

La planificación de la ampliación de sistemas eléctricos

por A.J. Covarrubias

INTRODUCCION

La electricidad es tan importante para la economía mundial que algunos de sus índices se utilizan para expresar la situación económica (consumo o producción de electricidad per cápita) y el nivel de vida de que goza una población (consumo de electricidad per cápita en el sector doméstico). Además, el abastecimiento de electricidad posee características especiales que dan a este servicio, en comparación con otras industrias, un carácter único. El producto acabado ha de ser servido instantánea y automáticamente cuando lo pide el consumidor; si se exceptúan las centrales de embalse por bombeo y las baterías eléctricas, no existen tecnologías que permitan producirlo económicamente, acumularlo en grandes cantidades y suministrarlo en los plazos convenientes; una capacidad insuficiente (escasez), o una capacidad excesiva (no aprovechada) tiene efectos negativos en la economía; la estrecha interrelación con los factores económicos y sociales hace que el problema se complique al intervenir factores restrictivos de carácter laboral, ambiental, financiero, etc. Tiene por consiguiente gran importancia la planificación cuidadosa del sector eléctrico, pues las decisiones que se tomen implican la afectación de grandes recursos, con posibles riesgos económicos graves para las compañías eléctricas y la economía en general.

PLANIFICACION DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS

La planificación de los sistemas eléctricos forma parte de un problema más general, la planificación de la energía y del desarrollo económico. Su objetivo es, pues, definir una estrategia de costes mínimos para la ampliación a largo plazo de los sistemas de generación, transmisión y distribución adecuados para atender a la carga pronosticada, en unas condiciones técnicas, económicas y políticas dadas.

Tradicionalmente, por planificación de los sistemas eléctricos se entiende sobre todo la planificación del aumento de la capacidad de generación. Ello se debe principalmente a que la inversión que exigen las líneas de transmisión es una parte relativamente pequeña del capital necesario para la construcción de centrales, y a que las inversiones requeridas para la distribución de electricidad a los abonados, si bien importantes, son en gran medida independientes del sistema de generación y transmisión.

Las principales etapas de la planificación de un sistema eléctrico se pueden resumir como sigue:

- a) Estudio para pronosticar la carga eléctrica en un período futuro de cinco a treinta años, basado en la información más fidedigna.

El Sr. Covarrubias es miembro de la Sección de Estudios Económicos de la División de Energía Nucleoeléctrica y Reactores.

- b) Evaluación de los recursos energéticos disponibles en el futuro para la generación de electricidad y de las tendencias previsibles en los aspectos técnico y económico.
- c) Evaluación de las características económicas y técnicas de las unidades generadoras existentes y de las centrales que se consideren interesantes para la ampliación del sistema. Esas características son en particular los gastos de instalación, los gastos de combustible, los gastos de explotación y mantenimiento, el rendimiento, el tiempo de construcción, etc.
- d) Determinación de las características técnicas y económicas de las centrales disponibles para la ampliación.
- e) Determinación de los parámetros económicos y técnicos que influyen en las decisiones, por ejemplo el tipo de descuento, el nivel de fiabilidad que haya de tener el sistema generador, etc.
- f) Elección de un procedimiento para determinar la estrategia óptima de ampliación teniendo en cuenta los factores restrictivos existentes.
- g) Examen cualitativo de los resultados para juzgar la viabilidad de la solución propuesta.

Para determinar la mayor parte de estos datos hay que tener en cuenta el ambiente económico y técnico actual y futuro en el cual haya de actuar el sector eléctrico. Así, los recursos disponibles y los precios del combustible se ponen en relación con la política energética del país; se debe tener en cuenta, al pronosticar la demanda, la política actual y previsible de desarrollo económico; las tasas de interés y de subida de precios dependen también de la economía; el sistema debe tener una fiabilidad aceptable orientada hacia el futuro.

