

# **Gestión del mantenimiento preventivo para centrales eléctricas. Aplicación a un caso real ilustrativo del sistema eléctrico español de generación**

**Salvador Pérez Canto**  
Universidad de Málaga

RECIBIDO: 5 de julio de 2006

ACEPTADO: 19 de febrero de 2008

**Resumen:** La planificación del mantenimiento de grupos de producción de energía eléctrica consiste genéricamente en conocer qué grupos deben estar parados, o sea sin producir, para su revisión en cada intervalo de tiempo o periodo de un horizonte temporal de estudio. Este problema es de una enorme trascendencia ya que un fallo en una central puede originar la caída de un sistema eléctrico, con la consecuencia de no cumplir con la demanda de los clientes. El problema es planteado desde la perspectiva de la investigación operativa, modelándose y resolviéndose a través de la programación matemática, concretamente con el método de la programación lineal entera mixta 0/1. Como caso de aplicación real se tiene un conjunto de grupos de generación, representativo del sistema eléctrico español. El resultado que se alcanza es un plan de mantenimiento concreto que permite organizar de manera eficiente la distribución de todos los mantenimientos a lo largo del horizonte temporal analizado.

**Palabras clave:** Mantenimiento preventivo / Central eléctrica / Fiabilidad / Programación lineal entera mixta 0/1 / Plan.

## **Management of Power Plant Preventive Maintenance. A Representative Case of Application for the Spanish Power Generation System**

**Abstract:** Power plant preventive maintenance scheduling consists of knowing which generating units have to stop their production in order to be examined regularly for safety. This problem is enormously important because a failure in a power station may provoke a general breakdown in an electric network. The main consequence is the electric demand of clients will be not be satisfied in such cases. The problem is approached under the operations research perspective as an optimization issue. Mathematical programming is used to solve the model reached, specifically 0/1 mixed integer linear programming technique. An example of application is included. The algorithm is applied to a real power plant set, representative of the Spanish one. The obtained result is a schedule that allows the efficient organization of preventive maintenance over the time horizon considered.

**Key Words:** Preventive maintenance / Power plant / Reliability / 0/1 mixed integer linear programming / Schedule.

## **INTRODUCCIÓN**

En este artículo se aborda el problema de la planificación del mantenimiento de grupos generadores de electricidad desde la perspectiva de la programación matemática. El método de solución estudiado para resolverlo se incluye dentro de la programación matemática, exactamente la programación lineal entera mixta 0/1.

Se analiza el *mantenimiento preventivo*, el cual se puede definir como la supervisión regular de un grupo generador de electricidad para detectar posibles fallos. Es la mejor manera de evitar que un grupo quede fuera de servicio por avería.

La relevancia del problema de la planificación del mantenimiento de grupos de generación eléctrica radica en la necesidad real de pararlos cada cierto tiempo para su revisión, de tal modo que desde una óptica preventiva se eviten fallos en su funcionamiento. La enorme importancia

estriba en que una parada imprevista en los grupos conllevaría una indeseable interrupción en el suministro eléctrico, con la consiguiente repercusión económica negativa por pérdida de mercado. Además, dado que los grupos pertenecen a un sistema eléctrico global, es posible que una avería imprevista afecte al resto del sistema desestabilizándolo. También hay que considerar el impacto negativo que estas circunstancias tendría en el nivel de satisfacción de los consumidores.

## **CONSIDERACIONES GENERALES E HIPÓTESIS DE TRABAJO**

El problema de la planificación del mantenimiento de grupos de producción de energía eléctrica (Stremel, 1981; Yamayee, 1982) se engloba dentro de la explotación a largo plazo de los sistemas de producción de energía eléctrica.

Genéricamente, existen tres tipos diferentes de grupos de generación de electricidad: grupos térmicos convencionales, grupos hidroeléctricos y grupos nucleares. Dentro de los grupos térmicos convencionales se incluyen los grupos que funcionan con carbón, fuel-oil y gas natural. En el estudio que se realiza en este artículo se incluyen todos los grupos anteriores. Cabe decir que aunque una central eléctrica suele constar de varios grupos (3 o 4 típicamente), en lo que sigue se habla indistintamente de central o grupo. De todos los grupos de una central no puede haber más de uno en mantenimiento a la vez.

