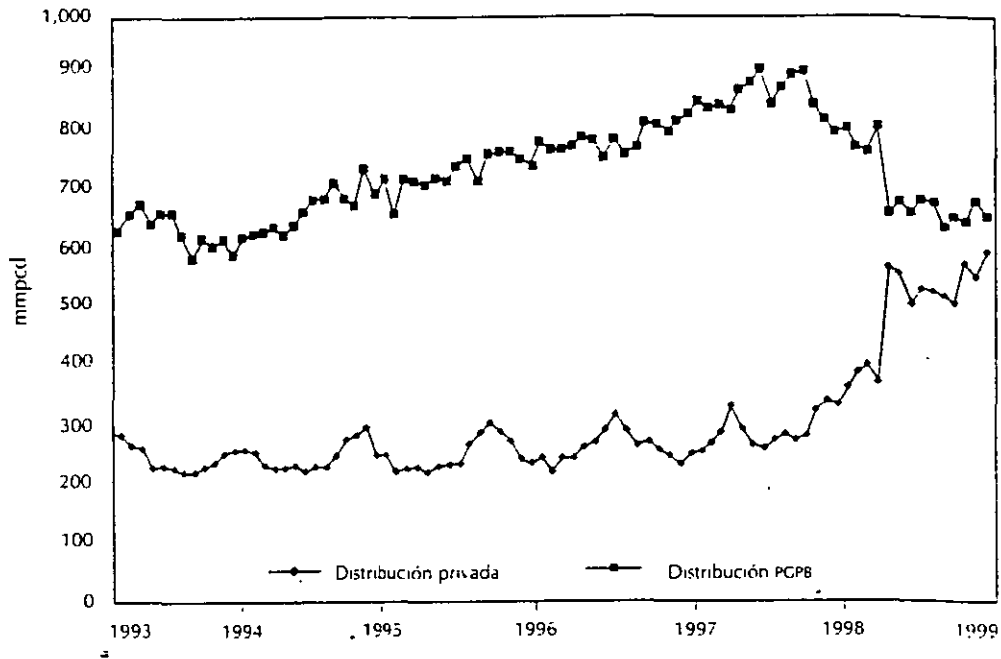
## 1. Demanda de gas natural: base de datos 1993-1999

En la gráfica 14 se puede apreciar que en los últimos años está cobrando importancia la distribución de gas natural por distribuidores particulares, un proceso que seguirá en los próximos años. Esto trae como consecuencia que la *Prospectiva del mercado de gas natural* cada vez dependerá más de información proporcionada por los distribuidores. Por tal motivo es urgente hacer un esfuerzo coordinado, e involucrar a la CRE, la Secretaría de Energía (SE), PGPB y el IMP, para asegurar que tal información fluya adecuada, uniforme y oportunamente.

Este año contamos con datos de todos los distribuidores, mediante la Dirección de Gas Natural de la CRE, los cuales indican la energía conducida mensualmente a tres sectores de consumo final, expresada en Gigacalorías (Gcal).

PGPB aportó los datos de medición de ductos, que detallan la medición por caseta de gas conducido mensualmente a sus clientes, expresado en millones de pies cúbicos diarios (mmpcd), sin corregir por valor calorífico. Además se tomaron en cuenta las cifras de los centros de facturación de PGPB en mmpcd sin y con corrección calorífica, de lo cual se deduce el valor calorífico implícito del gas conducido.

**Gráfica 14**  
**Distribución de gas natural por PGPB y distribuidores privados,**  
**excluyendo el sector eléctrico público, 1993-1999**



Fuente: IMP con base en CRE y PGPB.

Para procesar los datos, se consideraron básicamente los siguientes elementos:

- Se convirtieron los volúmenes de PGPB-ductos en Gcal según los valores caloríficos implícitos de los centros de facturación correspondientes a cada núcleo y se asignaron a cuatro categorías: sector eléctrico público, industrial, servicios y distribuidores particulares.
- Los volúmenes entregados a distribuidores se asignaron a su vez entre los sectores de consumo final en las proporciones que resultaron de la información de los distribuidores. En el caso de que esta faltara, se aplicaron criterios *ad hoc*.
- Se construyó una serie histórica del gas consumido en procesos de autogeneración, con los datos de la CRE sobre generación de energía eléctrica por permisionario, en las modalidades de cogeneración, autoabastecimiento y usos propios continuos, que cubren el periodo 1996-1999, y de los consumos de autogeneradores en el listado de PGPB-ductos, que abarca los años 1993-1999. Estos volúmenes se restaron completamente del consumo industrial en el caso de autoabastecimiento y usos propios continuos, y aproximadamente 46.7% en el caso de cogeneración. La asignación de la demanda de gas natural entre los sectores eléctrico e industrial es hasta cierto punto arbitraria y no tiene solución en sentido estricto.



Se trata de lo que en economía se suele llamar *producción conjunta*, un proceso en el cual se producen dos o más productos en forma no separable. La asignación de costos o insumos no es posible en principio. Aquí se manejó el siguiente criterio: se asigna al sector industrial la cantidad de gas que se utilizaría si no se hubiera instalado el equipo de cogeneración sino equipo convencional de generación de energía térmica. Esto conviene para mantener la consistencia de las proyecciones industriales y evitar duplicaciones.

El factor 0.533, que representa la fracción de la demanda de cogeneradores asignables al sector industrial, es la razón de 0.40 y 0.75, valores supuestos en este ejercicio y tomados de la Conae para las eficiencias de generación de energía térmica en procesos de cogeneración y convencionales, respectivamente. El factor parece aproximarse muy bien a las observaciones del consumo de gas natural de varias empresas cogeneratoras comparando su demanda anterior y posterior a la introducción de cogeneración.

- Finalmente, se convirtieron los volúmenes en Gcal a mmpcd mediante un factor que se escogió para cada año, de tal forma que el volumen de ventas internas reportado en *Memoria de labores* de Pemex (diferentes ediciones) coincidiera en la suma de los incisos *industrial* y *doméstico* con el total de nuestras categorías industrial, autogeneración, residencial y de servicios y transporte vehicular, menos las importaciones directas por distribuidores privados.