Dadas las numerosas variables englobadas en los problemas de ampliación de sistemas eléctricos, los planificadores han desarrollado numerosos modelos matemáticos para abordar la cuestión de manera sistemática — Referencias [1], [2].

EL PROGRAMA WASP PARA PLANIFICAR LA AMPLIACION DE LOS SISTEMAS DE GENERACION

En los últimos años, el OIEA ha prestado ayuda a numerosos Estados Miembros en la ejecución de estudios de planificación de sistemas eléctricos utilizando un programa de computadora llamado WASP (Wien Automatic System Planning Package, Lote de programas Wien para la planificación de sistemas automáticos) Ref. [3]. Este programa brinda un medio de calcular el calendario más económico para ampliar la capacidad de generación de un sistema eléctrico a plazo medio y largo. Constituye la segunda generación de un programa anterior de planificación de sistemas eléctricos creado por la Tennessee Valley Authority de los Estados Unidos para su propio uso. Su finalidad es hallar el plan "óptimo" de ampliación del sistema eléctrico teniendo en cuenta los factores restrictivos existentes. Se entiende por "óptimo" el plan que permite reducir al mínimo el flujo de fondos descontado (gastos de establecimiento y de explotación) durante un período determinado de tiempo, con medidas para reducir los efectos de las incertidumbres que aparecen una vez pasado ese período. Para ello se sigue el procedimiento de la programación dinámica. La programación dinámica, en su sentido más general, es un método ideal para resolver el problema de la planificación de sistemas. Pero, incluso para un pequeño número de planes posibles de ampliación, este procedimiento no resulta práctico sin la ayuda de una computadora. Dada la variedad de unidades generadoras hoy existente, el número de planes posibles de ampliación es tan elevado que, aun con el concurso de las computadoras, la programación dinámica general resulta poco práctica.

El lote de programas WASP representa un término medio. El planificador puede enfocar el campo de estudio hacia las configuraciones que estime más económicas, pero el programa le dirá si las limitaciones impuestas constituyen un factor restrictivo para la solución. El lote de programas WASP le permite entonces modificar esos factores y, sin tener que repetir

todos los trabajos anteriores de la computadora, determinar el efecto de la modificación. Se puede repetir este proceso hasta obtener un camino óptimo que responda a las exigencias de los usuarios.

El lote WASP comprende los siete programas modulares siguientes:

1. Un programa para describir las curvas pronosticadas de carga de pico y de duración de la carga en el sistema (LOADSY).
2. Un programa para describir el sistema eléctrico existente y todas las adiciones y sustracciones futuras programadas en firme (FIXSYS).
3. Un programa para describir las centrales interesantes a las que se podría recurrir para ampliar el sistema eléctrico (VARSYS).
4. Un programa para producir otras configuraciones de ampliación (CONGEN).
5. Un programa para determinar si ya se ha simulado una determinada configuración y, en caso negativo, proceder a dicha simulación (MERSIM).
6. Un programa para determinar el calendario óptimo de integración de nuevas unidades en el sistema durante el período de tiempo considerado (DYNPRO).
7. Un programa para resumir los datos de entrada, los resultados del estudio y el flujo de los fondos necesarios para la solución óptima (REPROBAT).

Cada uno de los tres primeros programas genera ficheros de datos que se utilizan en los cálculos. El cuarto y quinto programas generan otros ficheros que se usan con el sexto. Cada programa produce un resumen impreso. El séptimo programa produce un informe sobre el estudio.

Una ventaja inmediata del procedimiento de los programas modulares es que los tres primeros programas se pueden procesar para eliminar el grueso de los datos erróneos. El proceso de estos programas es sumamente rápido, lo que evita prolongadas operaciones con datos incorrectos. La separación entre el programa generador de configuraciones de ampliación y el programa que efectúa la simulación permite economizar aún más tiempo de utilización de la computadora, pues las configuraciones de ampliación que pudieran haber entrañado datos erróneos en el programa generador se pueden suprimir de la simulación. La posibilidad de conservar los resultados de simulación en un fichero de datos es la principal ventaja del programa desde el punto de vista de la economía de tiempo. Al buscar el óptimo libre de factores restrictivos, por medio de un reproceso sucesivo de los tres últimos programas, solo se llevan a cabo las simulaciones que aún no han sido realizadas. Como la simulación es la tarea que más tiempo requiere en el examen de una configuración de ampliación, la economía en tiempo de computadora puede ser muy considerable.

