

COMISION ECONOMICA PARA AMERICA LATINA  
COMITE DE COOPERACION ECONOMICA DEL  
ISTMO CENTROAMERICANO  
SUBCOMITE CENTROAMERICANO DE ELECTRIFICACION  
Y RECURSOS HIDRAULICOS

LIMITADO  
CCE/SC.5/GRIE/II/DI.1  
Abril de 1975

Grupo Regional sobre Interconexión Eléctrica  
Tercera Reunión  
San José, Costa Rica, 24 y 25 de abril de 1975

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
MEXICO

SISTEMA INTEGRADO DE PLANEACION DEL SECTOR ELECTRICO

1000

1000

1000

1000

1000

INDICE

	<u>Página</u>
1. Introducción	1
2. Objetivos y decisiones de la industria eléctrica del sector público	1
3. ¿Cómo, cuándo y dónde?	2
4. Consideraciones sobre los modelos que forman el sistema integrado de planeación del sector eléctrico	3
a) Modelo Nacional de Inversiones (MNI)	7
b) Modelo PROLOG	9
c) Modelo LOG	9
d) Modelo México	9
e) Modelo concentrable	11
f) Modelo de coordinación hidro-térmica	11
g) Modelo valuador	11
h) VALRED (valuador con red)	14
5. Metodología del sistema integrado de planeación del sector eléctrico	15
6. Esquema general de planeación	15
7. Los estudios a mediano plazo	17
8. Los estudios a corto plazo	17
9. Esquema general de planeación	18

## 1. Introducción

Se presenta un sistema de cálculo aplicado a la planeación de los sistemas eléctricos. Un sistema de planeación puede dar lugar a una estructura de modelos compleja, que necesitan un gran número de consideraciones cualitativas derivadas de la experiencia. La complejidad de cada modelo queda limitada por las características de los equipos de cálculo actuales.

Es muy conveniente recalcar que los modelos son guías imprescindibles para tomar decisiones relativas a los sistemas eléctricos. Los problemas técnicos y económicos se han hecho demasiado complejos y de consecuencias graves para que se tomen decisiones cuyas implicaciones financieras y técnicas no se hayan medido previamente. Los métodos de análisis permiten determinar el costo mínimo del desarrollo del sistema, tomando en cuenta las restricciones técnicas y financieras correspondientes.

La metodología del Sistema Integrado de Planeación del Sector Eléctrico se estableció en el marco de un proyecto conjunto entre la Comisión Federal de Electricidad y Electricité de France. Esta metodología es original en el sentido de que gran parte de los modelos se inspiraron en las experiencias de EDF y se acoplaron a los modelos ya existentes en CFE, lo que dio como resultado un conjunto único que combina los métodos de cálculo más eficientes que se conocen, con un análisis lógico de las decisiones a tomar en cuanto al desarrollo de los medios de generación y de transmisión.

## 2. Objetivos y decisiones de la industria eléctrica del sector público

El objetivo principal de una empresa eléctrica como CFE es, tomando en cuenta las posibilidades económicas y energéticas del país, satisfacer la demanda a un cierto nivel de seguridad, a costo mínimo. La tarea básica de planeación es encontrar un programa de obras para lograr dicho objetivo.

Es necesario distinguir entre las líneas directrices del desarrollo del sistema eléctrico a largo plazo (hasta 20 o 30 años) y el plan de construcción de obras a medio y corto plazo (hasta 10 años). En el primer caso, dada la incertidumbre del futuro, ya sea en la demanda, desarrollo tecnológico, disponibilidad de energéticos, etc., no se puede definir con

precisión la estructura futura de los equipos de generación y transmisión, siendo que sólo es posible establecer la trayectoria del desarrollo para definir las hipótesis de trabajo (estrategias), que sirven como base a los estudios de instalaciones a mediano y corto plazo (tácticas). En esta última etapa se formulan las inversiones necesarias para la construcción del programa de obras que permite la realización de los objetivos de la empresa. El proceso de planeación debe ser completamente adaptable para permitir tomar en cuenta el efecto de la variación de los parámetros debidos a la incertidumbre del futuro. Resumiendo, el proceso de toma de decisiones para lograr los objetivos de la empresa se divide en tres niveles:

- a) Definición de líneas directrices a largo plazo que toman en cuenta los problemas que plantea la incertidumbre del futuro;
- b) Definición de un programa de obras a medio plazo adaptable a las líneas directrices del largo plazo, y
- c) La toma de decisiones para la construcción de obras, que es la conclusión lógica del proceso de planeación.

El proceso de planeación debe permitir que la toma de decisiones para la construcción de obras sea oportuna para tomar en cuenta los tiempos de construcción de las instalaciones.

El problema de la selección de inversiones en un sistema eléctrico es bastante complejo, ya que para cada decisión interviene un gran número de factores y sobre todo la influencia o relaciones existentes entre las distintas decisiones.

### 3. ¿Cómo, cuándo y dónde?

Las respuestas básicas que deben encontrarse mediante los estudios involucrados en el proceso de planeación son:

Cómo se deben combinar los distintos equipos de generación y transmisión para lograr los objetivos de la empresa;

Cuándo se deben instalar dichos equipos, y

Dónde se deben construir.

