

ANALES DE LAS JORNADAS EN INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
QUITO — ECUADOR

6210
E574an
1983

1672

EDITORIAL

El desarrollo tecnológico de nuestro país requiere no solo existencia de una demanda tecnológica por parte del sistema productivo, sino también del apoyo gubernamental y de la capacidad de la comunidad científica para satisfacer las necesidades del país. Las Universidades y Escuelas Politécnicas están formando los profesionales necesarios para tomar a cargo las tareas técnicas y, como bien lo demuestra esta publicación, contribuyen a realizar las investigaciones que permitan poner al alcance de nuestro medio las tecnologías más modernas.

El presente volumen recoge trabajos relacionados con Ingeniería Eléctrica y Electrónica en diferentes áreas: Sistemas de Control, Sistemas de Potencia, Sistemas Digitales, Máquinas Eléctricas, Telefonía, Instrumentación y Fuentes Alternativas de Energía. La profundidad con la que se han tratado los temas señalados muestra no solamente que estamos en capacidad de conocer las diversas facetas del avance tecnológico sino que, lo que es más importante, podemos apropiarnos de ellos sentando las bases para aplicar estos conocimientos en una forma crítica y creativa.

Es grato señalar que, en este año, se integra a las Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica un grupo valioso de profesores de la Universidad de Chile. Saludamos su presencia y estamos seguros de que, en la medida en que podamos ampliar las fronteras de nuestro diálogo, podremos encontrar mejores respuestas a las aspiraciones de los sectores más necesitados, aspiraciones que en gran parte tienen un denominador común latinoamericano.

Quito, mayo 27 de 1983

Ing. Alfonso Espinosa R.
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL



RESUMEN

En este trabajo se plantea la formulación del problema de programación del mantenimiento de generación como un problema de optimización de una función objetivo sujeta a restricciones usando programación lineal entera 0-1. La función objetivo es una función lineal de conveniencia del tipo $f(X) = C^T X$ en la cual los coeficientes C_i representan valoración de objetivos, por ejemplo para iniciar el mantenimiento pronto ó tarde en el año. Cada variable X_i puede tomar valores uno ó cero dependiendo de cuál sea la semana i en que se inicia el proceso de mantenimiento de una unidad.

El procedimiento se ha aplicado a la planificación del mantenimiento de generación del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador.

INTRODUCCION

Las empresas eléctricas gastan anualmente elevadísimos presupuestos en el mantenimiento de generación y no siempre consideran costos adicionales que son muy significativos. Estos incluyen costos de reposición de energía requerida cuando una unidad está fuera de servicio, pérdidas de venta de energía debido a la indisponibilidad de unidades y la necesidad de instalar capacidad generadora suficiente para permitir paradas ó salidas programadas y forzadas. [3]

El aumento en número, tamaño y complejidad de las unidades generadoras así como las interconexiones de sistemas eléctricos, exigen la elaboración y coordinación de los programas del mantenimiento de unidades generadoras como un problema que va acrecentando su dificultad e importancia en la planificación y operación de los sistemas de potencia. Los principales objetivos son la reducción en los costos de producción de energía y el aumento de la confiabilidad de operación del sistema, lo que implica un riguroso control en las salidas para mantenimiento. [4]

El procedimiento utilizado en la planificación del mantenimiento consiste en un método matemático que determine un programa donde el mantenimiento de las unidades sea económico y traduzca lo más aproximadamente posible las limitaciones de generación y recursos disponibles del sistema.

Dopazo y Merrill [1] utilizan programación lineal entera 0-1 resuelta por el algoritmo de enumeración implícita de Balas, para programación del mantenimiento de generación con funciones objetivo y restricciones lineales. La mayor ventaja de esta técnica es la de obtener el programa óptimo global, además de determinar algunos programas factibles. La programación lineal entera permite también la optimización en relación a una variedad de criterios objetivos tales como: nivelamiento de reserva, mínimo desvío del programa ideal, mínimo cambio del programa pre-establecido, programa de mínimo costo de mantenimiento. [5]

En este trabajo se presenta el problema de programación del mantenimiento de unidades generadoras formulado como un problema lineal entero 0-1 y la técnica de solución basada en un algoritmo de enumeración implícita. La idea es construir y probar un algoritmo eficiente basado en estudios realizados que permita hacer la programación del mantenimiento del Sistema Nacional.