Para complementar los datos de los volúmenes de gas natural, se emplearon una amplia cantidad de cifras de diversa índole, entre otras, los precios de gas natural y combustóleo, el consumo de gas LP y combustóleo por entidad federativa, temperaturas estatales, el Producto Interno Bruto (PIB), el PIB manufacturero, las exportaciones, etcétera.

## 2. Sector eléctrico (cogeneración y autoabastecimiento)

### 2.1 Objetivos

- Pronosticar por región la demanda de gas natural en los procesos de autogeneración de energía eléctrica (autoabastecimiento y cogeneración), del sector industrial, para el periodo 2000-2009, con tres escenarios de actividad económica.
- Como prerrequisito del punto anterior, proyectar la capacidad instalada y la generación de energía eléctrica por concepto de autogeneración, para el mismo periodo.

### 2.2 Innovaciones

- En la modalidad de autoabastecimiento se incluyeron 64 permisos denominados *Usos propios continuos*, término que se emplea para aquellos permisos otorgados por diversas secretarías antes de las reformas de 1992 a la LSPEE.
- Se elaboró conjuntamente con CFE y la CRE una lista de empresas que es muy probable que inviertan en capacidad de autogeneración los próximos años.
- Se integró una serie histórica del consumo de gas natural por autogeneración para los años 1993-1999 a partir de los reportes proporcionados por la CRE y los registros de ventas de gas natural de PGPB.
- Se incorporó información técnica relacionada con las eficiencias que manejan los fabricantes de equipos para generar energía eléctrica, lo cual permitió una estimación diferenciada según tecnología y altura sobre el nivel del mar del consumo de gas natural de proyectos nuevos.

### 2.3 Supuestos y limitaciones

- Las proyecciones para el periodo 2000-2004 parten de las plantas existentes de autogeneración y un programa de instalación de nuevas plantas.
- En el caso de aquellas plantas en operación, se mantienen las cifras de capacidad, generación de energía eléctrica y consumo de combustibles reportadas por la CRE durante 1996-1999.
- Se aplicaron a los factores de planta, indicados en permisos y proyectos, coeficientes de realización de 0.9, 0.95 y 1 en los escenarios moderado, base y alto, respectivamente.
- A partir del año 2005, se aplicaron a las capacidades instaladas los escenarios de crecimiento del PIB de la industria manufacturera (véase cuadro 64). La aplicación de estos escenarios supone la adición de nuevas plantas con características similares a las que se planea que operarán en el 2004.
- Se aplicó para el periodo 2005-2009 una eficiencia de 52.6% para los nuevos proyectos de autoabastecimiento que utilizan gas natural.

### 2.4 Diferencias en relación con los resultados de la Prospectiva anterior

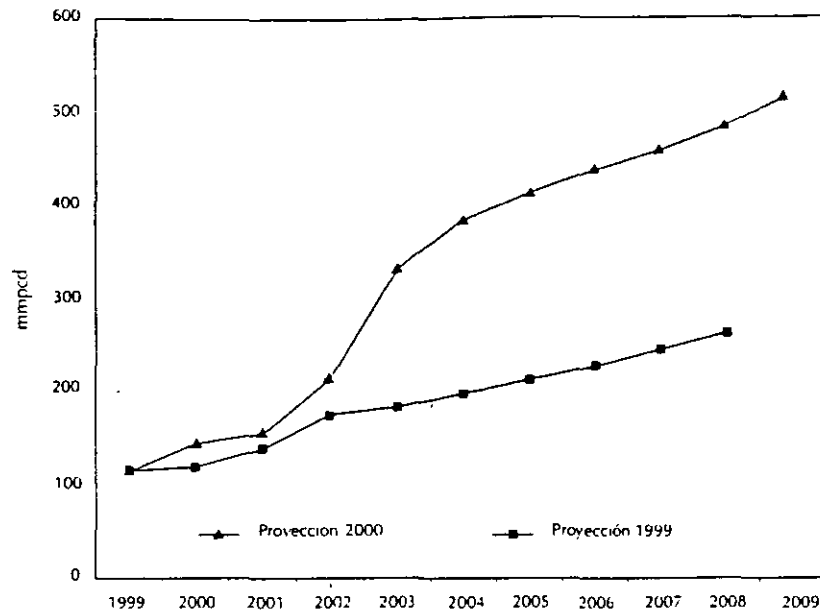
La demanda estimada de gas natural en este rubro aumentó considerablemente con respecto a la Prospectiva del año anterior (véase gráfica 15). En el año 1999 coinciden básicamente la estimación y lo realizado. En los siguientes dos años se prevé un consumo ligeramente superior al anterior. A partir de 2002 la predicción es proporcionalmente mayor, principalmente por incluir en el programa de instalación de nuevas plantas algunos proyectos que, aunque se considere muy probable su realización, aún no cuentan con el permiso de la CRE. En cambio, en la versión anterior se incluyeron solamente proyectos con permiso vigente. Sin embargo, el efecto neto en la demanda nacional será probablemente una reducción: la autogeneración por particulares, que no utilizan exclusivamente gas natural, desplazaría a generación pública, que contempla solamente la utilización de ciclo combinado a gas natural.