Dada la complejidad del problema y las limitaciones de los dispositivos de cálculo actuales, tomando en cuenta las consideraciones

/anteriormente

anteriormente expuestas, el problema de planeación puede resolverse mediante descomposición en dos dimensiones, de forma que en la primera etapa se determina el cómo y cuándo del equipo de generación y en la segunda etapa se obtiene el cuándo y dónde del equipo de transmisión y el dónde del equipo de generación. Una vez establecida esta jerarquización, que permite estudiar primero el desarrollo de los medios de generación, y después, dado el conjunto de generación, estudiar el desarrollo de la red de transmisión, permite asimismo establecer un proceso repetitivo si se afectan los medios de generación por los costos de la red asociada a ellos. El proceso termina cuando la red ya no afecta sensiblemente el desarrollo de los medios de generación.

Lo anterior dio lugar a una descomposición geográfica y en el tiempo como se ilustra en la figura 1. La descomposición geográfica debe llevarse desde los estudios puntuales para obtener valores iniciales del desarrollo de los medios de generación, hasta las redes nacionales en largo plazo; desde el programa de plantas generadoras hasta las redes regionales en el medio plazo y desde los estudios detallados de la red nacional hasta los estudios de distribución en el corto plazo. La figura 1 se explica detalladamente en el cuadro 1. El proceso de planeación se desarrolla según el cuadro, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. La letra n representa el año actual, en estas condiciones el período de estudios del largo plazo es entre el año 10 y el año 30 del futuro, el del medio plazo entre el año 5 y el 10 y el del corto plazo entre el 3 y el 5. El traslape de los años 10 y 5 es por la necesidad de tomar como valores de frontera los resultados del largo plazo para el horizonte del medio plazo y los resultados de éste para el horizonte del corto plazo.

#### 4. Consideraciones sobre los modelos que forman el sistema integrado de planeación del sector eléctrico

Para llevar a cabo el conjunto de estudios anteriormente descrito, se cuenta con un grupo de modelos cuyas funciones y características son apropiadas a la solución de los problemas que les corresponden. Como se sabe, existe una relación muy estrecha entre la complejidad de la formulación de los modelos

Cuadro 1

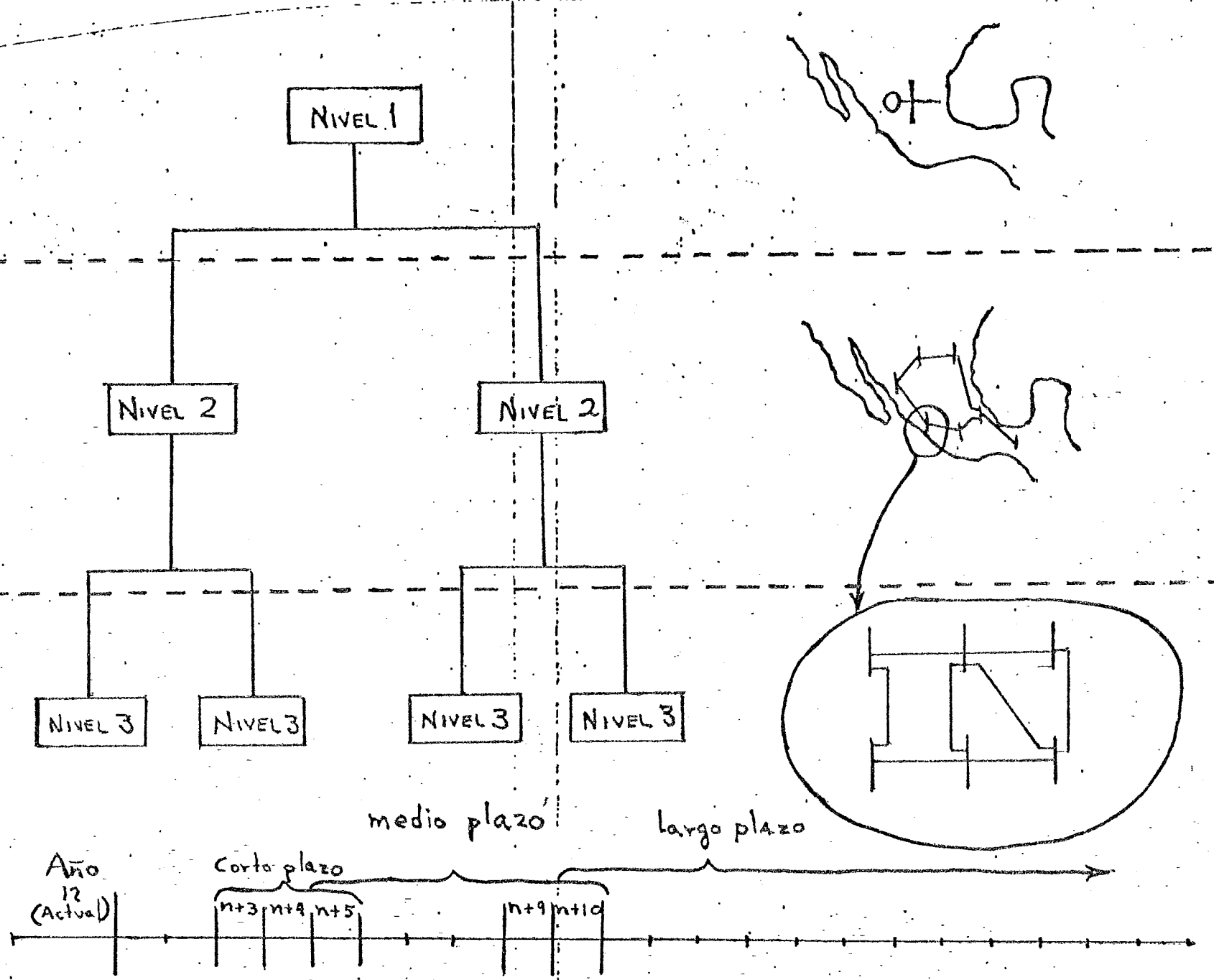
DESCOMPOSICION DEL PROBLEMA DE POBLACION <sup>\*/</sup> <sup>\*\*/</sup>