La segunda ventaja del modelo modular es que en cualquier momento se puede reducir al mínimo el volumen de memoria necesaria, permitiendo con ello el empleo de computadoras relativamente pequeñas. Esto reviste particular importancia si se tiene en cuenta que, en el marco de su asistencia a los Estados Miembros, el OIEA se propone transferirles la metodología WASP.

Una característica importante del programa es que la fiabilidad y los costos de generación de las configuraciones anuales del sistema se calculan utilizando métodos probabilísticos. De esta manera, las variables estocásticas tales como las existencias de agua para la generación hidroeléctrica y la no disponibilidad, prevista o imprevista, de las centrales térmicas, reciben un tratamiento probabilístico. Los resultados del programa permiten así eliminar la incertidumbre debida a la influencia de estas variables estocásticas sobre el plan óptimo de ampliación.

A este respecto, la no disponibilidad de las unidades generadoras térmicas se representa por las necesidades programadas de mantenimiento (paradas previstas) y las interrupciones

forzosas (paradas imprevistas). En el caso de las centrales hidroeléctricas, el usuario puede establecer tantos períodos anuales (estaciones) como necesite para representar la disponibilidad de agua. Además, es igualmente posible especificar hasta cinco situaciones hidrológicas diferentes, es decir, año extremadamente seco, año seco, año normal, año lluvioso y año sumamente lluvioso, juntamente con la probabilidad de que se presente cada situación. Esto es muy importante para los sistemas que tengan un gran componente hidroeléctrico con condiciones hidrológicas variables.

Aun con una memoria limitada, el lote WASP permite considerar:

- un período de estudio de 30 años, cada año subdividido en períodos (de 1 a 12).
- 5 conjuntos de condiciones hidrológicas.
- 100 centrales de varias unidades en el sistema existente, con generación hidroeléctrica normal, hidroeléctrica de emergencia y embalse por bombeo, si las hay, tratadas cada una de ellas como una central compuesta independiente. Ahora bien, de este límite de 100 ha de deducirse el número de tipos de centrales consideradas interesantes para la ampliación (véase seguidamente).
- 20 tipos de centrales consideradas interesantes para la ampliación. Además de las unidades térmicas, se pueden incluir en la lista de alternativas las unidades hidroeléctricas y las de embalse por bombeo. Si hay que estudiar con este programa de computadora una serie de proyectos hidroeléctricos o de embalse por bombeo, los proyectos de cada tipo se deben considerar en el orden cronológico en que podrían ser integrados en el sistema. Se pueden incluir en la lista hasta 20 de estos proyectos. Cuando se incorporan al sistema unidades hidroeléctricas o de embalse por bombeo, éstas se suman a las instalaciones de estos tipos ya existentes. Así, todos los proyectos hidroeléctricos cuentan solo como una central alternativa y todos los proyectos de embalse por bombeo cuentan como una central alternativa adicional.
- 200 configuraciones alternativas del sistema por año, con un límite de 2000 configuraciones por período de estudio en una sola pasada por la computadora.

El tiempo de utilización de computadora necesario para llevar a cabo el estudio de planificación dependerá de la complejidad del sistema que se simula, del número de condiciones hidrológicas consideradas, del número de años que abarque el período de estudio, del número de períodos en que se divida el año, del total de las configuraciones generadas en cada iteración, y por último, de la exactitud de simulación deseada. La versión actual del lote WASP-II incorpora algunas rutinas en lenguaje ASSEMBLER para reducir el tiempo de uso de la computadora.