1.- FORMULACION DEL PROBLEMA

El problema de programación del mantenimiento puede ser formulado como un programa lineal entero 0-1, cuya forma general es:

$$\text{Minimizar la función escalar: } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (1.1)$$

Sujeta a las restricciones lineales:

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} X_j \leq b_i, \quad i=1,2,\dots,m \quad (1.2)$$

$$C_j > 0 \quad \text{para } j=1,2,\dots,n$$

$$X_j = 0 \text{ ó } 1 \quad \text{para } j=1,2,\dots,n \quad (1.3)$$

Se define como solución de (1.1), al conjunto de n valores que satisfacen (1.3) y el número total de soluciones es 2^n . De ese número se denomina solución factible a toda solución que satisfaga (1.2) y solución óptima es la solución factible que tiene el menor valor de la función objetivo.

1.1.- VARIABLES

Cada elemento (variable independiente) del vector X corresponde a un período en el cual puede ser iniciado el mantenimiento de alguna unidad. A cada unidad está asociado un determinado número de variables correspondiente al número de períodos cuando puede ser iniciado el mantenimiento de la unidad. La resolución del problema consiste en determinar para cada unidad el período cuando su mantenimiento debe ser iniciado, por tanto, el vector X está compuesto de tantos subconjuntos de variables cuantos fueren las unidades a ser mantenidas, y tienen la siguiente forma:

$$X = [X_1 \text{-----} X_j \quad X_{j+1} \text{-----} X_j \quad \text{-----} X_p \text{-----} X_n] \quad (1.4)$$

Unidad 1 Unidad 2 Unidad N

donde para cualquier unidad:

$X_j = 1$: el mantenimiento de la unidad se inicia en el período correspondiente a la variable j .

$X_j = 0$: el mantenimiento de la unidad no se inicia en el período correspondiente a la variable j .

1.2.- FUNCION OBJETIVO

La función objetivo también se denomina función costo. Es importante la existencia de alternativas en los programas elaborados, para fines de comparación y para cuando se requiere cambiar el criterio objetivo ó el mismo programa debido a contingencias inesperadas.

Una de las grandes ventajas de la formulación del programa lineal entero es que permite la optimización respecto a una variedad de criterios ó funciones objetivo, algunas de las cuales serán discutidas a continuación:

1.2.1.- Función Objetivo "Programa lo más temprano posible"

En este tipo de función objetivo se atribuyen penalizaciones ó costos a los períodos en los cuales puede ser iniciado el mantenimiento de cada unidad, las cuales aumentan conforme el período relacionado a la variable se distancie del primer período disponible para el mantenimiento de la unidad.

La minimización de esta función costo implica la ob-
tención del programa en el cual el mantenimiento de
cada unidad es programado para efectuarse en el pe-
ríodo tan próximo como sea posible al 1er. período
disponible. Esta función objetivo presenta la si-
guiente forma:

$$C^T = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ \dots \ C_i \ C_{i+1} \ C_{i+2} \ \dots \ C_j \ \dots] \quad (1.5)$$

Unidad i Unidad j

donde $C_r < C_{r+1} < C_{r+2} \dots$ para una misma unidad.

Se puede representar esta función objetivo como un
conjunto de curvas penalización vs. períodos de man-
tenimiento para cada unidad como en la figura 1:

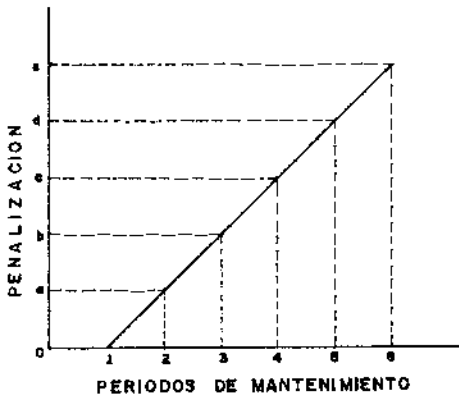


Fig. 1.- Curva penalización vs. período de manteni-
miento para cada unidad, para función obje-
tivo "Programa lo más temprano posible".

1.2.2.- Función Objetivo para Mínimo Cambio de Pro-
grama Pre-Establecido

Esta función objetivo puede ser considerada princi-
palmente en las siguientes situaciones:

- a) Variación imprevista en el modelo de carga.
- b) Contingencias inesperadas en el modelo de gene-
ración.

Es importante encontrar la mejor alternativa en la
salida de las unidades que cause la mínima altera-
ción en las condiciones de operación pre-estableci-
das. Generalmente cuando se presentan esas situa-
ciones se tiene un programa cumplido parcialmente,
que necesita ser reformulado a partir de ese momen-
to, y es deseable encontrar un nuevo programa que
se desvíe lo mínimo posible del programa previamen-
te establecido.

En el caso de adición de nuevas unidades al progra-
ma de mantenimiento, la función objetivo presenta
la siguiente forma:

$$C^T = [C_1 \ \dots \ C_i \ C_{i+1} \ \dots \ C_j \ C_{j+1} \ \dots \ C_p \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \quad (1.6)$$

Unidades antiguas Unidades nuevas
Programa existente

Otras situaciones de reformulación de programas pre-
establecidos, pueden considerarse como casos parti-
culares de la expresión (1.6).