Hay diversos estudios sobre la planificación del mantenimiento de grupos de producción de energía eléctrica. Cabe destacar: programación entera (Dopazo y Cerril, 1975; Gurevich et al., 1996), índice de operación (Lin et al., 1992), programación entera mixta (Ben-Daya et al., 2000), programación estocástica (Silva et al., 1995; Chattopadhyay, 2004), técnicas heurísticas (de Cuadra et al., 1995), programación dinámica (Zürn y Quintana, 1975), descomposición de Benders (Al-Khamis et al., 1992; Yellen et al., 1992), programación multiobjetivo (Kralj y Rajakovic, 1994) e influencia de los procesos de información (Swanson, 2003; Jeong et al., 2006).

En la actualidad, son las técnicas heurísticas las más extendidas en cuando a la aplicación práctica para la resolución del problema que se plantea. No obstante, las compañías eléctricas con actividad de generación están empezando a considerar otras alternativas como las relacionadas con la investigación operativa.

El análisis que se realiza en el presente trabajo se sustenta en una serie de *hipótesis* de trabajo que se pretenden contrastar con los resultados finales:

- *Hipótesis 1. El modelo propuesto representa el funcionamiento del proceso de planificación del mantenimiento y se obtiene un plan que cumple con los requisitos del sistema.*
- *Hipótesis 2. La fiabilidad del sistema es optimizada (maximización) para que el sistema refleje un funcionamiento acorde con las exigencias de calidad por parte del cliente o consumidor.*
- *Hipótesis 3. La aplicabilidad del modelo a situaciones reales se establece como condición para su generalización.*

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La planificación del mantenimiento de grupos eléctricos se puede hacer atendiendo a los dos criterios siguientes: 1) minimizar el impacto en seguridad del mantenimiento y 2) minimizar el impacto económico del mantenimiento.

De lo anterior se deduce que debe satisfacerse en todo momento la demanda de energía eléctrica con un adecuado nivel de seguridad. Además, el coste económico asociado a dejar sin servicio un conjunto de grupos de producción de energía eléctrica ha de ser mínimo.

El problema objeto de estudio presenta como características más destacadas el ser:

- *Combinatorio.* Esto quiere decir que las variables enteras hacen crecer el tiempo de resolución del problema de forma exponencial.
- *No lineal.* Por otra parte, la relación entre las variables implicadas en el problema no es de carácter lineal, aunque el modelado que se hace del mismo sí es lineal.

La linealidad del modelo es una ventaja, pero que sea combinatorio es un inconveniente. La complejidad del problema estriba en el gran tamaño del sistema a modelar. Aparece un número alto de variables, acentuándose la dificultad por intervenir variables binarias (revisión o no de un grupo). Lo anterior limita el nivel de detalle del modelado para que sea informáticamente abordable. Se debe de llegar a un compromiso entre complejidad, dimensión y tiempo de cálculo del modelo y su grado de aproximación a la realidad.

## HORIZONTE TEMPORAL Y PERIODOS DE ESTUDIO

Se elige un horizonte temporal de planificación igual a 1 año o, lo que es igual, 13 meses o bien 52 semanas, ya que se supone que un mes consta de 4 semanas. Los periodos de estudio para dividir el horizonte temporal pueden ser los 13 meses o las 52 semanas.

## DURACIÓN DE LOS MANTENIMIENTOS

La duración del mantenimiento depende del tipo de grupo. En general, se tiene:

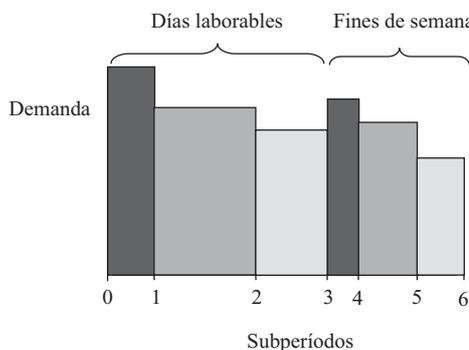
- *Central térmica convencional*: carbón (4 semanas), fuel-oil y gas natural (3 semanas).
- *Central nuclear*: 6 semanas.
- *Centrales hidroeléctricas*: duración variable en función de cada central.

Aquí se considera la misma duración para todos los grupos: 1 mes o 1 periodo (4 semanas).

**CONSIDERACIONES ACERCA DE LA DEMANDA**

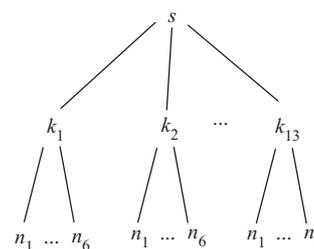
Se supone que un periodo del horizonte temporal equivale a un mes. Cada mes consta de dos bloques: días laborables y fines de semana. Esta distinción se hace de acuerdo con la demanda de energía, mayor en el primero que en el segundo. Cada bloque se divide en tres partes desiguales según la demanda. Estas partes, ordenadas de mayor a menor consumo de potencia, son: punta, llano y valle. Esto da lugar a 6 subperiodos de diferente duración en cada periodo. La variación típica de la demanda de potencia con los subperiodos de un periodo cualquiera se puede representar cualitativamente mediante la figura 1.