**Cuadro 64**  
Escenarios de crecimiento económico, exportaciones reales y de precios, 2000-2009  
%

Año	PIB manufacturero			Exportaciones totales			Precios de los combustibles	
	Moderado	Base	Alto	Moderado	Base	Alto	Gas natural	Combustóleo pasado
2000	4.3	5.9	6.0	9.0	12.8	11.4	14.2	-1.3
2001	3.6	5.1	5.8	7.0	9.1	12.0	-4.3	-9.8
2002	5.3	6.1	6.9	8.5	11.6	15.3	-2.8	-6.8
2003	5.6	7.1	7.4	10.3	12.6	16.0	6.7	7.5
2004	6.2	7.5	8.4	10.8	13.1	18.1	2.4	3.1
2005	3.6	8.7	9.1	13.0	15.0	17.3	4.6	3.0
2006	5.8	6.7	8.7	8.9	12.0	16.8	1.8	-0.1
2007	4.0	5.4	8.9	8.2	10.6	16.6	1.8	-0.1
2008	5.2	6.0	8.4	9.2	13.2	17.2	1.8	-0.1
2009	6.5	8.1	7.8	11.6	14.8	14.4	1.7	-0.1

Fuente: Secretaría de Energía con apoyo del Centro de Análisis y Proyecciones Económicas para México (CAPEM) y Pemex.

**Gráfica 15**  
**Demanda de gas natural por autogeneración**  
**Comparación de proyecciones, 1999-2009**



Fuente: IMF con base en CFE, CRE y Pemex.

### 3. Sector industrial

#### 3.1 Objetivos

- Generar proyecciones regionales y anuales de la demanda de gas natural del sector industrial para el periodo 2000-2009, contemplando los siguientes elementos:
  - Tres escenarios de crecimiento económico:
    - Moderado
    - Base
    - Alto
  - Un escenario de precios para el combustible pesado.
  - Un escenario de precios para el gas natural.
  - Un escenario de aplicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-086-ECOL-1994.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Norma referente a la "protección ambiental, que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles". DOF del 2 de diciembre de 1994, versión modificada al 4 de noviembre de 1997.

#### 3.2 Innovaciones

- Se creó una nueva base de datos corregida por valor calorífico que considera los elementos de demanda mensual de gas natural por parte del sector industrial, para el periodo 1993-1999. La base se integró a través de la conciliación de cifras reportadas por PGPB y por cada uno de los distribuidores particulares que han mantenido operaciones durante este periodo.
- Se reconsideró la forma integral de la demanda de combustibles del sector.

#### 3.3 Supuestos y limitaciones

- Los combustibles industriales relevantes (sustitutos) para el sector industrial son gas natural y combustible pesado, pues la oferta disponible de diesel se consume primordialmente en los sectores automotriz y de transporte.

triz y ferroviario, y sólo una pequeña parte en el industrial.

- Los consumos regionales de gas natural y combustóleo dependen a su vez de la demanda interna, representada por el PIB real de la industria manufacturera, de la demanda externa, constituida por las exportaciones nacionales reales, de los precios relativos entre los combustibles y de los factores estacionales de la demanda.
- La demanda de energía eléctrica es independiente de la demanda de gas natural y combustóleo pesado.
- Debido a que no se contó con estadísticas del PIB manufacturero y de las exportaciones nacionales reales trimestrales por estado, se emplearon datos nacionales en las regresiones regionales.

### 3.4 Especificación del modelo

La demanda total de combustibles industriales se estimó como la suma de la demanda industrial de gas natural y combustóleo a escala regional.

La demanda de cada combustible industrial se estructuró en forma doble logarítmica, en función del PIB manufacturero real, de las exportaciones nacionales reales, de los precios relativos y de factores estacionales multiplicativos.

El modelo se aplicó a las ocho regiones en las que se divide la República Mexicana para este fin, empleando datos trimestrales de 1993-I a 1999-IV. La demanda nacional es la suma de las demandas regionales.

Se estimó el precio relativo del combustóleo con respecto al gas natural, considerando el poder calorífico de ambos combustibles.

Las ecuaciones para cada región quedaron de la siguiente forma:

$$(1) DCI = DIGN + DIC$$

$$(2) \ln(DIGN) = \beta_{21} + \beta_{22} * \ln(PIBM) + \beta_{23} * \ln(EXP) + \beta_{24} * \ln(PRC) + \beta_{25} * D2 + \beta_{26} * D3 + \beta_{27} * D4 + \epsilon_2$$

$$(3) \ln(DIC) = \beta_{31} + \beta_{32} * \ln(PIBM) + \beta_{33} * \ln(EXP) + \beta_{34} * \ln(PRC) + \beta_{35} * D2 + \beta_{36} * D3 + \beta_{37} * D4 + \epsilon_3$$

Donde:

DCI: demanda regional de combustibles industriales.

DIGN: demanda industrial regional de gas natural.

DIC: demanda industrial regional de combustóleo.

PIBM: producto interno bruto real manufacturero.

EXP: exportaciones nacionales reales.

PRC: precio relativo de combustóleo pesado con respecto a gas natural.

D2: variable dicotómica estacional; D2 = 1 en el segundo trimestre; D2 = 0 en los otros trimestres.

D3: variable dicotómica estacional; D3 = 1 en el tercer trimestre; D3 = 0 en los otros trimestres.

D4: variable dicotómica estacional; D4 = 1 en el cuarto trimestre; D4 = 0 en los otros trimestres.

$\epsilon$ : variable residual aleatoria.

Las ecuaciones no son simultáneas: las variables explicativas de una ecuación no aparecen a la izquierda en otra como variable dependiente, por lo tanto, el método de estimación de cuadrados mínimos ordinarios es adecuado para este modelo.

### 3.5 Resultados de la estimación

De la demanda nacional de gas natural del sector industrial se obtuvieron los siguientes resultados (véase cuadro 65):

$$\ln(\text{DIGN}) = -3.25 + 0.68 \cdot \ln(\text{PIBM}) + 0.14 \cdot \ln(\text{EXP}) + 0.11 \cdot \ln(\text{PRC})_{t-1} - 0.02 \cdot \text{D4}$$

(6.78) (3.86) (3.45) (-2.38)

R<sup>2</sup> = 0.97 DW = 2.14 F = 210.38

28 observaciones trimestrales, de 1993-I a 1999-IV.

Estadístico *t* entre paréntesis.

R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación.

DW: Estadístico Durbin-Watson.

F: Estadístico F.