1.2.3.- Función Objetivo "Mínimo Costo de Manteni-
miento"

Esta función objetivo sirve para cuantificar pena-
lizaciones por anticipación ó retraso del tiempo j
ideal de mantenimiento. Curvas como la de la Fig. 2
pueden ser desarrolladas para cada unidad del Sis-
tema.

La presencia de restricciones probablemente no per-
mitirá que cada unidad sea mantenida en su respecti-
vo período óptimo individual. La suma de los cos-
tos de todas las unidades da el costo global del man-
tenimiento del sistema, que minimizado provee el me-
jor programa para el sistema en conjunto.

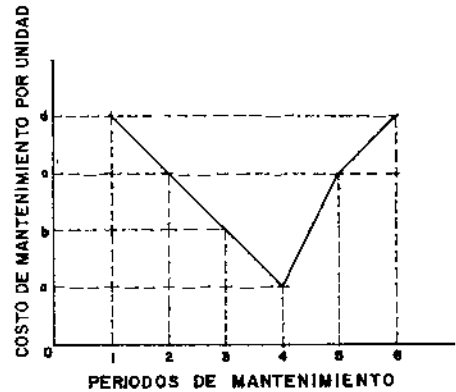


Fig. 2.- Curva costo de mantenimiento vs. tiempo
para una unidad generadora.

1.2.4.- Función Objetivo para Nivelamiento de Re-
serva

La reserva neta para cada período es la diferencia
entre la capacidad total instalada y la suma de la
demanda máxima y la capacidad utilizada en manteni-
miento en cada período, y puede ser determinada por
la ecuación:

$$R_N = C_t - (D_m + C_m) \quad (1.7)$$

donde C_t : capacidad total instalada.

D_m : demanda máxima del período m .

C_m : capacidad utilizada en mantenimiento en
el período m .

$C_t - D_m$: reserva bruta del período m .

El objetivo es maximizar la mínima reserva neta, o
sea permitir la mayor reserva posible en cada pe-
ríodo. La maximización de la mínima reserva neta
implica una función costo no lineal, como el algo-
ritmo requiere una función objetivo lineal, esta
puede ser representada por un vector de coeficien-
tes nulos ($C_j = 0$ para toda j) asociado a un conjun-
to de restricciones de capacidad. [1]

1.3.- RESTRICCIONES

La presencia de restricciones en el problema de pro-
gramación del mantenimiento permite en la mejor for-
ma posible involucrar en el programa a obtenerse,
las limitaciones de capacidad y el máximo aprovecha-
miento de los recursos disponibles del sistema co-
mo: equipos, cuadrillas de mantenimiento, etc. Sa-
tisfaciendo esas restricciones se garantiza conti-
nuidad de servicio, disponibilidad de cuadrillas de
mantenimiento y equipos y mantenimiento ininterru-
pido en la frecuencia adecuada.

Los principales tipos de restricciones empleados en
este método son:

RESTRICCIONES EN EL INTERVALO DISPONIBLE PARA LA SA-
LIDA

Imponen los períodos permisibles en los cuales el mantenimiento de cada unidad puede ser iniciado, basándose en datos estadísticos ó historial de ciclos de mantenimiento de cada unidad.

RESTRICCIONES EN LA DURACION DE LA SALIDA

Permiten que cada unidad permanezca en mantenimiento solo durante el tiempo especificado ó previsto.

RESTRICCIONES PARTICULARES

Permiten que cada unidad sea mantenida exactamente una sola vez durante su intervalo disponible para mantenimiento.

RESTRICCIONES DE SECUENCIA

Es conveniente establecer un orden para las salidas a mantenimiento, e intervalos entre salidas para unidades pertenecientes a una misma cuadrilla de mantenimiento. También estas restricciones pueden imponer simultaneidad en el mantenimiento de 2 ó más unidades.

RESTRICCIONES DE CAPACIDAD DISPONIBLE PARA MANTENIMIENTO

Limitan el número de MW. disponibles para mantenimiento en cada período, considerando la capacidad total instalada, las demandas máximas en cada período y la mínima reserva neta requerida (constante) durante el intervalo planificado del mantenimiento.

RESTRICCIONES DE EXCLUSION

Limitan la salida simultánea de 2 ó más unidades pertenecientes a una misma cuadrilla de mantenimiento.

Todas estas restricciones están representadas para un ejemplo, en la Tabla I que consiste en un sistema eléctrico pequeño de 3 unidades.