**Figura 1.-** Variación de la demanda en un periodo



Esta distribución se repite tres veces por plantearse tres escenarios de demanda: elevada ( $s_e$ ), media ( $s_m$ ) y baja ( $s_b$ ). De este modo se modela la incertidumbre en la demanda. A cada uno se le asocia una probabilidad. De acuerdo con un criterio intuitivo,  $s_m$  es el de mayor probabilidad mientras que  $s_b$  el de menor. La estructura temporal queda como se representa en la figura 2.

**Figura 2.-** Estructura Escenario-Periodo-Subperiodo



El significado para cada uno de los elementos es:  $s$ , el escenario de demanda ( $s_e, s_m, s_b$ );  $k$ , el periodo (varía desde 1 hasta 13);  $n$ , el subperiodo (varía desde 1 hasta 6).

**FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Se está ante un problema de optimización. Se plantean unos objetivos, como maximizar la fiabilidad (caso analizado) o minimizar costes, cumpliéndose unas restricciones.

**VARIABLES PRINCIPALES**

Las variables fundamentales del problema son las denominadas *variables de mantenimiento*, cuya notación es  $x_{i,k}$ . Se trata de variables binarias (0/1) y su significado es:

- $x_{i,k} = 0 \Rightarrow$  El grupo  $i$  no está en mantenimiento en el periodo  $k$ .
- $x_{i,k} = 1 \Rightarrow$  El grupo  $i$  está en mantenimiento en el periodo  $k$ .

La resolución del problema se encamina a calcular el valor de estas variables, de forma que se optimice la función objetivo y se verifiquen las restricciones impuestas. Otras variables directamente relacionadas con las anteriores son aquéllas que indican el comienzo de los mantenimientos:  $c_{i,k}$ . Igualmente son variables 0/1 y denotan:

- $c_{i,k} = 0 \Rightarrow$  El mantenimiento del grupo  $i$  no empieza al principio del periodo  $k$ .
- $c_{i,k} = 1 \Rightarrow$  El mantenimiento del grupo  $i$  empieza al principio del periodo  $k$ .

**FUNCIÓN OBJETIVO**

Como objetivo se considera la fiabilidad (Garver, 1972; Gertsbakh, 2000), aunque también se podría tener la opción de los costes (Gurevich *et al.*, 1996; Mukerji *et al.*, 1991). Un sistema eléctrico es fiable cuando existen reservas suficientes de potencia eléctrica para satisfacer la demanda. La fiabilidad, definida en este caso como la reserva neta unitaria o cociente entre la reserva neta y la demanda para el horizonte de tiempo considerado, se maximiza. Resulta así:

$$\text{Maximizar } \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} p_s \cdot \frac{r_{s,k,n}}{d_{s,k,n}}$$

donde  $S$  es el conjunto de índices para los escenarios de demanda;  $K$  es el conjunto de índices para los periodos de un escenario de demanda;  $N$  es el conjunto de índices para los subperiodos de un periodo;  $p_s$  es la probabilidad de que ocurra el escenario de demanda  $s$ ;  $r_{s,k,n}$  es la reserva neta de potencia en el subperiodo  $n$  del periodo  $k$  perteneciente al escenario de demanda  $s$  (MW);  $d_{s,k,n}$  es la demanda en el subperiodo  $n$  del periodo  $k$  perteneciente al escenario de demanda  $s$  (MW).

Al cociente entre  $r_{s,k,n}$  y  $d_{s,k,n}$  se le denomina *reserva neta unitaria* en el subperiodo  $n$  del periodo  $k$  perteneciente al escenario de demanda  $s$ . La expresión para  $r_{s,k,n}$  es:

$$r_{s,k,n} = l_k - d_{s,k,n} - m_k$$

donde  $l_k$  es la potencia disponible o potencia máxima acoplada en el periodo  $k$  (MW);  $m_k$  es la potencia en mantenimiento en el periodo  $k$  (MW).