	Estudios sin red	Estudios de la red nacional	Estudios de las redes regionales	Estudios de las redes de distribución
Largo plazo de (n+10) a (n+30)	Estrategia de desarrollo de los medios de producción	Líneas directrices del desarrollo de la red nacional y localización de los medios de producción		
Medio plazo de (n+5) a (n+10)	Programa de plantas	Localización de las plantas y programas de obras de la transmisión nacional	Localización de las subestaciones de transformación y programa de obras de transmisión regionales	
Corto plazo de (n+3) a (n+5)		Estudios detallados de la red nacional	Estudios detallados de las redes regionales	Localización de los transformadores de distribución y estudios detallados de las redes de distribución

\*/ En el tiempo: verticalmente.

\*\*/ Geográfica: horizontalmente.

FIG 1. NIVELES Y PLAZOS PARA LA PLANEACION DE SISTEMAS ELECTRICOS



17 1a



y la fidelidad con la cual se aproximan a la realidad. El problema de planeación del sistema eléctrico de CFE es un problema dinámico estocástico embebido en la macroeconomía del país. En estas condiciones, la metodología del proceso de planeación debe tomar en cuenta lo mejor posible estas características. El sistema integrado de planeación del sector eléctrico puede relacionarse a la macroeconomía del país mediante los costos y disponibilidad de energéticos, pronósticos de demandas, desarrollo tecnológico, efectos económicos por fallas en el suministro de energía, etc. La gran ventaja que se tiene al contar con una herramienta de este tipo es el poder medir los efectos originados por cambios en diversos parámetros como los anteriores, y visualizar las consecuencias de tal o cual política de desarrollo del sector eléctrico.

A continuación se describen brevemente las características de los principales modelos que forman el Sistema Integrado de Planeación del Sector Eléctrico.

#### a) Modelo Nacional de Inversiones (MNI)

Las características del MNI se muestran en forma esquemática en la figura 2, que representa un diagrama de entrada-salida. Además se da idea del propósito del modelo, que consiste en estudiar el desarrollo a largo plazo de los medios de generación, para el cual busca la política de inversiones que durante un período a largo plazo, minimiza el costo global actualizado de la inversión, la operación y de la energía esperada no suministrada, de tal forma que ese desarrollo permita satisfacer el desarrollo previsto de la demanda.

A partir de un pronóstico de la demanda y de la definición de un conjunto de medios tecnológicos de generación, el modelo determina las potencias por instalar para cada uno de estos medios en el período de estudio. Como debe operar también este conjunto al costo mínimo, tiene un sub-modelo que fija reglas de funcionamiento de los medios usados.

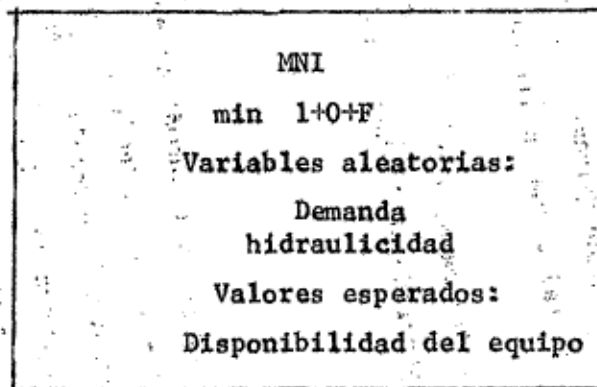
Se consideran como aleatorias las variables de demanda, hidráulicidad y disponibilidad del equipo. La formulación consiste en un modelo dinámico, no lineal, para el cual se utiliza el enfoque del control óptimo.