### 3.6 Características de la proyección

En la proyección se incluyeron los siguientes elementos no presentes en el periodo histórico:

#### Nueva infraestructura de distribución industrial

Para este periodo de proyección, la CRE consideró como probable el ingreso de las siguientes ZG de distribución, las cuales a la fecha no cuentan con distribución industrial de gas natural: a) Bajío Norte,<sup>2</sup> b) Noroeste de Baja California, c) Cancún, d) Cuernavaca, e) Mérida, y f) Pachuca. A partir de la demanda futura estimada de combustóleo, se determinó un factor de penetración, para estimar una sustitución parcial por gas natural.

### La entrada en vigor de normas ambientales

La aplicación de las normas ambientales limitará el empleo del combustóleo pesado en zonas calificadas como *críticas*. Específicamente, la NOM-085-ECOL-1994 regula los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes, y la NOM-086-ECOL-1994 establece las especificaciones de los combustibles. Por lo tanto, al realizar la proyección se empleó un mecanismo de sustitución de combustóleo por gas natural, donde el consumo de combustóleo se reducirá en zonas críticas linealmente a cero.

La aplicación de esta norma ambiental influirá en las decisiones de renovación del equipo industrial y en la selección del combustible apropiado. Una vez que se dé a conocer la fecha oficial de aplicación de la norma, la industria se verá obligada a realizar la conversión de su equipo, sustituyendo combustóleo pesado por gas natural.

<sup>2</sup> Zona geográfica que incluye el área de los centros de población de Aguascalientes-Jesús María-San Francisco de los Romo, en el estado de Aguascalientes, San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez, en el estado de San Luis Potosí; Zacatecas-Guadalupe, Fresnillo, y los municipios de Calera y Morelos en el estado de Zacatecas Resolución no. RES/106/99 de la CRE a través de la cual se determina la ZG del Bajío Norte.

**Cuadro 65**  
**Resultados regionales y nacionales para proyectar la demanda industrial de gas natural, 2000-2009**

Región	Elasticidad PIB Manufacturero		Elasticidad Exportaciones		Elasticidad Precio		Tasa de crecimiento		R <sup>2</sup>	DW	F
	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t	Coefficiente	t			
Nacional	0.68	6.78	0.14	3.86	0.11	3.45			0.97	2.14	210.38
Noroeste					0.77	5.43	0.03	7.15	0.77	1.02	38.94
Noreste	0.48	3.40	0.16	3.00					0.87	0.91	83.66
Occidente	0.77	3.18	0.35	3.91					0.89	1.53	103.04
Centro	0.79	18.11			0.06	2.21			0.94	2.24	112.98
Golfo			0.18	2.94					0.61	1.99	11.78

Fuente: IMP con base en CFE, CRE, INEGI, Pemex y Secretaría de Energía

## Escenarios de proyección

partir de los escenarios de crecimiento económico y de precios propuestos por la SE, se representó su impacto en la demanda de gas natural y combustible, aplicando los escenarios en términos de tasas de crecimiento anuales con respecto al mismo periodo del año anterior (véase cuadro 64).

### Exclusión de la demanda de gas natural por concepto de autogeneración de energía eléctrica

Con el fin de evitar duplicación en los agregados de consumo de este sector, las cifras de demanda no incluyen el gas natural identificado en procesos de autogeneración de energía eléctrica.

## 3.7 Validación

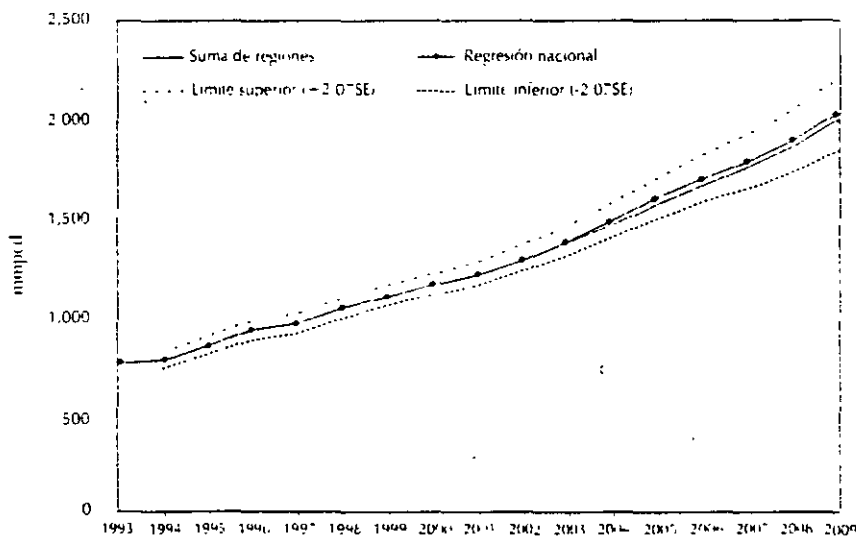
Para comprobar la bondad del modelo de proyección, se emplearon las siguientes técnicas:

- Las pruebas y criterios estadísticos y econométricos habituales.
- Aplicación del modelo a cifras de orden nacional, lo cual permitió comparar los resultados de la proyección de la demanda tendencial nacional con la suma de la demanda tendencial regional (véase gráfica 16).

## 3.8 Diferencias en relación con los resultados de la Prospectiva anterior

La proyección del año pasado y la actual coinciden sustancialmente (véase gráfica 17). Las diferencias que pre-

**Gráfica 16**  
Demanda tendencial del sector industrial, incluye autogeneración  
Comparación de estimaciones, 1993-2009



SE: Error estándar de la proyección media.

Fuente: IMP con base en CFE, CRE, INEGI y Pemex.

sentaron los resultados de este año en relación con la Prospectiva anterior se deben principalmente a:

- El empleo de una nueva base de datos corregida por poder calorífico.
- El uso de una nueva serie de escenarios de crecimiento económico.
- La incorporación de un escenario de precios para el gas natural y el combustóleo, mientras que en la versión anterior se supuso que los precios relativos se mantendrían constantes.
- La eliminación del diesel como combustible industrial.
- Una nueva estimación de la demanda de gas natural para los procesos de autogeneración de energía eléctrica, los cuales se restaron a la demanda industrial.
- La incorporación de nuevas ZG de distribución industrial de gas natural, que no se consideraron en la versión anterior.