MODELO ECONOMICO DEL PROGRAMA WASP

La finalidad de un estudio de planificación de un sistema eléctrico es determinar la forma óptima de ampliación del sistema para responder a las necesidades de energía eléctrica de un país en un período determinado. Los estudios de planificación de la energía nucleoelectrica, como los que ha efectuado el OIEA a petición de diversos Estados Miembros — Ref. [4], [5], [6], [7], [8], [9], se llevan a cabo con igual propósito, aunque se presta particular atención a la posible participación de la energía nucleoelectrica en esa forma óptima de ampliación. En condiciones ideales, la ejecución de esta tarea exigiría la estimación y comparación de los beneficios y costos, tanto directos como indirectos, resultantes de diferentes modelos de desarrollo, a fin de determinar el plan de ampliación del sistema eléctrico que proporciona el total máximo de beneficios netos. A causa de las limitaciones de tiempo, resulta inevitable recurrir a una serie de suposiciones simplificadoras. La metodología seguida en el caso del WASP representa una tentativa de llegar a un equilibrio entre las exigencias de orden práctico y la consistencia teórica.

Los principales elementos de esta metodología son:

- a) La definición de los costos y beneficios que han de considerarse y la elaboración de métodos para calcular sus valores cuantitativos.
- b) La selección de criterios para comparar las series sucesivas de beneficios y costos que se produzcan a lo largo del tiempo, con expresión de sus componentes en moneda nacional y en divisas en proporciones variables.

Se da por supuesto que los costos, y no los beneficios, son el verdadero patrón de medida. Esto equivale a admitir que todos los programas de ampliación de un sistema eléctrico que satisfagan la demanda pronosticada cumpliendo las exigencias impuestas de fiabilidad ofrecen los mismos beneficios totales, y que el programa de menor costo es, en consecuencia, el más ventajoso para el consumidor final. Cuando se comparan diferentes formas de producir el mismo artículo, en este caso la energía eléctrica, ésta es una solución menos objetable que la que supondría en general comparar proyectos distintos que den productos diferentes. Ahora bien, pasa por alto los efectos indirectos tales como, por ejemplo 1) los diferentes niveles de empleo resultantes de los diferentes programas eléctricos y los efectos consiguientes en el ahorro y la inversión; 2) el valor futuro de crear un plantel de personal capacitado para la construcción y explotación de centrales nucleares.

Solo se toman en consideración los costos directamente relacionados con la producción de electricidad con un tipo determinado de central. En especial, en el análisis básico no se tienen en cuenta los gastos externos tales como los derivados de la creciente contaminación ambiental en el caso de las centrales que funcionan con combustible fósil, o de la contaminación térmica relativamente mayor producida por las centrales nucleares. La aplicación de rigurosas medidas de control del medio ambiente por parte de los países industrializados, que implican mayores gastos de instalación y de combustible para las centrales térmicas, muestra que los gastos "externos" pueden con el tiempo convertirse fácilmente en "internos".

En todos los casos los costos se definen como costos para la economía y no como costos para los productores de electricidad. Una consecuencia importante de este criterio es eliminar en los datos de entrada los impuestos sobre todos los tipos de combustible y equipo. Esta forma de proceder es particularmente crítica en el caso de los países que imponen una carga fiscal importante a algunos tipos de combustible, especialmente al fuel oil. Como los países en cuestión son los mejor situados para juzgar su estrategia en materia impositiva, que acaso entrañe beneficios sociales que el estudio pase por alto, y puesto que las compañías eléctricas consideran ciertamente los impuestos sobre el combustible y los equipos como elementos de los costos, se pueden efectuar otros cálculos tratando los impuestos como tales elementos en los casos en que se prevean diferencias críticas en los resultados.