/Figura 2

Figura 2

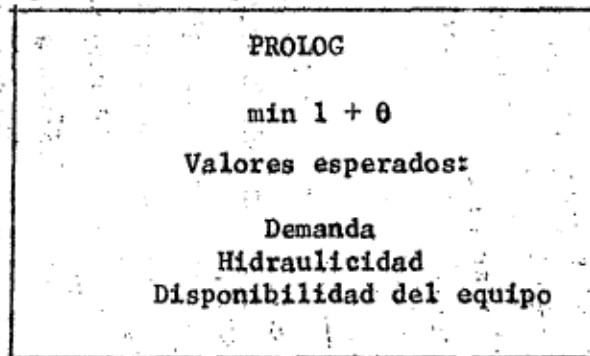
CARACTERISTICAS DEL MNI Y PROLOG

1. Demanda (C D C's)
2. Características físicas del sistema
3. Costos
4. Límites de instalación



Modelo dinámico no lineal  
(Control óptimo)

1. Demandas máximas y de base por nodo
2. Características físicas del sistema incluyendo la red
3. Costos
4. Límites de instalación en cada nodo (restricciones de sitio)



Modelo de programación lineal  
determinístico

1. Desarrollo futuro del sistema (producción)
2. Operación del sistema
3. Consumo de energéticos
4. Costo de la expansión
5. Valores de uso del equipo

1. Localización de la capacidad en los nodos (continúa)
2. Red necesaria (determinística y continua)
3. Costos de inversión y operación

b) Modelo PROLOG

Sus características se observan en la figura 2.

Es un modelo de red que determina la localización óptima de una potencia total por instalar en un año dado. Minimiza el costo de inversión en líneas de transmisión necesarias para asegurar de la mejor manera posible la demanda en cada nodo de la red, así como el costo de inversión y operación de la generación. Da también una idea de los flujos de energía que pasan en cada una de las líneas. Toma en cuenta restricciones de sitio y su formulación consiste en un modelo de programación lineal determinístico.

c) Modelo LOG

Es un modelo de red (véase la figura 3) que determina los refuerzos necesarios en una red de transmisión para que ésta pueda asegurar los suministros de energía que sufren cambios motivados por los cambios de estado debido a las fallas aleatorias en plantas y líneas.

Al simular los cambios de energía del sistema en un cierto número de casos, el modelo determina las ganancias obtenidas sobre el costo de falla por los refuerzos posibles y escoge el que en comparación a su costo de inversión, muestra el mayor interés económico. En este modelo las leyes eléctricas de la red se representan únicamente por la primera ley de Kirchhoff. La formulación consiste en un modelo probabilístico de flujo máximo que utiliza el algoritmo de Ford-Fulkerson y los refuerzos de red se hacen en forma discreta.

d) Modelo México

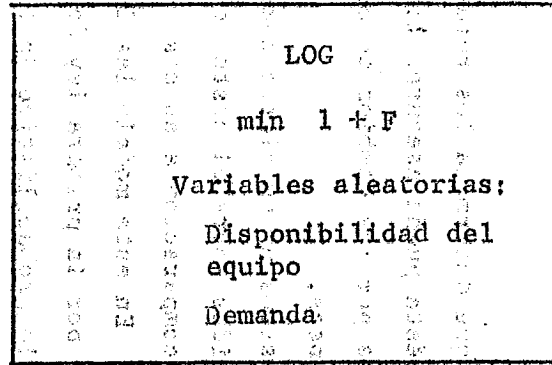
Es un modelo de confiabilidad compuesta (generación y red) (véase de nuevo la figura 3), que mide el nivel de seguridad en el suministro de energía para una red dada. Simula un gran número de situaciones diferentes para calcular la energía que no se puede suministrar en cada nodo, este es el indicador adoptado.

En este modelo se toman en cuenta las dos leyes de Kirchhoff con una aproximación lineal de tal manera que en un evento dado la determinación de

Figura 3

CARACTERISTICAS DEL LOG Y MEXICO

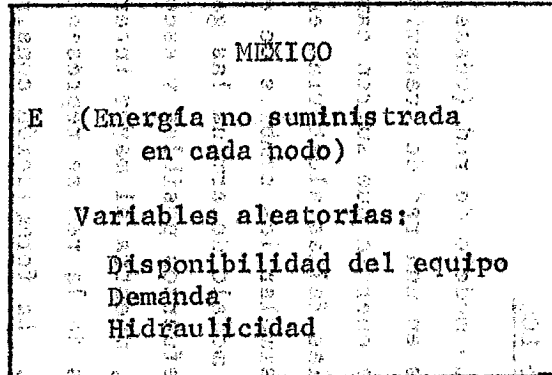
1. Curva de demanda (CDC)
2. Características físicas del sistema
3. Costos



1. Refuerzos de la red (Discretos)
2. Beneficios relativos
3. Falla anual y su costo

Modelo probabilístico para cálculo de refuerzos de red

1. Demandas en cada nodo
2. Características físicas del sistema incluyendo la red



1. Energía no suministrada esperada en cada nodo
2. Flujos medios en líneas y frecuencia de fallas
3. Ganancias marginales

Modelo probabilístico de confiabilidad compuesta

los flujos de energía que circulan en la red, se obtienen de la solución de un programa lineal.

e) Modelo concentrable

Se trata de un modelo (véase la figura 4) que determina las posibilidades de producción de un conjunto de plantas hidráulicas. A partir de una política fija de operación, bajo la forma de extracciones o almacenamientos, cada mes el modelo calcula en varios bloques horarios curva de duración de carga del mes, la potencia que puede producir el sistema hidráulico.

Un criterio adicional permite orientar esta producción. En efecto para valorizar al máximo el agua usada se busca una "concentración" máxima, es decir, produce la mayor cantidad de energía hidráulica en las horas cargadas.