## 4. Sector residencial y de servicios

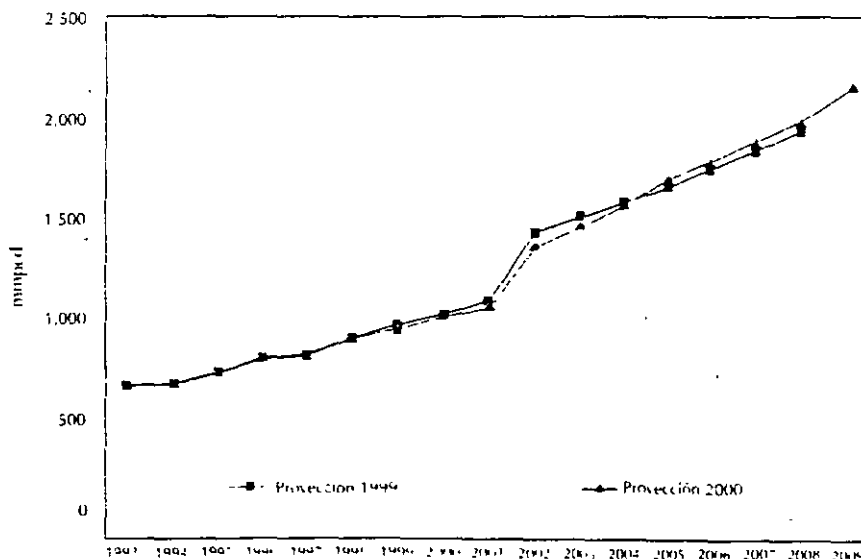
### 4.1 Objetivos

Estimar el consumo regional del gas natural en el sector residencial y de servicios para el periodo 2000-2009, contemplando tres escenarios de crecimiento económico (moderado, base y alto).

### 4.2 Innovaciones

- Como en el sector industrial, se empleó la nueva base de datos corregida por valor calorífico que considera los elementos de la demanda mensual de gas natural por parte de este sector, para el periodo 1993-1999. Esta base integra las cifras reportadas por PGPB y cada uno de los distribuidores particulares que han mantenido operaciones durante este periodo.

Gráfica 17  
Demanda industrial nacional de gas natural, 1993-2009  
Escenario base



Fuente: IMP con base en CFL, CRE, INEEL y Pemex

- Se incorporaron tres ZG que no se habían considerado anteriormente.
- Se empleó una base de datos actualizada sobre las temperaturas medias mensuales como diferencia de la normal a nivel estatal.

#### 4.3 Supuestos y limitaciones

- El mercado energético de este sector está compuesto principalmente por gas natural y gas LP.
- El comportamiento de la demanda de energéticos de este sector depende de los siguientes factores: población, PIB, temperatura y factores estacionales.
- La variable exógena *población* se basó en las proyecciones que emite el Consejo Nacional de Población (Conapo) para cada estado de la República.
- Se retomaron los escenarios de PIB real a nivel nacional propuestos por la SE, bajo las modalidades de moderado, base y alto (véase cuadro 64).
- La variable temperatura fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Con la finalidad de reducir los cálculos de la estimación, se asumió que en el periodo de proyección la diferencia entre temperatura media y la normal es cero.
- Con las ecuaciones generadas, se proyectó el consumo total de energía y se estimó la parte que se espera consumir de gas natural, considerando las proyecciones disponibles de los distribuidores y los patrones de penetración de cada zona geográfica.
- La elasticidad precio de la demanda no resultó significativa, lo cual implicó que el comportamiento de la demanda de gas natural dependa principalmente de la disponibilidad de infraestructura.
- La demanda de energía eléctrica se consideró independiente de la demanda de gas natural y gas LP.

#### 4.4 Especificación del modelo

Se realizaron 32 regresiones para estimar la demanda de energéticos (gas natural y gas LP, en conjunto) para cada entidad federativa, incluyendo como variables explicativas la población estatal, el PIB real nacional, la diferencia de temperaturas medias estatales en relación con las normales y los factores estacionales. La muestra constó de 72 observaciones mensuales de 1993 a 1999.

Debido a que el PIB sólo se presenta en términos trimestrales, se generó una serie mensual a partir de medias móviles. Este procedimiento se justifica al considerar que el gasto familiar en energéticos reacciona paulatinamente a las variaciones en el ingreso.

La ecuación que se estimó para cada entidad federativa es la siguiente:

$$\ln(\text{DRSC}) = \alpha_1 + \alpha_2 * \ln(\text{POBL}) + \alpha_3 * \ln(\text{PIB}) + \alpha_4 * \text{TEMP} + \sum (\gamma_i * D_i) + \varepsilon$$

Donde:

- DRSC: demanda total de gas natural y gas LP en el sector.
- POBL: población estatal según la Conapo.
- PIB: Producto Interno Bruto a precios de 1993.
- TEMP: diferencia entre la temperatura media mensual con respecto a la normal.
- $D_i$ : factores estacionales multiplicativos;  $i = 2, 3, \dots, 12$ .
- $\varepsilon$ : variable residual aleatoria.

La estimación de las ecuaciones se realizó empleando el método de mínimos cuadrados ordinarios.