TABLA I

Coefficientes de matriz A y vector b de restricciones de un ejemplo de sistema de 3 unidades [2]

| TIPO DE RESTRICCIÓN | A | | | | | | | | b |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| | UNIDAD 1 (80 MW) | | | UNIDAD 2 (110 MW) | | | UNIDAD 3 (50 MW) | | |
| | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | PERÍOD. INICIO de mantenimiento: | |
| | 1° | 2° | 3° | 1° | 2° | 3° | 2° | 3° | |
| | Variables: | | | Variables: | | | Variables: | | |
| | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | |
| R. PARTICULARES | 1 | 1 | 1 | | | | | | = 1 |
| | | | | 1 | 1 | 1 | | | = 1 |
| | | | | | | | 1 | 1 | = 1 |
| R. DE SECUENCIA | | | | 1 | | | -1 | | ≤ 0 |
| | | | | | 1 | | | -1 | ≤ 0 |
| | | | | | | 1 | | | ≤ 0 |
| R. DE CAPACIDAD | 80 | | | 110 | | | | | ≤ 150 |
| | 80 | 80 | | | 110 | | 50 | | ≤ 170 |
| | | 80 | 80 | | | 110 | 50 | 50 | ≤ 180 |
| | | | 80 | | | | | 50 | ≤ 120 |
| R. DE EXCLUSION | 1 | | | 1 | | | | | ≤ 1 |
| | 1 | 1 | | | 1 | | | | ≤ 1 |
| | | 1 | 1 | | | 1 | | | ≤ 1 |

2.- TECNICA DE OPTIMIZACION

El método de optimización que se utiliza está basado en los métodos de enumeración implícita relacionados al método de E. Balas. El algoritmo consiste en la búsqueda a través de un árbol de soluciones, garantizando la enumeración de todas las 2ⁿ soluciones, de las cuales la gran mayoría son enumeradas implícitamente por medio de pruebas de factibilidad.

El mantenimiento de cada unidad puede ser iniciado solamente una vez y está asociado, en cada solución, a una única variable perteneciente al subconjunto de variables correspondientes a cada unidad, asignando el valor nulo al resto de variables del subconjunto. Esto determina que el problema de programación del mantenimiento de generación sea un caso particular de programación lineal entera 0-1, que permite además la simplificación en el desenvolvimiento del árbol de soluciones por la eliminación de una serie de soluciones ya sea implícitamente dentro del programa ó a través de las restricciones particulares ya indicadas, sin enumerar todas las 2ⁿ soluciones.

El árbol de soluciones para el problema de programación está representado en la Figura 3. Está compuesto de tantos niveles cuantas fueren las unidades a ser mantenidas, y cada nivel contiene subconjuntos de ramas que representan todas las alternativas de solución para cada unidad correspondiente.

2.1.- DESCRIPCION DEL METODO DE BUSQUEDA

El proceso puede iniciar con una solución factible ó no, analizando su factibilidad en cada nivel, en caso de no haber factibilidad deriva otras soluciones a través de pruebas hasta determinar una solución factible, a partir de la cual se van generando soluciones factibles con un valor de función objetivo (Z) cada vez menor. El proceso concluye cuando se ha encontrado la última solución factible (la de menor valor de función objetivo) que constituye la solución óptima del problema.

Para comprender de mejor manera este método, se requiere hacer las siguientes definiciones: [4]

Sea el conjunto J_k, constituido por los índices de las variables X_j = 1 correspondientes al inicio del mantenimiento en cada unidad, y que caracteriza a la solución inicial (factible ó no):

$$S_k \rightarrow J_k = \{P_1 P_2 P_3 \dots P_N\} \quad (2.1)$$

donde:

P_i: índice de la variable independiente igual a 1 y asociada a la unidad i.

El conjunto J_k está constituido por los subconjuntos:

J_f y J_q.

J_f: conjunto de índices de variables independientes ya analizadas y verificadas su posibilidad de ser parte de una solución factible.

J_q: conjunto de índices de variables independientes a ser analizadas.

Para el análisis de factibilidad de la solución S_k al nivel j:

$$J_k = \{P_1 P_2 \dots P_{j-1} P_j \dots P_N\}, \quad n_k = N$$

$$J_f = \{P_1 P_2 \dots P_{j-1}\}, \quad n_f = j-1 \quad (2.2)$$

$$J_q = \{P_j P_{j+1} \dots P_N\}, \quad n_q = N-(j-1)$$

Donde: N: número de unidades a ser mantenidas.

n_j: número de elementos del conjunto J_f.