La potencia total en mantenimiento en el periodo  $k$ ,  $m_k$ , viene dada de la siguiente manera:

$$m_k = \sum_{i \in I} \bar{t}_i \cdot x_{i,k} \quad \forall k \in K$$

donde  $I$  es el conjunto de índices para los grupos de producción de energía eléctrica;  $\bar{t}_i$  es la capacidad o potencia máxima nominal del grupo  $i$  (MW);  $x_{i,k}$  es la variable de mantenimiento del grupo  $i$  en el periodo  $k$ .

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la función objetivo queda así:

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} p_s \cdot \frac{l_k - d_{s,k,n} - m_k}{d_{s,k,n}} = \\ & = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} p_s \cdot \frac{\sum_{i \in I} \bar{t}_i - d_{s,k,n} - \sum_{i \in I} \bar{t}_i \cdot x_{i,k}}{d_{s,k,n}} \end{aligned}$$

Se busca maximizar esta expresión, luego en la formulación del problema ha de aparecer:

$$\text{Maximizar } \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} p_s \cdot \frac{\sum_{i \in I} \bar{t}_i - d_{s,k,n} - \sum_{i \in I} \bar{t}_i \cdot x_{i,k}}{d_{s,k,n}}$$

**RESTRICCIONES**

Las restricciones consideradas son las del mantenimiento de grupos de generación (Ben-Daya *et al.*, 2000). A continuación se describe y modela este conjunto de restricciones.

1) *Restricción de duración del mantenimiento*: El mantenimiento de cada grupo posee una duración igual a un número dado de periodos de tiempo  $\beta_i$ . Matemáticamente resulta para el grupo  $i$ :

$$\sum_{k \in K} x_{i,k} = \beta_i \quad \forall i \in I$$

2) *Restricción de periodo*: Se impone un número máximo de mantenimientos a llevar a cabo en un periodo concreto. El modelado matemático es el siguiente:

$$\sum_{i \in I} x_{i,k} \leq \psi_k \quad \forall k \in K$$

siendo  $\psi_k$  el número máximo de mantenimientos que es posible hacer en el periodo  $k$ .

3) *Restricción de mantenimiento ininterrumpido*: Esta restricción se refiere a que el mantenimiento de un grupo se debe hacer de forma

continua, es decir en periodos consecutivos. Establece una relación entre las variables de mantenimiento y las variables de comienzo de los mantenimientos. Se corresponde con:

$$x_{i,k} - x_{i,k-1} \leq c_{i,k} \quad \forall i \in I \quad \forall k \in K$$

para  $k = 1$  se toma  $x_{i,0} = 0$ .

4) *Restricción de secuenciación*: Da el orden a seguir en los mantenimientos de grupos generadores de energía eléctrica que componen el sistema que se está tratando. El mantenimiento del grupo  $i$  ha de empezar antes que el del grupo  $j$ . Su modelo es:

$$\sum_{k_n=1}^k c_{i,k_n} - c_{j,k} \geq 0 \quad \forall k \in K$$

$$c_{i,k} + c_{j,k} \leq 1 \quad \forall k \in K$$

con  $k_n$  como un índice que varía desde el periodo 1 hasta el periodo  $k$ .

5) *Restricción de exclusión*: Impone que los mantenimientos de dos grupos no se produzcan simultáneamente. La ecuación matemática con la que los grupos  $i$  y  $j$  no están en mantenimiento a la vez es:

$$x_{i,k} + x_{j,k} \leq 1 \quad \forall k \in K$$

6) *Restricciones de tiempo*: Dos son las restricciones en relación con la duración de los mantenimientos, a saber:

\* *Restricción de intervalo*: Entre cada dos mantenimientos se introduce un intervalo de tiempo. Se obliga a que el mantenimiento de un grupo sea un número de periodos antes o después del de otro grupo. Si el intervalo es cero los mantenimientos son consecutivos. Entre el final del mantenimiento del grupo  $i$  y el comienzo del suyo para el grupo  $j$  se imponen “ $e$ ” periodos. El modelado queda:

$$c_{i,k} = c_{j,k+\beta_i+e} \quad 1 \leq k \leq \delta - \beta_i - e$$

$$\sum_{k=1}^{\delta-\beta_i-e} (c_{i,k} + c_{j,k+\beta_i+e}) = 2$$

donde  $\delta$  es el horizonte temporal que se está considerando para el problema.