## 4.5 Resultados de la estimación

De la regresión de la demanda nacional de combustibles del sector residencial y de servicios, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Cuadro 66**  
**Reporte de resultados**  
**Muestra: 84 observaciones mensuales**  
**de enero de 1993 a diciembre de 1999**

Variables	Coefficiente	Estadístico
Intercepto	-13.34	-6.43
Ln (Pobl)	0.66	4.26
Ln (PIB)	0.65	8.90
temperatura	-0.01	-3.34
D3	-0.10	-9.05
D4	-0.15	-13.70
D5	-0.18	-17.12
D6	-0.18	-16.90
D7	-0.16	-14.97
D8	-0.16	-14.18
D9	-0.15	-14.03
D10	-0.13	-12.31
D11	-0.07	6.96

R<sup>2</sup> = 0.95

Estadístico Durbin-Watson = 1.10

Estadístico F = 116.36

Fuente: IMP con base en CNA, Conapo, CRE, INEGI y Pemex

## 4.6 Características de la proyección

Se realizaron 32 proyecciones de la demanda estatal de gas natural y gas LP en conjunto, las cuales se resumen en el cuadro 42 del tercer capítulo.

Por otra parte, se construyeron 27 proyecciones de la demanda de gas natural, una para cada ZG. En coordinación con la CRE, se estableció un porcentaje de máxima penetración del gas natural con respecto al consumo total de energéticos del sector, así como las fechas de inicio de operación para cada ZG. Se aplicó un patrón de penetración gradual con una distribución normal acumulativa, a partir de la cantidad de meses que tarda en ser conectado un hogar o comercio den-

tro del universo de elementos susceptibles a ser conectados, según la máxima penetración establecida.

La proyección de la demanda de gas natural se obtuvo combinando las proyecciones de los propios distribuidores, en caso de estar disponibles, con las que resultaron al aplicar el patrón de penetración gradual.

## 4.7 Validación

- Las pruebas econométricas y criterios estadísticos habituales.
- Se realizó una regresión a escala nacional de la demanda de gas natural y gas LP, y su proyección correspondiente, cuyos resultados fueron semejantes a la suma de las proyecciones estatales (véase gráfica 18).

## 4.8 Diferencias en relación con los resultados de la Prospectiva anterior

A largo plazo las nuevas cifras de gas natural llegan al mismo nivel que la proyección anterior. La nueva versión varió en función de los siguientes elementos (véase gráfica 19):

- La incorporación de una nueva base de datos con consumos estandarizados por su poder calorífico, resumiendo información histórica de PGPB y de los distribuidores privados.
- El cambio en los escenarios macroeconómicos.
- La incorporación de una base actualizada de temperaturas medias mensuales por estado.
- La actualización de las fechas de inicio de operaciones de las ZG y de los grados de penetración.
- La incorporación de nuevas ZG de distribución y la correspondiente proyección de conducción de gas en el sector por parte de los distribuidores privados.

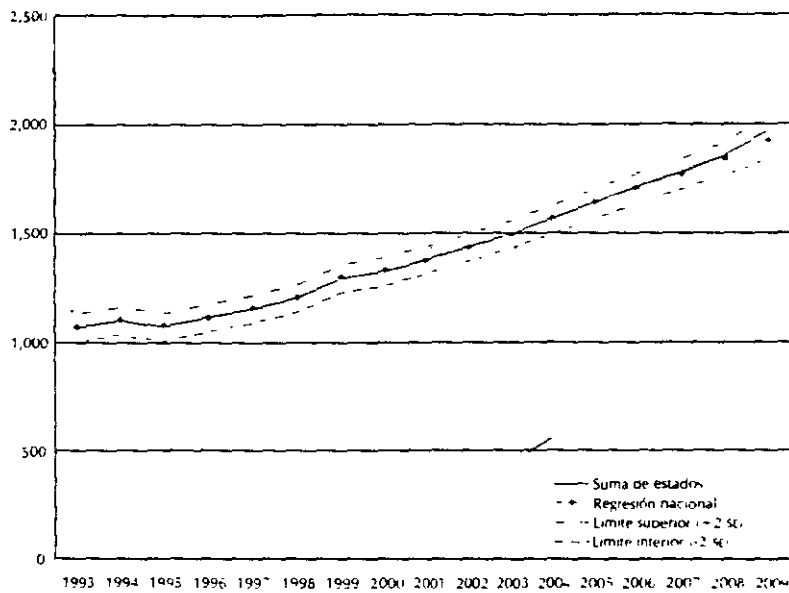
**Cuadro 67**  
**Demanda de gas natural por zona geográfica del sector residencial y de servicios, 1999-2009**  
**(miles de metros cúbicos diarios)**

Zona geográfica	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	tmca
El Bajío	-	1	6	27	62	111	157	180	197	200	216	78
Baja California	0	-	-	3	25	61	114	163	200	236	290	166
Cananea	39	32	33	35	36	38	39	41	42	42	42	1
Cancún	-	-	-	0	1	2	6	14	24	34	43	141
Cuernavaca	-	-	-	0	1	4	12	27	41	50	54	157
Chihuahua	31	115	176	239	296	350	400	414	419	423	426	30
Distrito Federal	80	264	457	677	915	1,234	1,598	1,818	1,918	1,985	2,064	38
Guadaluajara	0	1	3	12	45	134	300	515	712	855	951	132
Hermosillo	-	109	154	186	250	253	281	294	305	315	324	13
Juárez	415	428	443	474	523	579	624	651	665	672	677	5
La Laguna	-	-	18	63	143	229	287	317	334	351	368	46
Merida	-	-	-	0	1	3	9	20	33	44	53	133
Mexicali	2	17	40	75	114	146	166	178	188	196	205	56
Monterrey	1,299	1,634	1,805	1,994	2,032	2,194	2,301	2,376	2,432	2,502	2,591	7
Nuevo Laredo	56	84	87	87	88	90	92	94	95	97	99	6
Pachuca	-	-	-	0	0	1	4	9	16	23	29	92
Piedras Negras	54	62	68	73	78	84	89	94	99	103	109	7
Puebla-Tlaxcala	-	0	4	21	64	144	236	289	325	329	361	77
Querétaro	31	32	45	71	114	136	185	223	247	271	300	26
Río Pánuco	0	20	34	65	75	103	122	132	137	140	142	84
Saltillo	49	82	107	140	187	225	252	269	283	297	312	20
Estado de Tamaulipas	-	10	25	56	113	117	129	134	137	139	141	34
Tijuana	-	-	-	-	2	7	26	65	126	193	246	133
Toluca	0	21	60	156	207	237	247	256	267	278	293	99
Valle												
Cuautitlán-Texcoco	52	102	206	417	742	1,389	1,839	2,131	2,284	2,400	2,531	47
Veracruz	-	-	-	-	0	1	2	6	12	21	28	121
<b>Total nacional</b>	<b>2,110</b>	<b>3,015</b>	<b>3,773</b>	<b>4,870</b>	<b>6,112</b>	<b>7,872</b>	<b>9,516</b>	<b>10,708</b>	<b>11,537</b>	<b>12,197</b>	<b>12,893</b>	<b>20</b>