Este modelo da una curva de oferta de la energía hidráulica, compatible en el tiempo con la curva de duración de carga del sistema de la demanda total para obtener la demanda térmica.

f) Modelo de coordinación hidro térmica

El concentrable necesita como dato una política de operación, por lo tanto se requiere un modelo que asegure la determinación de una operación óptima de los medios hidráulicos.

Esta es la meta del modelo de coordinación hidro térmica (véase de nuevo la figura 4). Su formulación consiste en un modelo de control óptimo.

g) Modelo valuator

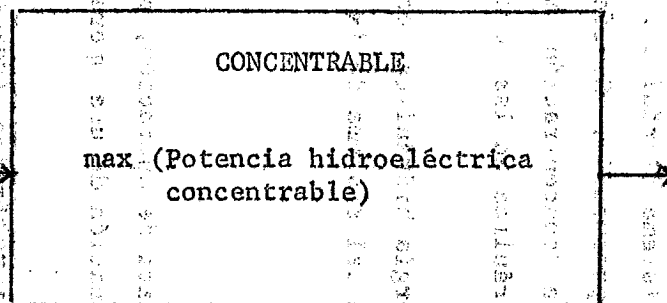
Este modelo (véase la figura 5) estima el costo de inversión y operación correspondiente a una política a medio plazo del desarrollo de los medios de generación.

Simula el comportamiento de los Sistemas Eléctricos en forma puntual año con año, enfrentando una alternativa de expansión (previamente establecida) a las demandas pronosticadas o supuestas en el futuro.

Figura 4

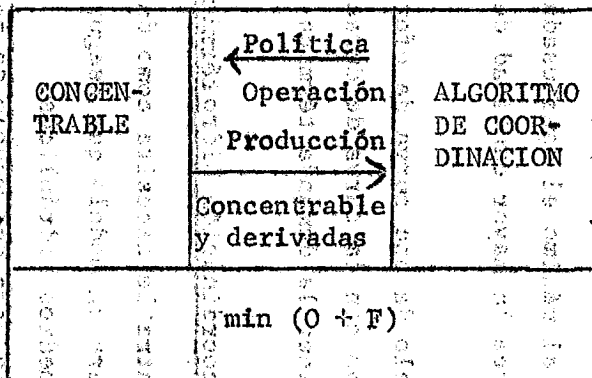
CARACTERISTICAS DEL CONCENTRABLE Y COORDINACION HIDROTÉRMICA

1. Aportaciones hidráulicas
2. Características físicas de las plantas hidroeléctricas
3. Duración de la demanda en la CDC
4. Políticas de operación



1. Curvas de potencia y energía hidráulica concentrada

1. Demandas (C D C's)
2. Características físicas del sistema
3. Política de mantenimiento y disponibilidad de plantas hidro
4. Mantenimiento global del térmico
5. Costos de operación y falla



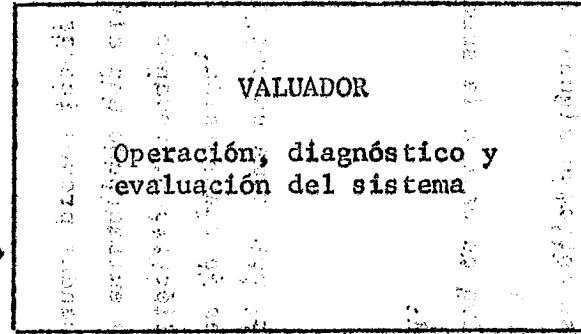
1. Tasas de vaciado
2. Tasas de mantenimiento
3. Costos de operación
4. Costos marginales
5. Operación del sistema

Modelo del control óptimo

Figura 5

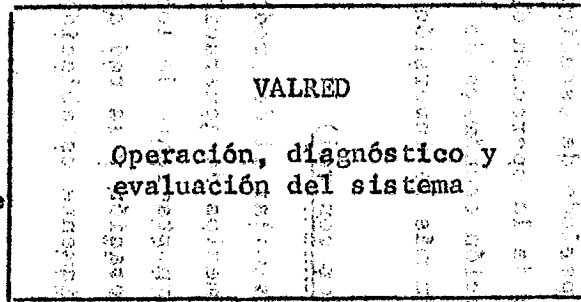
CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS VALUADOR Y VALRED

1. Demandas del periodo de estudio
2. Programa de obras
3. Características físicas
4. Costos
5. Sistemas existentes al inicio del estudio



Simulación del conjunto de generación

1. Demandas del periodo de estudio
2. Programa de obras
3. Características físicas del conjunto de generación.
4. Costos
5. Sistema existente al inicio del estudio



Simulación compuesta de generación y red

1. Diagnóstico de factibilidad
2. Mantenimiento
3. Confiabilidad de generación
4. Operación
5. Consumos de combustibles
6. Evaluación económica

1. Diagnóstico de factibilidad
2. Mantenimiento regionalizado
3. Confiabilidad compuesta de generación y red
4. Operación con red
5. Consumos de combustibles
6. Evaluación económica

Los resultados obtenidos del valuator consisten en:

- a) Un programa de mantenimiento de todas las máquinas del sistema, durante todo el período de estudio que puede consistir en varios años;
- b) Los valores de la probabilidad de pérdida de carga mes por mes de cada año, que proporcionan un índice de la confiabilidad anual del sistema en términos del número de días por año que se espera perder carga;
- c) La localización del conjunto hidroeléctrico sobre las curvas de duración de carga del sistema para cada año del período de estudio;
- d) La operación del conjunto térmico del sistema consistente en la generación, consumos y costos de operación para cada máquina del sistema y para cada año del período de estudio. También se obtienen algunas características físicas de la operación del conjunto, y
- e) La evolución económica de la alternativa en base a la suma de los costos de operación más la inversión actualizada.

h) VALRED (valuador con red)

Su papel es similar al del modelo valuator, pero toma en cuenta el desarrollo de los medios de generación y de redes de transmisión.

Simula el comportamiento de los Sistemas Eléctricos, tomando en cuenta el conjunto de generación y la red año con año y enfrentando una alternativa de expansión (previamente establecida) a las demandas pronosticadas o supuestas en el futuro.

Los resultados obtenidos del VALRED consisten en:

- a) Un programa de mantenimiento para todas las unidades del sistema en forma regionalizada, es decir, tomando en cuenta la necesidad de disponer de reservas regionalizadas o de área;
- b) Resumen sobre la factibilidad o no factibilidad de operación de la alternativa de expansión propuesta;
- c) Cálculo de la confiabilidad compuesta del sistema que proporciona indicadores sobre la calidad de la energía suministrada por el sistema;
- d) Un esquema de operación del conjunto de Plantas Hidroeléctricas consistente en su localización dentro de las curvas de demanda, y

/e) El cálculo



e) El cálculo de la generación térmica por nodo, mediante un programa de reparto económico de carga con el fin de establecer además de las generaciones por planta, los consumos y los costos de generación, tomando en cuenta las restricciones físicas y efectos causados por la red.

#### 5. Metodología del sistema integrado de planeación del sector eléctrico

Ahora se indica cómo a partir del conjunto de los modelos descritos anteriormente es posible establecer una metodología general de planeación de las inversiones eléctricas coherentes con el marco lógico descrito en el cuadro 1. Se observan nuevamente las dos descomposiciones indicadas en el tiempo y en el espacio.

#### 6. Esquema general de planeación

Los estudios a largo plazo se realizan en el período ( $n+10$ ,  $n+30$ ) con los modelos MNI, PROLOG y LOG ( $n$  es el año en el cual se hace el estudio). El objetivo de este estudio a largo plazo es obtener las líneas directrices del desarrollo futuro del conjunto de generación, específicamente para escoger entre los tipos posibles de medios así como los problemas que tal desarrollo plantea al nivel de la red de transmisión. Para un conjunto único de hipótesis económicas el estudio correspondiente se puede realizar con una corrida del MNI para todo el período y algunas corridas de PROLOG y LOG para estudiar la localización de los medios de generación y el desarrollo de la red en dos años característicos ( $n+15$ ) y ( $n+25$ ) por ejemplo.

El funcionamiento de este conjunto se puede organizar según dos esquemas posibles: jerárquico o articulado (véase la figura 6).

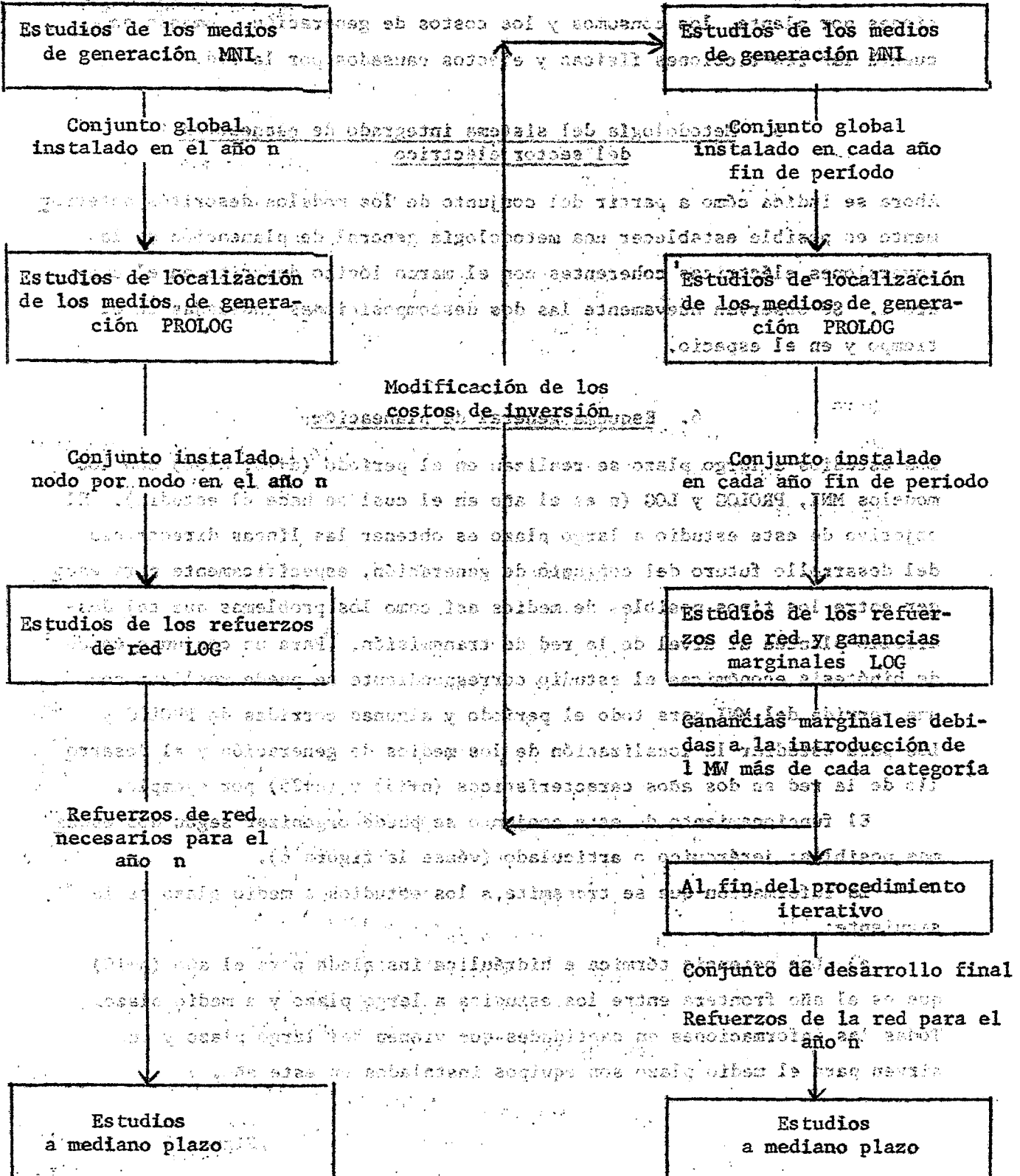
La información que se transmite a los estudios a medio plazo es la siguiente:

a) Una potencia térmica e hidráulica instalada para el año ( $n+10$ ) que es el año frontera entre los estudios a largo plazo y a medio plazo. Todas las informaciones en cantidades que vienen del largo plazo y que sirven para el medio plazo son equipos instalados en este año, y

Figura 6

ESQUEMA JERARQUICO

ESQUEMA ARTICULADO



b) Valores de uso en el año  $(n+10)$  de los equipos de generación, que van a servir de valores residuales para el modelo valuator.

### 7. Los estudios a mediano plazo

Se llevan a cabo para los medios de generación y la red, y permiten definir con más precisión el programa de inversiones en medios de generación entre los años  $(n+5)$  y  $(n+9)$ , la localización correspondiente y la definición de la red a un nivel más fino (regional). Se llega a una definición precisa del sistema en el año  $(n+5)$ , que es la información fundamental transmitida a los estudios a corto plazo.

### 8. Los estudios a corto plazo

Los métodos usados son muy parecidos para la red Nacional y las redes Regionales de tal manera que la presentación será la misma para los dos.

El objetivo de estos estudios es determinar las redes de transmisión de los años  $(n+3)$  y  $(n+4)$ , dado que los medios de producción ya están decididos y localizados (excepto tal vez los medios de pico que no tienen en general restricciones de localización). El problema es encontrar a partir de las redes del año  $(n+5)$ , que resultan de los estudios a mediano plazo; las redes de los años  $(n+4)$  y  $(n+3)$  compatibles.

Tomando en cuenta que a este nivel se trata de entregar elementos para decisiones de instalación de líneas, la técnica a usar es la realización de estudios "costo-ventajas" en los cuales se comparan el costo y la valorización económica de las ventajas de la obra propuesta.

El grado de precisión buscado introduce una cierta prioridad para las restricciones técnicas, lo que necesita el uso de modelos de flujo y de estabilidad que permiten verificar la operabilidad del sistema.

Hay que señalar que para evitar todo problema de coherencia entre los estudios a mediano plazo y a corto plazo, el estudio del año  $(n+5)$  tiene que ser realizado con la misma precisión que los años representativos del corto plazo.

9. Esquema general de planeación

Para sintetizar el conjunto de las consideraciones que preceden, se pueden representar bajo la forma de un esquema todos los estudios propuestos, la comunicación de la información entre ellos y las decisiones a las cuales llegan (véase la figura 7). En el cuadro 2 se observan las características principales del conjunto de modelos que forman el Sistema Integrado de Planeación del Sector Eléctrico.