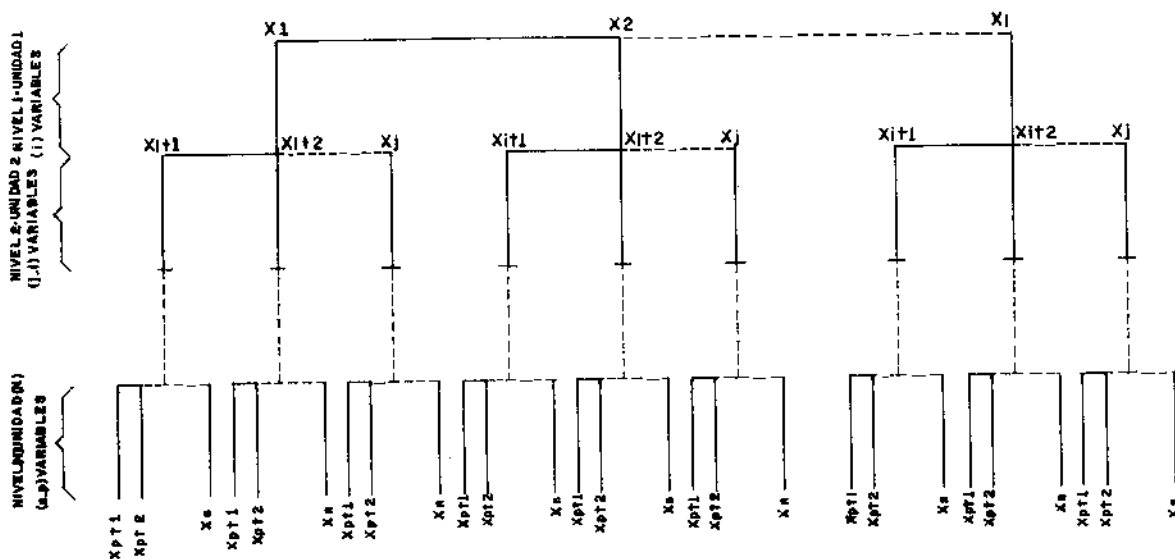


Figura 3. - Arbol de soluciones de problema del mantenimiento de generación.

De estos conjuntos se define que solución parcial es toda solución S_k donde $n_f < N$.

SOLUCION DESCENDIENTE (S_d) de S_k es toda solución a la cual está asociada un conjunto de índices J_d tal que $J_f \subset J_d$, siendo J_f asociado a S_k . La progresión en los niveles del árbol de soluciones es efectuada en orden creciente, tal que en cada nivel donde es hecho el análisis de factibilidad es generada una solución descendiente, aumentándose el conjunto J_f con un elemento que pertenece al conjunto J_d .

Constituye un importante aspecto en la eficiencia de la búsqueda, la determinación de la solución inicial denominada solución nominal (que no puede ser factible), que representa a la rama más izquierda del árbol de soluciones:

$$S_0 \rightarrow J_0 = \{1 \ (i+1) \ \dots \ p\} \quad (2.3)$$

Cabe anotar que cada elemento del vector J_k puede tener tantos valores cuantas fueren las variables que corresponden a cada unidad. Así para una unidad j :

$$J_k = \{P_1 \ P_2 \ \dots \ P_j \ \dots \ P_N\} \quad (2.4)$$

$$P_j = 1, \dots, m$$

donde:

- 1 : índice de la variable correspondiente a la unidad j .
- m : índice de la última variable correspondiente a la unidad j .

La progresión a través de los niveles del árbol de soluciones permite analizar la factibilidad para la solución al nivel considerado. Así si una solución (parcial) es factible en el nivel j , las variables pertenecientes a $J_f = \{P_1 \ P_2 \ \dots \ P_j\}$ pueden ser parte de una solución factible completa.

La progresión en los niveles en orden creciente implica el aumento del # de elementos del conjunto J_f hasta el número de unidades a ser mantenidas. De

esta forma una solución es analizada en todos los niveles hasta ser declarada completamente factible.

Son importantes los siguientes factores durante el proceso de búsqueda:

Enumeración hacia atrás

Se aplica cuando una solución S_k con su correspondiente J_k es detectada no factible en el nivel j , primeramente se deben analizar las otras alternativas de este nivel hasta que se encuentre una que otorgue factibilidad a esta solución en ese nivel, si ninguna alternativa fuese factible se debe aplicar la enumeración hacia atrás. Este procedimiento consiste en lo siguiente:

El índice de la variable no nula correspondiente a la unidad asociada al nivel considerado, vuelve a asumir el valor de la solución nominal y se regresa al nivel anterior para analizar la factibilidad de una nueva alternativa variándose el índice de variable no nula de este nivel.

Además este análisis de factibilidad será efectuado para obtener un menor valor de función objetivo que el asociado a la solución factible completa obtenida anteriormente, lo que asegura la eliminación de una serie de soluciones que no necesitan ser analizadas, aunque entre ellas hayan soluciones factibles pero que están asociadas a igual ó mayor valor de función objetivo lo que constituye enumeración implícita. Por esta razón la enumeración hacia atrás se la aplica también cuando se ha encontrado una solución completamente factible.