\* Tasa de crecimiento a partir del primer año de operación

Fuente: Elaboración con base en información de Conapo, CNA, CRE, IMP, INEGI y Pemex

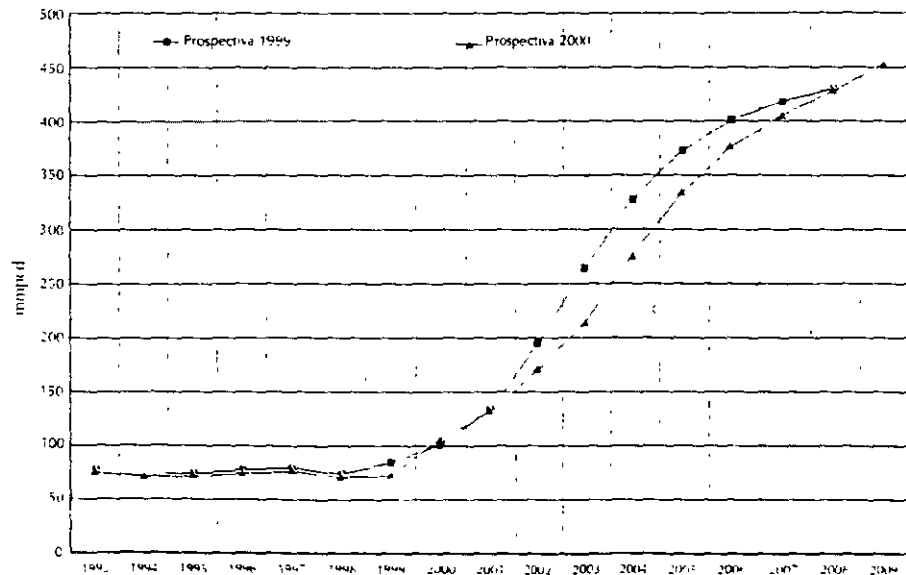
**Gráfica 18**  
**Demanda de gas natural y gas LP del sector residencial y de servicios, 1993-2009**  
**Escenario base**  
**(millones de pies cúbicos diarios)**



SE Error estándar de la proyección media

Fuente: IMP con base en CNA, Conapo, CRE, INEGI y Pemex

**Gráfica 19**  
**Demanda nacional de gas natural en el sector residencial y de servicios, 1993-2009**  
**Comparación de proyecciones**  
**Escenario base, mmpcd**



Fuente: IMP con base en CNA, Conapo, CRE, INEGI y Pemex

## 5. Sector transporte vehicular

### 5.1 Objetivos

- Determinar los factores de penetración del uso del gas natural comprimido en la ZMM como un combustible sustituto de gasolina y diesel en los vehículos automotores, aplicando tres escenarios: base, moderado y alto.
- Pronosticar el consumo de gas natural para el periodo 2000-2009 en el sector transporte vehicular de la ZMM, con base en los patrones de penetración establecidos.

### 5.2 Innovaciones

Para diseñar los patrones de penetración de los escenarios base y moderado, se estudió la experiencia de Argentina, estimando un periodo de maduración del mercado que se aplicó en esta proyección.

### 5.3 Supuestos y limitaciones

Esta proyección se desarrolló con base en los siguientes elementos:

- Cifras actualizadas que corresponden al número de vehículos por tipo, que conforman el parque vehicular en la ZMM en el año 1998 (véase cuadro 44 del tercer capítulo).
- Información y supuestos técnicos sobre recorridos anuales, rendimientos y eficiencias por cada tipo de vehículo.
- Tasas de crecimiento esperadas para el periodo de proyección por tipo de vehículo.

- Los avances por parte del GDF y del Gobierno del Estado de México en los programas y financiamientos para la conversión de unidades y la adquisición de nuevos vehículos a GNC.
- Supuestos sobre el grado de máxima penetración de los vehículos a GNC en la ZMM.
- El supuesto de que el tiempo de maduración del mercado de GNC en la ZMM será similar al que experimentó Argentina.

### 5.4 Patrones de penetración

En la gráfica 20 se representa el número de conversiones por año que tuvieron lugar en Argentina en el periodo 1984-1998. Se estimó una curva logística con estos datos con un excelente ajuste como se puede apreciar en los siguientes resultados:

$$\text{conversiones} = \frac{326,257.51}{[1 + \exp(5.40 - 0.51 * \text{tiempo})]}$$

(49.46)                      (57.74)    (-29.44)

$$R^2 = 0.999 \qquad F = 5,674.34 \qquad DW = 1.51$$

De este ejercicio se deriva un patrón de penetración en forma de una curva logística con un periodo de maduración de mercado de 21.2 años, lo cual se puede aproximar con una distribución normal con media de 10.6 años y desviación estándar de 3.3 años. Este patrón se aplica en conjunto con los porcentajes de máxima penetración enumerados para cada tipo de vehículo en el cuadro 44 del capítulo 3.