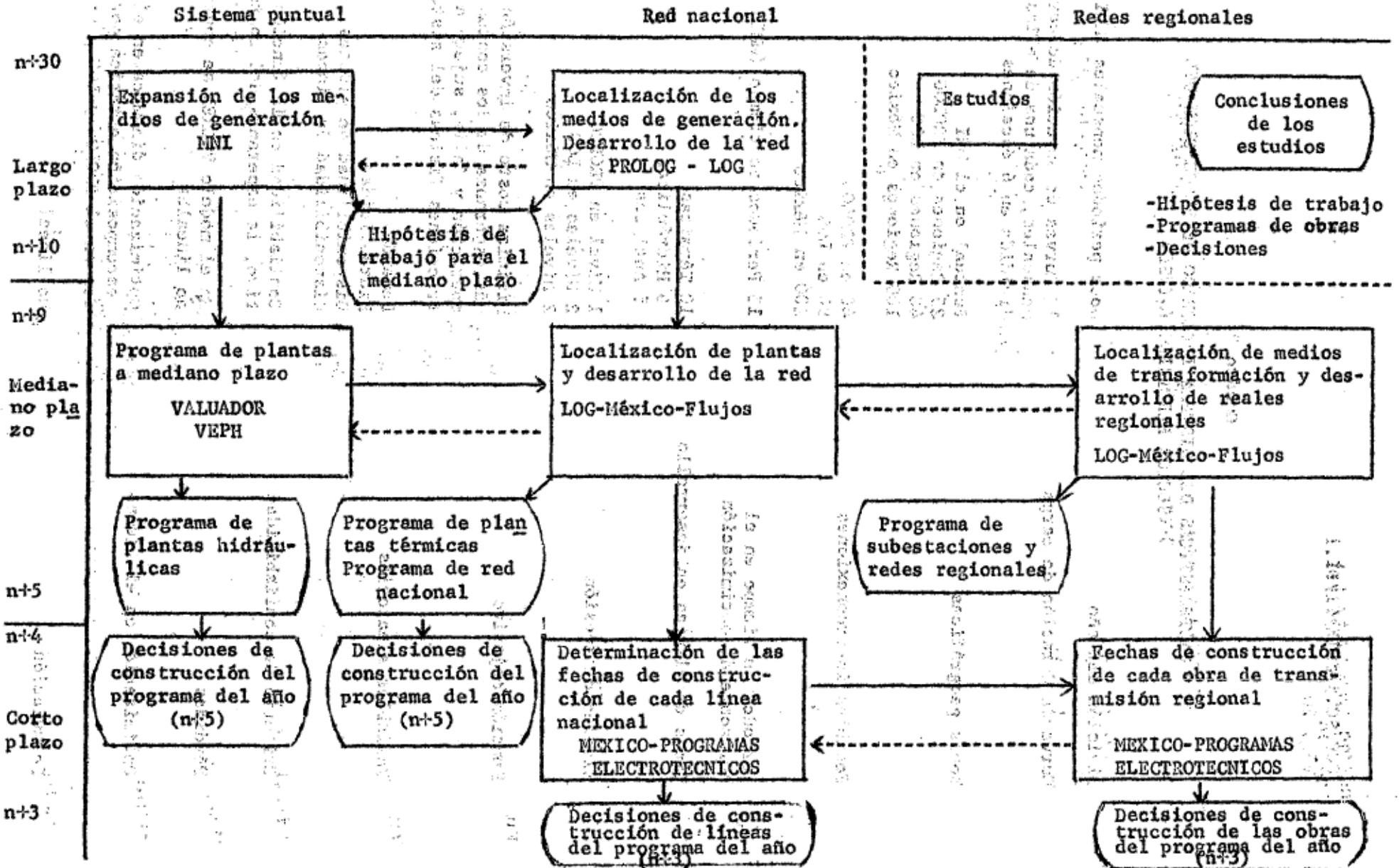
3. Los estudios a realizar

Los estudios a realizar para la planeación del sector eléctrico se clasifican en dos grandes grupos: los estudios de planeación y los estudios de diseño. Los estudios de planeación se refieren a los estudios que se realizan para determinar las necesidades de energía eléctrica y las características de los sistemas de generación, transmisión y distribución que deben satisfacerlas. Los estudios de diseño se refieren a los estudios que se realizan para determinar las características técnicas y económicas de los equipos y sistemas que se requieren para satisfacer las necesidades de energía eléctrica.

/Figura 7

Figura 7

ESQUEMA GENERAL DE PLANEACION



**Cuadro 2**

**CARACTERISTICAS DEL SISTEMA INTEGRADO DE PLANEACION DEL SECTOR ELECTRICO (SIPSE)**

División del año

Doce periodos mensuales (MNI)

Curva de duración de carga

12 Curvas de duración de carga mensuales, cada una de ellas dividida en 6 escalones

Zonas geográficas

Puntual en el MNI  
25 Regiones en PROLOG  
48 Regiones en LOG  
100 Regiones en México

Posibles interconexiones

40 en PROLOG  
90 en LOG  
200 en México

Periodos de tiempo en el horizonte de optimización

15 Periodos de tiempo (MNI)

Tipos de plantas en desarrollo

10 Térmicas  
6 Hidráulicas  
5 Antiguas

Niveles de tensión

1 Nivel en PROLOG  
2 Niveles en LOG  
2 Niveles en México

Función objetivo

Minimiza costo de inversión más esperanza de los costos de operación y falla, sujeto a restricciones físicas del sistema

Variables aleatorias

Demanda  
Hidráulicidad  
Disponibilidad de plantas  
Disponibilidad de líneas

Criterio de confiabilidad

Confiabilidad en la función objetivo, la esperanza del costo de falla

Pérdidas

En el modelo VALRED se consideran no lineales

Optimización en el tiempo

Optimización dinámica en el MNI  
Descomposición estática por periodos en el PROLOG y LOG

Formulación

No lineal