La sumación de los costos en moneda nacional y en divisas se hace con arreglo al tipo de cambio oficial vigente en el momento en que se realiza el estudio. Se reconoce que para muchos países los tipos de cambio oficiales son algo arbitrarios y no tienen plenamente en cuenta la oferta y la demanda de capitales extranjeros. Prueba de ello es la existencia de medidas de fiscalización y control de divisas, y de mercados paralelos. Aunque con este enfoque se puede subestimar considerablemente el verdadero valor de la relación costos en divisas a costos en moneda nacional, otros planteamientos acarrearían incertidumbres parecidas.

En cuanto a la selección de la divisa que sea el denominador común, se ha escogido el dólar de los Estados Unidos por comodidad y no porque ofrezca particulares perspectivas de estabilidad.

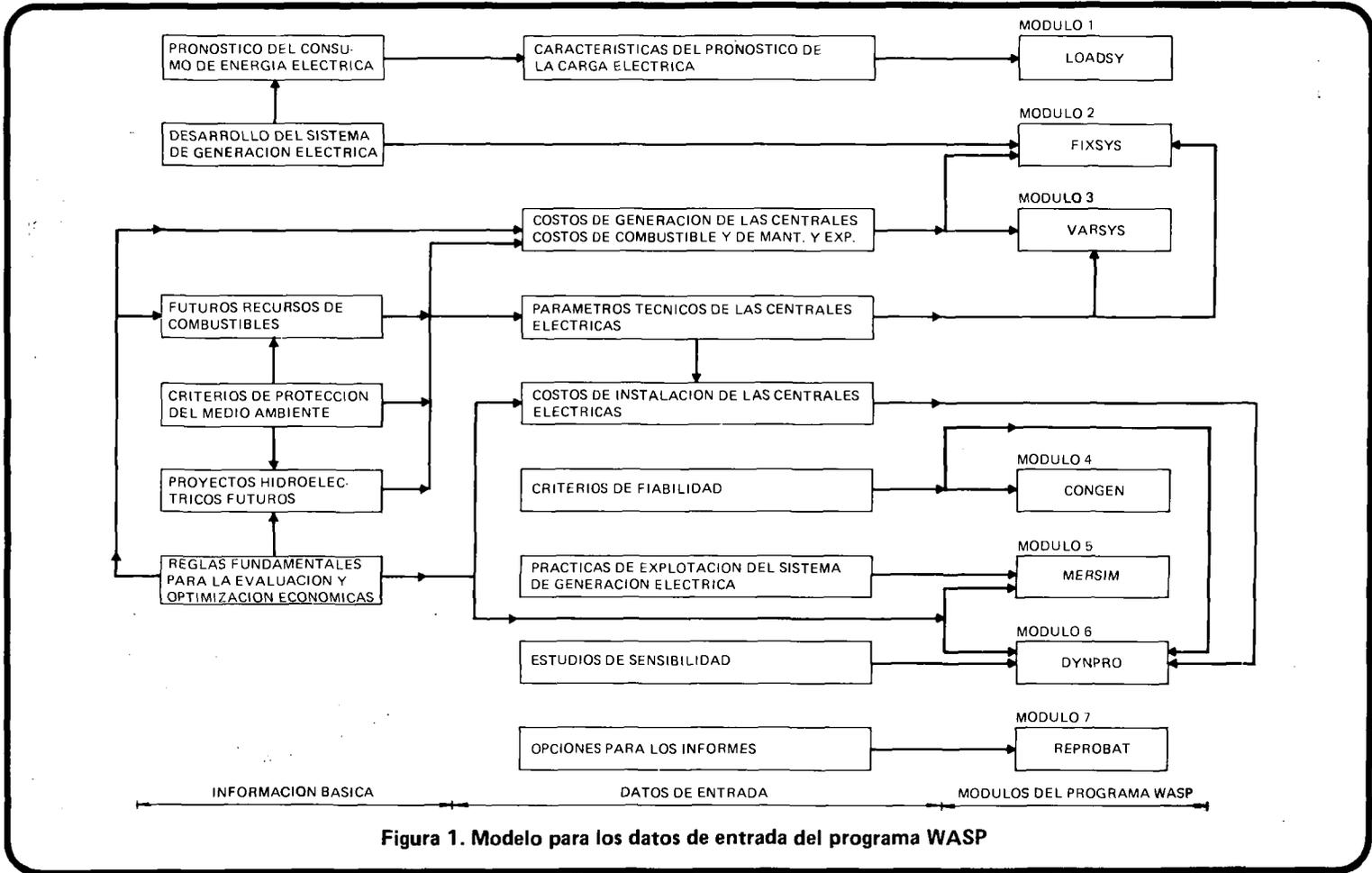


Figura 1. Modelo para los datos de entrada del programa WASP

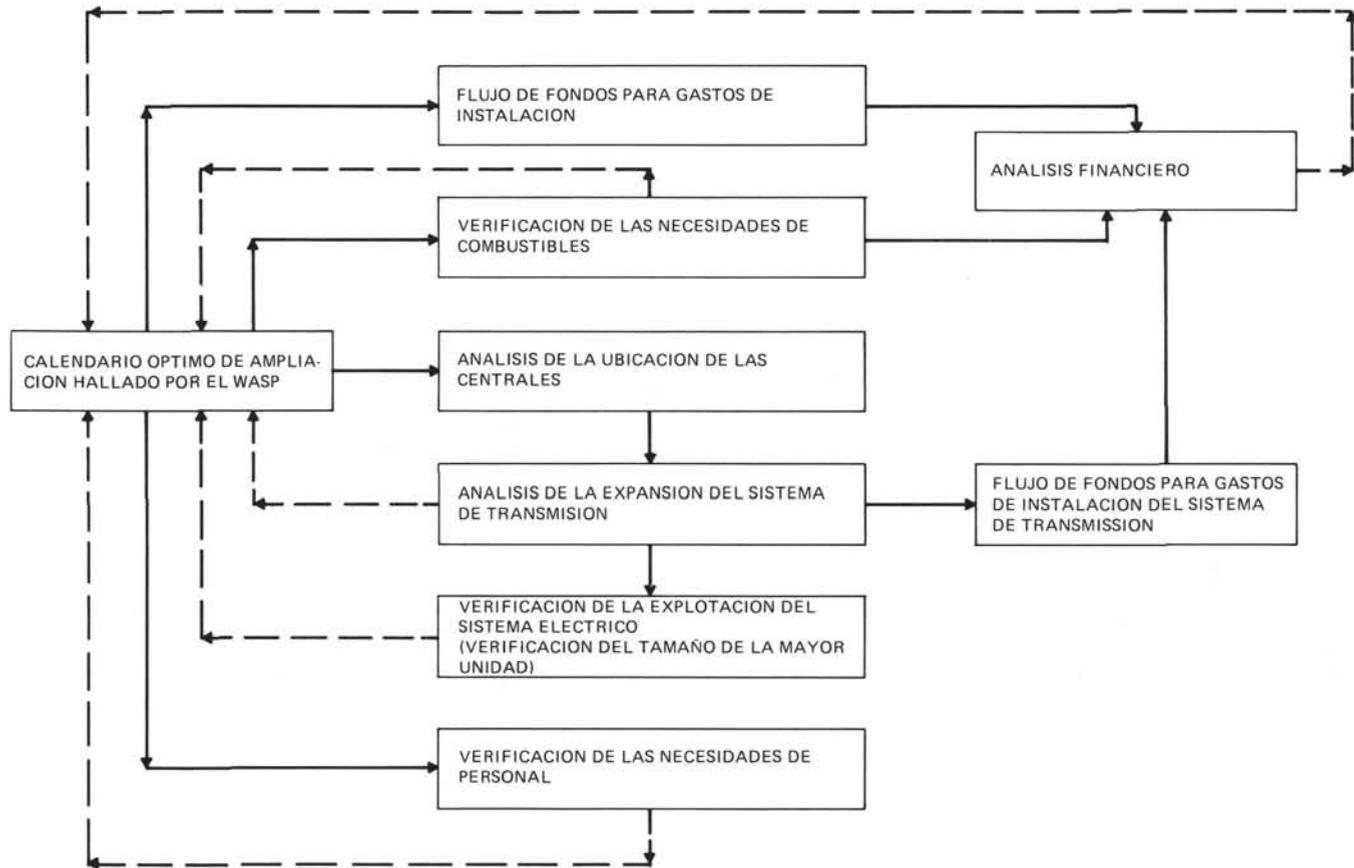


Figura 2. Análisis de la información de salida del WASP

La sumación y comparación del flujo de los costos en el tiempo se hacen descontando el valor actual de éstos según un tipo que se supone permanecerá invariable en el tiempo. Este principio implica dos decisiones:

- a) La selección del valor actual como criterio. Esta decisión debe sopesarse frente a su posible alternativa, que consistiría en juzgar los diferentes modelos según su tasa de beneficio interna. Pero esto último evidentemente no es posible porque, aparte de la incorrección teórica que supone la comparación de proyectos que se excluyen mutuamente, requiere estimaciones de beneficios que en el estudio no se hacen.