### 5.5 Cálculo de la proyección

Los cálculos empleados para la estimación del consumo de gas natural comprimido se ejemplifican aquí con el caso de los microbuses del Estado de México al año 2004:

**A Crecimiento del parque vehicular** (4) = (1)\*(2)^(3)  
 13,440 Microbuses Edo. Méx. en el 2004 (4)  
 11,934 Microbuses Edo. Méx. en el 1998 (1)  
 1.02 Factor de crecimiento (2)  
 6 Periodo de tiempo desde 1998 (3)

**B Número de vehículos a GNC** (6) = (4)\*(5)  
 1,535 Microbuses Edo. Méx. a GNC en el 2004 (6)  
 13 = 11 Microbuses Edo. Méx. en el 2004 (4)  
 0.114 Factor de penetración para el 2004 (5)

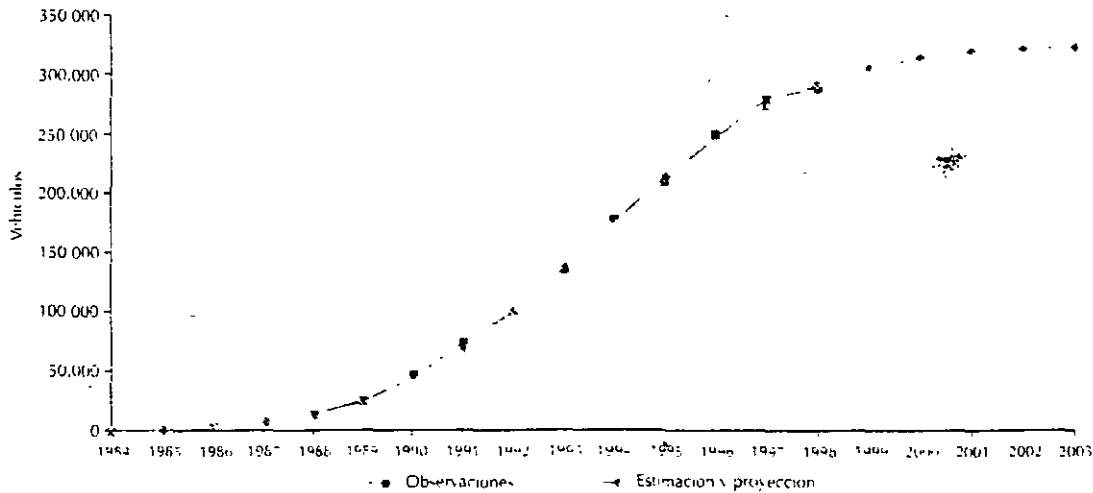
**C Ajuste anual del rendimiento de los vehículos** (10) = (7)\*(8)^(9)  
 3.63 Rendimiento de microbuses Edo. Méx. en el 2004, km/l (10)  
 3.00 Rendimiento de microbuses Edo. Méx. en 1996, km/l (7)  
 1.024 Factor de crecimiento (8)  
 8 Periodo desde 1996 (9)

**D Ventas de combustible** (12) = (11)/(10)  
 21,576 Consumo de gasolina por vehículo, microbuses Edo. Méx., en el 2004. (12)  
 78,250 Recorrido anual promedio, km (11)  
 3.63 Rendimiento de microbuses Edo. Méx. en el 2004, km/l (10)

**E Consumo de gas natural por vehículo** (14) = (12)\*(13)  
 0.0019596 Consumo de gas natural por vehículo al 2004 (mmpcd) (14)  
 21,576 Consumo de gasolina por vehículo, microbuses Edo. Méx. en el 2004, l (12)  
 9.08228E-08 Factor de conversión de litro de gasolina a mmpcd de gas natural (13)

**F Consumo de GNC** (15) = (14)\*(6)  
 3.01 Consumo de gas natural microbuses Edo. Méx. en el año 2004 mmpcd de GNC (15)  
 0.0019596 Consumo de gas natural por vehículo al 2004 (mmpcd) (14)  
 1,535 Microbuses Edo. Méx. a GNC en el 2004 (6)

**Gráfica 20**  
**Conversiones a gas natural comprimido en Argentina, 1984-2003**



Fuente: INP con base en "Argentina: la red de distribución de GNC más grande del mundo", *Prensa Vehicular*, Argentina, julio de 1999

## 5.6 Diferencias en relación con los resultados de la Prospectiva anterior

Los resultados obtenidos en esta Prospectiva difieren de la anterior en los siguientes puntos:

- Los datos del parque vehicular fueron actualizados y ajustados considerando la información que proporcionaron en su oportunidad las siguientes dependencias:
  - Dirección General de Servicios al Transporte y Vialidad, Secretaría de Transportes, GDF.

- Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del GDF.
- Dirección de Programación, Normatividad y Estudios de Transporte del Gobierno del Estado de México.

- En lo que se refiere al recorrido por km anual de los vehículos de carga pesados y no pesados se ajustó de 15,000 a 20,000 km.
- En el cuadro 68 se aprecian algunas de las diferencias más representativas.

**Cuadro 68**  
**Demanda de gas natural del sector autotransporte, 1999-2009**  
**Diferencias entre versiones 1999 vs 2000**  
**mmpcd**

Escenario base

Año	Versión 1999	Menos diferencia por cambio en el parque	Parque 2000 con penetración 1999	Menos diferencia por cambio en penetración*	Versión 2000
1999	1.2	-0.3	1.0	0.1	1.0
2000	4.0	-0.8	3.2	0.0	3.2
2001	7.2	-1.4	5.7	-0.2	5.5
2002	12.2	-3.1	9.2	-0.4	8.7
2003	20.0	-5.8	14.2	-0.8	13.3
2004	30.5	-8.3	22.2	-1.5	20.7
2005	44.0	-10.0	34.0	-2.4	31.5
2006	60.6	-10.8	49.7	-3.8	45.9
2007	79.6	-10.6	69.0	-5.6	63.4
2008	99.9	-9.4	90.6	-7.7	82.9

\* Incluye cambio en el incremento del rendimiento de los vehículos Combi (DF y Edo. Méx.)  
 Fuente: IMP con base en Ecomex, CDF, Gob. Edo. Méx. y Pemex.