\* *Restricción de solapamiento*: Consiste en que dos mantenimientos se superpongan un número de periodos. Si el número de periodos es igual a las duraciones de los mantenimientos entonces éstos coinciden. La expresión que hace que los mantenimientos de los grupos  $i$  y  $j$  se solapen en un número de periodos “ $u$ ”, siendo el grupo  $i$  el primero de los dos en quedar sin servicio, es:

$$c_{i,k} = c_{j,k+\beta_i-u} \quad 1 \leq k < \delta - \beta_i + u$$

7) *Restricción de mantenimiento una sola vez*: Se ha de verificar que cada grupo esté en mantenimiento una sola vez a lo largo del horizonte temporal objeto de estudio. De este modo queda:

$$\sum_{k \in K} c_{i,k} = 1 \quad \forall i \in I$$

8) *Restricción de reserva neta*: La reserva neta es igual a la reserva bruta (potencia total instalada menos la punta de potencia demandada) menos la pérdida de potencia debida a los mantenimientos. Aunque se maximice la reserva neta unitaria conjunta en el horizonte temporal, es posible que la reserva neta sea baja en algún subperiodo. Para evitar esto se impone que en cada uno de los subperiodos dicha reserva neta sea mayor que un determinado valor:

$$\sum_{i \in I} \bar{t}_i - d_{s,k,n} - \sum_{i \in I} \bar{t}_i \cdot x_{i,k} \geq b_{s,k,n}$$

$$\forall s \in S \quad \forall k \in K \quad \forall n \in N$$

siendo  $b_{s,k,n}$  el límite inferior para la reserva neta en el subperiodo  $n$  del periodo  $k$  perteneciente al escenario de demanda  $s$ . Se halla aplicando un porcentaje a la demanda.

Como complemento a estas restricciones cabría incluir las *restricciones de material y mano de obra* ya que los recursos son limitados. Se pueden modelar en las de periodo y exclusión.

### MODELADO Y METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El problema de la planificación del mantenimiento de grupos de producción de energía eléctrica se puede enmarcar dentro de la programación matemática como un problema de programación lineal entera mixta 0/1, por caracterizarse adecuadamente de forma lineal y por intervenir variables reales y enteras, siendo las últimas binarias en este caso. No obstante, en el planteamiento hecho no hay variables reales. La utilización de la programación lineal entera mixta 0/1 (Dopazo y Cerril, 1975) permite la resolución.

#### MODELO GLOBAL

Teniendo en cuenta la función objetivo y las restricciones el problema se formula así:

$$\text{Maximizar } \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} p_s \cdot \frac{\sum_{i \in I} \bar{t}_i - d_{s,k,n} - \sum_{i \in I} \bar{t}_i \cdot x_{i,k}}{d_{s,k,n}}$$

sujeto a

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} x_{i,k} &= \beta_i & \forall i \in I \\ \sum_{i \in I} x_{i,k} &\leq \psi_k & \forall k \in K \\ x_{i,k} - x_{i,k-1} &\leq c_{i,k} & \forall i \in I \quad \forall k \in K \\ \sum_{k_n=1}^k c_{i,k_n} - c_{j,k} &\geq 0 & \forall k \in K \\ c_{i,k} + c_{j,k} &\leq 1 & \forall k \in K \\ x_{i,k} + x_{j,k} &\leq 1 & \forall k \in K \\ c_{i,k} &= c_{j,k+\beta_i+e} & 1 \leq k \leq \delta - \beta_i - e \\ \sum_{k=1}^{\delta-\beta_i-e} (c_{i,k} + c_{j,k+\beta_i+e}) &= 2 \end{aligned}$$

$$c_{i,k} = c_{j,k+\beta_i+u} \quad 1 \leq k < \delta - \beta_i + u$$

$$\sum_{k \in K} c_{i,k} = 1 \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{i \in I} \bar{t}_i - d_{s,k,n} - \sum_{i \in I} \bar{t}_i \cdot x_{i,k} \geq b_{s,k,n}$$

$$\forall s \in S \quad \forall k \in K \quad \forall n \in N$$

$$x_{i,k}, c_{i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad \forall k \in K$$

donde  $I$  es el conjunto de índices para los grupos de producción de energía eléctrica;  $S$  es el conjunto de índices para los escenarios de demanda;  $K$  es el conjunto de índices para los periodos;  $N$  es el conjunto de índices para los subperiodos de un periodo;  $p_s$  es la probabilidad de que ocurra el escenario de demanda  $s$ ;  $\bar{t}_i$  = Capacidad o potencia máxima nominal del grupo  $i$  (MW);  $d_{s,k,n}$  es la demanda en el subperiodo  $n$  del periodo  $k$  perteneciente al escenario de demanda  $s$  (MW);  $x_{i,k}$  es la variable de mantenimiento del grupo  $i$  en el periodo  $k$ ;  $c_{i,k}$  es la variable de comienzo del mantenimiento del grupo  $i$  en el periodo  $k$ ;  $\beta_i$  es la duración del mantenimiento del grupo  $i$  (periodos);  $\psi_k$  es el número máximo de mantenimientos posibles en el periodo  $k$ ;  $k_n$  es el índice que varía desde el periodo 1 hasta el periodo  $k$ ;  $e$  es el número de periodos de intervalo entre mantenimientos;  $\delta$  es el horizonte temporal estudiado;  $u$  es el número de periodos de solapamiento entre mantenimientos;  $b_{s,k,n}$  es la fracción de la demanda en el subperiodo  $n$  del periodo  $k$  perteneciente al escenario de demanda  $s$ .