- b) La suposición de que la tasa de descuento permanece constante con el tiempo es susceptible de objeciones, pues en principio su valor debe decrecer lentamente al aumentar los niveles del desarrollo económico y las existencias de equipo esencial. Pero se considera que las dificultades prácticas que entraña el cálculo y la utilización de tasas de descuento variables son mucho mayores que las posibles ventajas.

Por último, las tasas de descuento y de inflación se combinan en una tasa equivalente de descuento única. Ello simplifica considerablemente los cálculos ya que es posible trabajar sobre la base de precios constantes.

Las etapas sucesivas del estudio de ampliación de un sistema eléctrico utilizando los programas WASP se indican en forma esquemática en las Figuras 1 y 2. En resumen, son las siguientes:

1. Correlación de los datos fidedignos que puedan servir para pronosticar la demanda futura de electricidad.
2. Selección de un pronóstico de demanda pico que sirva de base para el estudio y para definir las características de las curvas de duración de la carga.
3. Definición de las características de las centrales existentes o encargadas para el sistema eléctrico considerado.
4. Definición de las características de las centrales generadoras que se consideren interesantes para la ampliación.
5. Evaluación del papel de los recursos energéticos nacionales tales como carbón, gas y reservas hidráulicas.
6. Definición de los datos y parámetros económicos que se utilizarán.