Terminación del Proceso

El proceso termina en uno de los siguientes casos:

- Cuando se ha determinado la solución factible de menor valor de función objetivo (solución óptima).
- Cuando todas las soluciones han sido analizadas sin haberse encontrado ninguna solución factible.

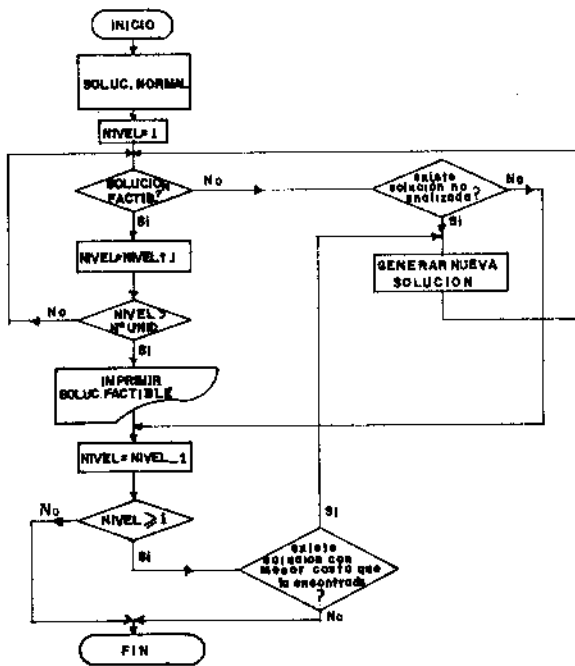


Figura 4.- Diagrama de bloques del Algoritmo de Enumeración Implícita para encontrar la solución óptima del problema de programación del mantenimiento de generación.

3.- CASOS DE ESTUDIO

En este trabajo se presenta al S.N.I. del Ecuador como ejemplo de aplicación de esta metodología. El mantenimiento es programado sobre un intervalo de tiempo total de 26 períodos quincenales (1 año), tomando en cuenta únicamente las 20 unidades que pertenecen al INECEL. En el APENDICE A están indicados los datos del sistema y del problema del mantenimiento.

Se efectuaron las siguientes consideraciones:

- Entre las 20 unidades indicadas están incluidas las 5 unidades de 100 MW del Proyecto Paute, fases A y B.
- Se mantiene constante la capacidad instalada total durante todo el intervalo de mantenimiento, ya que las centrales hidroeléctricas tienen reservorio y no están limitadas por el régimen de estiaje; además ninguna unidad se encuentra indisponible para operación y mantenimiento al mismo tiempo.
- Se consideró la demanda total del país durante 1983, incluyendo la de los sistemas eléctricos de Sto. Dgo., Milagro y Centro-Sur.
- Se adoptó como mínima reserva neta requerida (asignación constante para contingencias) el 10% de la mayor demanda quincenal.
- También se consideró que el mantenimiento en ca-

da central sea continuado, con salida secuencial de sus unidades.

- Para consideraciones de reservas se utilizaron las siguientes expresiones:

$$\text{Reserva bruta} = \text{Capacidad total instalada} - \text{Demanda máxima.}$$

$$\text{Capacidad disponible para mantenimiento} = \text{Reserva bruta} - \text{Mínima reserva requerida}$$

$$\text{Reserva neta} = \text{Reserva bruta} - \text{Capacidad utilizada en mantenimiento.}$$

A.- Programa Lo más Temprano Posible

En este caso los coeficientes de la función objetivo (costos asociados a cada período) tienen orden ascendente para cada conjunto de variables correspondientes a cada unidad, pues lo que se persigue es que el mantenimiento de cada unidad inicie lo más pronto posible, en el 1er. período disponible, o lo más próximo a éste en cada unidad.

Como resultados se obtuvieron 10 soluciones factibles incluyendo la solución óptima que presentó un valor de función objetivo igual a 14.

A este criterio no le interesa mayormente el asunto de reservas, ya que todas sobrepasan el margen de mínima reserva neta requerida tomada como 74 MW, fija durante todo el proceso.

Constituye un criterio de conveniencia, que obliga al algoritmo a encontrar soluciones con variables que tiendan a la que corresponde al 1er. período disponible correspondiente a cada unidad lo que involucra generalmente el aprovechamiento de los primeros períodos del intervalo de tiempo asignado para el mantenimiento de generación de un sistema.

B.- Mínimo Cambio de Programa Pre-Establecido

Se consideró como contingencia un crecimiento imprevisto en la demanda del S.N.I. a partir del 7° período (quincena) del intervalo total, lo que implicó que parte de la reserva de generación entre en operación y se difirieran algunas salidas para mantenimiento.