Este problema queda englobado dentro de la programación lineal entera mixta 0/1.

#### TAMAÑO DEL PROBLEMA

El número de variables y de restricciones definen el tamaño del problema. En lo que sigue, "card ( $\cdot$ )" denota cardinal o número de elementos del conjunto indicado entre paréntesis.

♦ *Número de variables:* Únicamente intervienen variables 0/1 ( $x_{i,k}$  y  $c_{i,k}$ ). El número total de ellas viene dado por:

$$2 \times \text{card}(I) \times \text{card}(K).$$

♦ *Número de restricciones*: El número de restricciones depende del problema a resolver, ya que las restricciones de secuenciación, exclusión, intervalo y solapamiento se imponen según unos criterios determinados. Para generalizar, se suponen conocidas las que hay. El número total es:

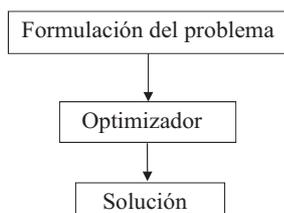
$$2 \times \text{card}(I) + [1 + 2 \times r_1 + r_2 + \text{card}(I) + \text{card}(S) \times \text{card}(N)] \times \text{card}(K) + r_3 \cdot (1 + \delta) - \sum_{l \in L} \beta_l - \sum_{r_3 \in R_3} e_{r_3} + r_4 \cdot \delta - \sum_{q \in Q} \beta_q + \sum_{r_4 \in R_4} u_{r_4}$$

El significado para cada nuevo parámetro es:  $r_1$ , el número de restricciones de precedencia;  $r_2$ , el número de restricciones de exclusión,  $R_3$ , el conjunto de índices para las restricciones de intervalo,  $r_3$ , es igual a  $\text{card}(R_3)$ ;  $L$ , el conjunto de índices para los generadores cuyo mantenimiento tiene lugar primero en la restricción de intervalo;  $R_4$ , el conjunto de índices para las restricciones de solapamiento;  $r_4$ , es igual  $\text{card}(R_4)$ ;  $Q$ , es el conjunto de índices para los generadores cuyo mantenimiento tiene lugar primero en la restricción de solapamiento.

### METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN

La resolución del problema de la planificación del mantenimiento de grupos de producción de energía eléctrica, a través de la técnica de la programación lineal entera mixta 0/1, conlleva la utilización de un optimizador. Partiendo de la formulación global del problema y si éste es factible, se alcanza una solución concreta. El esquema a seguir es el de la figura 3.

**Figura 3.-** Esquema de resolución para la programación lineal entera mixta 0/1



### CASO DE APLICACIÓN REAL

Para constatar la eficiencia del método implementando, se ha aplicado a un caso de gran dimensión (comparable al sistema eléctrico español), con datos reales de entrada.

### DATOS GENERALES

- *Duración para la punta, el llano y el valle de un periodo*: A la punta se le asigna una duración de un 10%, al llano un 60% y al valle un 30%.
- *Probabilidades de los escenarios de demanda*: Escenario de demanda baja: 0,1. Escenario de demanda media: 0,6. Escenario de demanda elevada: 0,3.
- *Ordenación de la demanda de potencia para los periodos de estudio*: Mes 1 > Mes 8 > Mes 13 > Mes 7 > Mes 12 > Mes 2 > Mes 11 > Mes 3 > Mes 10 > Mes 4 > Mes 9 > Mes 6 > Mes 5.
- *Porcentaje de la demanda para la restricción de reserva neta*: El tanto por ciento que se establece para el parámetro  $b_{s,k,n}$  es de un 10%.
- *Situación inicial para los grupos*: Al comienzo del horizonte temporal se supone que todos los grupos están desacoplados, esto es sin producir energía eléctrica.

### DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

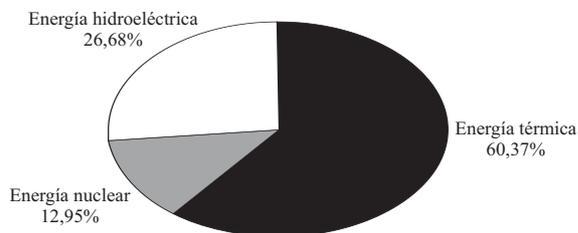
El caso a tratar se caracteriza principalmente por los siguientes elementos:

- 80 grupos (53 térmicos convencionales, 20 hidroeléctricos y 7 nucleares)
- 3 escenarios de demanda, 13 periodos y 6 sub-periodos

Según la Asociación Española de la Industria Eléctrica (2007), en España hay aproximadamente 1200 centrales eléctricas. Los 80 grupos considerados representan el 90% de la potencia total instalada, con lo que la representatividad del caso abordado es muy elevada. De acuerdo con la misma fuente, la distribución de porcentajes para la generación de energía eléctrica en España del año 2006 en el régimen ordinario, es decir sin contar con las energías renovables, es la siguiente: 60,37% de energía térmica, 26,68% de

energía hidráulica y 12,95% de energía nuclear (figura 4).

**Figura 4.-** Distribución porcentual de la generación de electricidad en España en 2006



- *Datos de entrada:* Esta información no se detalla por su gran extensión. Incluye: datos técnicos de los grupos, demanda, restricciones impuestas, etc. Está disponible para cualquier persona interesada.

- *Tamaño del problema:* Número de variables: 2080; número de restricciones: 2105.

**RESULTADOS**

El entorno de optimización utilizado para la resolución ha sido GAMS (Brooke, 1998).

*Función objetivo:* 96,9435.

*Plan de mantenimiento:* En la columna de la izquierda aparece el número de la central eléctrica (primero las térmicas, luego las hidráulicas y finalmente las nucleares), y en la fila superior están los periodos.

**Tabla 1.-** Plan de mantenimiento

G/P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		■											
2												■	
3		■											
4										■			
5											■		
6													■
7												■	
8	■												
9									■				
10				■									
11										■			
12					■								
13												■	
14							■						
15												■	
16						■							
17											■		
18										■			
19			■										
20													■
21											■		
22												■	

23												■		
24			■											
25												■		
26									■					
27														
28														
29													■	
30														■
31														
32														■
33													■	
34													■	
35														
36														
37														
38														
39														
40														
41														
42														
43														
44														
45														
46														
47														
48														
49														
50														
51														
52														
53														
54														
55														
56														
57														
58														
59														
60														
61														
62														
63														
64														
65														
66														
67														
68														
69														
70														
71														
72														
73														
74														
75														
76														
77														
78														
79														
80														

La factibilidad del modelo, expresada en términos de consecución de una función objetivo y un plan de mantenimiento concreto, llevan a contrastar la hipótesis 1 y la hipótesis 2 de trabajo. La primera viene refrendada por la tabla que refleja el plan de mantenimiento concreto alcanzado, el cual es de enorme utilidad para los directores de operaciones de las compañías eléctricas con actividades de generación.

Por otra parte, el modelo teórico inicial ha sido capaz de asumir su aplicación para un caso real como es el representativo del sistema de generación eléctrica español, que es el que se ha considerado. Así pues, la hipótesis 3 se ha visto confirmada.

## CONCLUSIONES

En este documento se presenta y resuelve el problema de la planificación del mantenimiento de grupos de producción de energía eléctrica, de gran dimensión y elevada complejidad. Se utiliza para ello la programación lineal entera mixta 0/1. Se modela el problema teniendo en cuenta el aspecto esencial de la fiabilidad y lo concerniente al mantenimiento de grupos eléctricos. El planteamiento del problema, así como los resultados alcanzados (plan de mantenimiento a seguir), permiten hacer un acercamiento al mismo, algo que sirve como una buena introducción para futuras ampliaciones del problema incluyéndose objetivos de costes y restricciones del modelo de explotación de los sistemas de producción de energía eléctrica.

La aplicación de la programación lineal entera mixta 0/1 a un sistema de generación de energía eléctrica específico ha servido para comprobar que el procedimiento implementado funciona de forma correcta. Los resultados obtenidos reflejan los comportamientos típicos esperados para las centrales. El plan de mantenimiento obtenido se adecua a los requerimientos modelados a través de las restricciones impuestas, además de optimizarse la función objetivo. Se deduce que el modelo empleado funciona correctamente, sin errores en los resultados alcanzados.