7. Determinación de la potencia aproximada de la mayor unidad generadora que pueda admitir el sistema desde el punto de vista de la estabilidad de la frecuencia y de las características de las líneas de transmisión.
8. Determinación del programa de ampliación óptimo (costo mínimo).
9. Determinación de la sensibilidad de los resultados a la variación de los datos económicos.
10. Cálculo de las necesidades de financiación del programa seleccionado de ampliación del sistema eléctrico.
11. Verificación de los factores restrictivos referentes al sistema de transmisión y a las condiciones de explotación.
12. Verificación de los factores restrictivos financieros.
13. Verificación de otros factores restrictivos, por ejemplo suficiencia de los medios de construcción, etc.

VENTAJAS DEL MODELO ECONOMICO WASP

El método tradicional de comparar los aspectos económicos de las centrales nucleares y de las centrales clásicas consistía en calcular los gastos de generación para cada tipo de ellas, basándose en datos adecuados sobre los gastos de instalación, de explotación y de combustible, así como en el factor de carga supuesto y en los gastos de financiación. Este enfoque resultaba adecuado hasta hace pocos años porque la variedad de equipo generador que se ofrecía a las compañías eléctricas era bastante reducida. En muchos casos bastaba

comparar dos unidades, una nuclear y otra clásica, de un tamaño determinado, fijado intuitivamente según las dimensiones del sistema. Con este procedimiento resultaban generalmente suficientes los cálculos manuales.