Lógicamente en los resultados se observa una disminución en la reserva neta a partir del 7° período, y el retraso de las salidas de las unidades del Paute como se puede apreciar en las tablas II y III, esto se debe a que la capacidad disponible para mantenimiento disminuyó y no permitió que en el 10° período estén fuera simultáneamente Paute (100 MW), Santa Rosa (17 MW) y Estero Salado Gas (20 MW). También aumentó el valor de la función objetivo.

C.- Nivelamiento de Reserva Neta

Los resultados de los casos anteriores fueron obtenidos con un nivel fijo de mínima reserva requerida, tal que la capacidad disponible para mantenimiento permanecía constante durante el proceso.

El nivelamiento de reserva se lo realiza aumentando sistemáticamente el nivel de mínima reserva requerida o sea restringiendo cada vez más a la capacidad disponible para mantenimiento cuando un programa factible ha sido encontrado hasta que esta capacidad (b) no permita la obtención de una solución.

De esta manera la mínima reserva es maximizada y la última solución obtenida es la óptima en relación a este criterio.

TABLA II

Programa óptimo - Lo más temprano posible -

| PERIODOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|----|----|--|
| 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 | |
| | | | | | Pis1 | Pis1 | Pis2 | Pis2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Esm1 | Esm1 | Esm1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Sr1 | Sr1 | Sr2 | Sr2 | Sr3 | Sr3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Esv1 | Esv1 | Esv1 | Esv2 | Esv2 | Esv2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | Esg4 | Esg4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Pau1 | Pau1 | Pau2 | Pau2 | Pau3 | Pau3 | Pau4 | Pau4 | Pau5 | Pau5 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | TQ1 | TQ1 | TQ2 | TQ2 | TQ3 | TQ3 | TQ4 | TQ4 | TQ5 | TQ5 | TQ6 | TQ6 | | | |

TABLA III

Programa óptimo - Mínimo cambio de programa pre-establecido -

| PERIODOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|----|----|--|
| 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 | |
| | | | | | Pis1 | Pis1 | Pis2 | Pis2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Esm1 | Esm1 | Esm1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Sr1 | Sr1 | Sr2 | Sr2 | Sr3 | Sr3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Esv2 | Esv2 | Esv2 | Esv3 | Esv3 | Esv3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | Esg4 | Esg4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Pau1 | Pau1 | Pau2 | Pau2 | Pau3 | Pau3 | Pau4 | Pau4 | Pau5 | Pau5 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | TQ1 | TQ1 | TQ2 | TQ2 | TQ3 | TQ3 | TQ4 | TQ4 | TQ5 | TQ5 | TQ6 | TQ6 | | | |

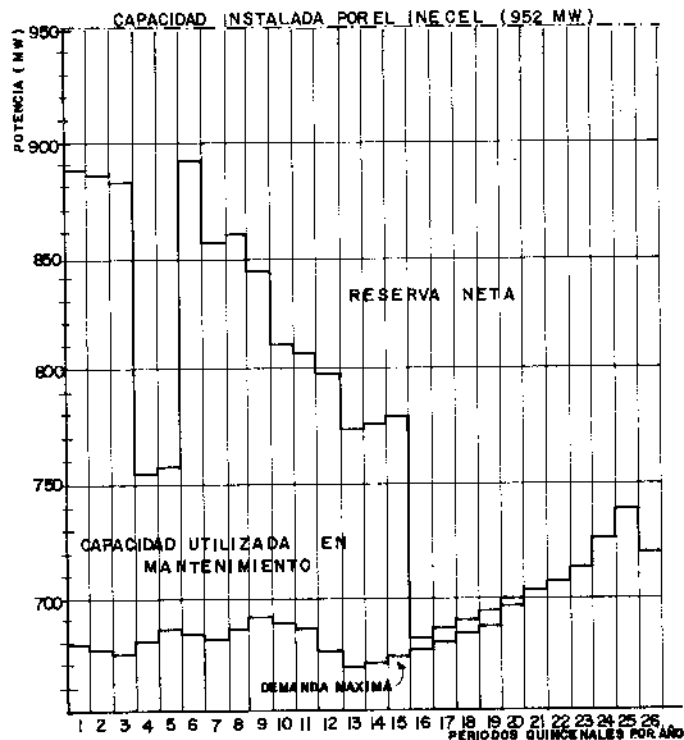


Figura 5.- Programa de Nivelamiento de Reserva (Min.Res. = 0 MW)