Se pueden señalar las siguientes aportaciones:

- Tratamiento de las restricciones de secuenciación, mantenimiento ininterrumpido, intervalo y solapamiento
- Utilización simultánea de las variables de mantenimiento y las variables de comienzo de los mantenimientos.

De estos aspectos no se ha encontrado casi ninguna referencia en la bibliografía, por lo que han sido descritos y modelados totalmente, resultando una formulación global novedosa.

El trabajo desarrollado en este artículo puede tener gran interés para las diferentes compañías con producción de energía eléctrica, y fundamentalmente para las empresas encargadas de coordinar la generación de todas las centrales de un sistema eléctrico determinado, como puede ser el de una región, país o grupo de países.

La implantación del método analizado proporciona esencialmente el beneficio de optimizar la fiabilidad del sistema eléctrico maximizándola, de modo que los cortes en el suministro eléctrico sean los menores posibles. Esto es muy ventajoso para las compañías eléctricas, ya sean públicas o privadas, habida cuenta de que se logra una mejora de la eficiencia (Arocena, 2001) en términos de una mayor calidad del servicio, lo cual se traduce en una mayor estabilidad del mismo. La consecuencia principal es el incremento directo en la satisfacción de los clientes e indirectamente del beneficio económico de las compañías eléctricas.

## BIBLIOGRAFÍA

- AL-KHAMIS, T.M.; VEMURI, S.; LEMONIDIS, L.; YELLEN, J. (1992): "Unit Maintenance Scheduling with Fuel Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, núm. 2, (mayo), pp. 933-939.
- AROCENA GARRO, P. (2001): "Eficiencia pública y privada en la producción de energía eléctrica en España", *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, vol. 10, núm. 1, pp. 9-20.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA (2007): *Panorama eléctrico actual*. Madrid: UNESA.
- BEN-DAYA, M.; DUFFUAA, S.O.; RAOUF, A. [ed.] (2000): *Maintenance, Modeling and Optimization*. Boston: Kluwer.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A.; RAMAN, R. (1998): *GAMS: A User's Guide*. Washington, D.C.: GAMS Development Corporation.
- CHATTOPADHYAY, D. (2004): "Life-Cycle Maintenance Management of Generating Units in a Competitive Environment", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, núm. 2, (mayo), pp. 1181-1189.
- CHRISTIAANSE, W.R.; PALMER, A.H. (1972): "A Technique for the Automated Scheduling of the Maintenance of Generating Facilities", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, núm. 1, (enero-febrero), pp. 137-144.

- DOPAZO, J.F.; MERRILL, H.M. (1975): "Optimal Generator Maintenance Scheduling Using Integer Programming", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, núm. 5, (septiembre-octubre), pp. 1537-1545.
- GARVER, L.L. (1972): "Adjusting Maintenance Schedules to Levelize Risk", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, núm. 5, (septiembre-octubre), pp. 2057-2063.
- GERTSBAKH, I.B. (2000): *Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance*. Berlín: Springer.
- GUREVICH, V.; FRANT, S.; BIANU, A. (1996): "Generating Units Maintenance Scheduling Optimizing Production Cost and Reliability", *12<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference*, pp. 858-864. Dresden.
- JEONG, I-J., LEON, V.J.; VILLALOBOS, J.R. (2006): "Integrated Decision-Support Systems for Diagnosis, Maintenance Planning, and Scheduling of Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, 1-19 (on-line access).
- KRALJ, L.B.; RAJAKOVIC, N. (1994): "Multiobjective Programming in Power System Optimisation: New Approach to Generator Maintenance Scheduling", *Electrical Power and Energy System*, vol. 16, núm. 4.
- LIN, C.E.; HUANG, C.J.; HUANG, C.L.; LIANG, C.C.; LEE, S.Y. (1992): "An Expert System for Generator Maintenance Scheduling Using Operation Index", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, núm. 3, (agosto), pp. 1141-1148.
- MUKERJI, R.; MERRILL, H.M.; ERICKSON, B.W.; PARKER J.H.; FRIEDMAN, R.E. (1991): "Power Plant Maintenance Scheduling: Optimizing Economics and Reliability", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, núm. 2, (mayo), pp. 476-483.
- STREMEL, J.P. (1981): "Maintenance Scheduling for Generation System Planning", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, (marzo), pp. 1410-1419.
- SWANSON, L. (2003): "An Information-Processing Model of Maintenance Management", *International Journal of Production Economics*, núm. 83, pp. 45-64.
- YAMAYEE, Z.A. (1982): "Maintenance Scheduling: Description, Literature Survey and Interface with Overall Operations Scheduling", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, núm. 8, (agosto), pp. 2770-2779.