Este método de planificación de sistemas eléctricos parece ahora inadecuado por varias razones. En primer lugar, la variedad de las unidades generadoras es mucho mayor, pues existen turbinas de gas, centrales hidráulicas de embalse por bombeo, diversos tipos de unidades alimentadas con combustible fósil y aun diferentes tipos de centrales nucleares. En segundo lugar, debido a las ingentes inversiones necesarias, se ha hecho sumamente importante la determinación del tamaño óptimo. En tercer lugar, la situación de una central en el aspecto de la carga influye en su factor de capacidad, lo que puede invalidar la comparación de alternativas que tengan el mismo factor de capacidad. Por último, a causa del elevado costo de los combustibles fósiles, especialmente del gas y el petróleo importados, es necesario, desde el punto de vista económico, reducir al mínimo los gastos totales del sistema tomando en consideración no solo las centrales existentes, sino las que se podrían incorporar a largo plazo. El empleo de los programas WASP permite tener en cuenta todos estos factores. Una ventaja más de estos programas es el tratamiento probabilista de la generación hidroeléctrica y de la disponibilidad de las plantas termoeléctricas, con lo cual se eliminan las incertidumbres inherentes a los modelos que siguen un enfoque determinista para esas variables aleatorias.

TRANSFERENCIA DEL PROGRAMA WASP A LOS ESTADOS MIEMBROS DEL OIEA

El Organismo ha transferido el programa WASP a 38 países que han dado su acuerdo a ciertas condiciones para dicha transferencia, y a 5 organizaciones internacionales. En total, 16 países han pedido al Organismo capacitación en la metodología WASP durante los años 1974—1977 y, como resultado, han sido capacitados en Viena 34 ingenieros durante períodos de tiempo variables. La necesidad de numerosos Estados Miembros de más capacitación especializada en la planificación de la ampliación de sistemas eléctricos con ayuda del programa WASP



Figura 3. Al curso de capacitación WASP, celebrado del 14 de febrero al 14 de abril de 1978 en Argonne (Estados Unidos), asistieron 16 participantes de cinco países. Aparecen en la foto con los organizadores y conferenciantes del curso.

indujo al Organismo a patrocinar una serie de cursos sobre esa materia. Dos de esos cursos tuvieron lugar en el Argonne National Laboratory (Estados Unidos) durante un período de 9 semanas a principios de 1978 y de 1979, y asistieron en total 40 participantes de 18 países. En vista del éxito de los mismos, se proyecta celebrar en años venideros otros cursos de capacitación sobre la planificación de la ampliación de sistemas eléctricos utilizando la metodología WASP.

Referencias

- [1] Dennis Anderson, "Models for determining least-cost investment in electricity supply", The Bell Journal of Economics and Management Science, Vol. 3, No. 1, Primavera 1972.
- [2] H. Baleriaux, E. Jamouille, F. Linard de Guertechin, "Simulation de l'exploitation d'un parc de machines thermiques de production d'électricité couplé a des stations de pompage", Review E, Suppl. Bull. Soc. Belge Electr. 5, 7, 1967, 3.
- [3] R.T. Jenkins, D.S. Joy, "Wien Automatic System Planning Package (WASP) - An Electric Utility Optimal Generation Expansion Planning Computer Code", USAEC Report, ORNL-4945, julio de 1974.
- [4] IAEA, "Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries - General Report", Vienna, 1973.
- [5] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Indonesia", Vienna, 1976.
- [6] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Bangladesh", Vienna, 1976.
- [7] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Pakistan", Vienna, 1976.
- [8] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Hong Kong", Vienna, 1977.
- [9] IAEA, "Nuclear Power Planning Study for Venezuela", Vienna, 1978.