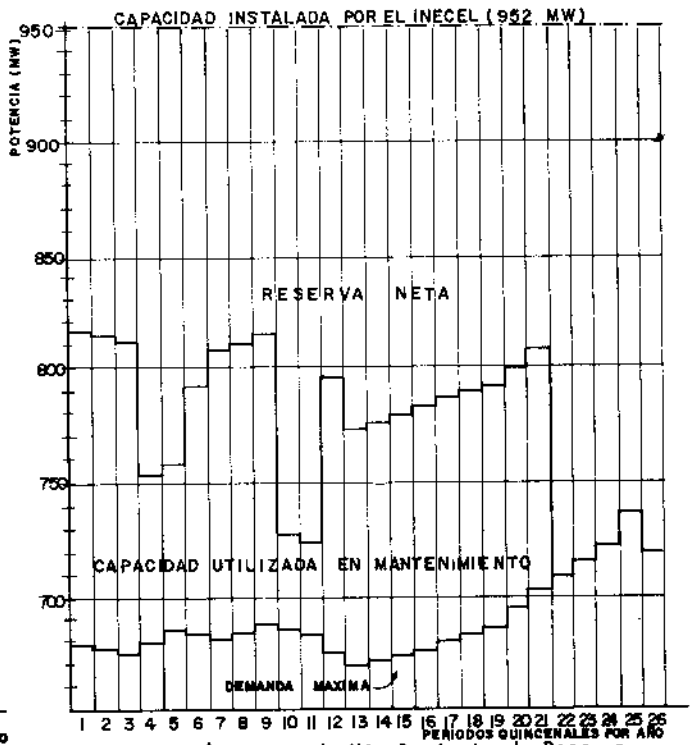


Figura 6.- Programa de Nivelamiento de Reserva (Min.Res. = 138 MW)

Los resultados indican que considerando toda la reserva bruta como capacidad disponible para mantenimiento (min.reserva requerida = 0) se obtuvo un programa con una máxima reserva de 271 MW y una mínima reserva de 61 MW. El último programa factible, que constituyó el óptimo, presenta una máxima reserva de 244 MW y una mínima reserva de 138 MW.

En las Figuras 5 y 6, se puede observar claramente la diferencia entre estos 2 programas, y una mejor distribución de la reserva en el último.

D.- Mínimo costo de mantenimiento

Para este caso se requieren costos de mantenimiento asociados a los periodos disponibles, tanto para el periodo ó periodos ideales como para los que están próximos a él. Se necesita saber exactamente cuando debería comenzar el mantenimiento (programado) de cada unidad, para determinar la fecha de la parada óptima así como la penalización ó costo en el que se incurre por desviación de este óptimo.[2]

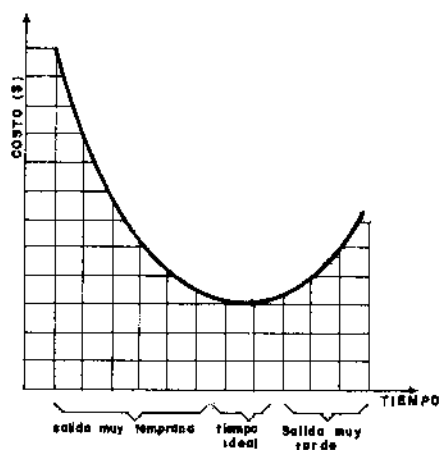


Figura 7.- "Costo esperado" de mantenimiento (\$) como función de tiempo entre salidas programadas (tiempo).

4.- CONCLUSIONES

En relación al algoritmo, la presencia de restricciones a más de reflejar la disponibilidad de recursos del sistema, permite el cancelamiento de mayor número de variables y la eliminación de un gran número de soluciones obteniéndose la solución óptima más rápidamente.

Las principales ventajas de la programación lineal entera 0-1 son:

- Siempre que un problema tenga solución, encuentra la solución óptima, lo que constituye una gran ventaja sobre otros métodos computacionales.
- La simplicidad con que se puede formular el problema de programación de mantenimiento.
- La eliminación de un gran número de soluciones por la naturaleza bivalente de las variables. Además trabaja con valores enteros y las operaciones que realiza son apenas adiciones, sustracciones y comparaciones, y no tiene problemas de redondeo.

Respecto al análisis de los casos de estudio, lo fundamental es asegurar la periodicidad y continuidad del mantenimiento. En el programa "Lo más temprano posible" se ha logrado optimizar en cuanto a la premura del tiempo desde el último mantenimiento de cada unidad de acuerdo a la disponibilidad de recursos del sistema, que al igual que el caso de "Mínimo cambio de programa pre-establecido" traduzcan eficientemente un mantenimiento económico lo que está explícitamente enunciado en el caso del "Mínimo costo de mantenimiento".

En cambio, el Nivelamiento de Reserva no es una función de costo, lo que implica que no siempre conduce al mejor programa en términos económicos y sea coherente con los recursos disponibles del sistema, ya que está sujeta solo a las restricciones de capacidad disponible para mantenimiento en cada periodo. Lo que interesa en el nivelamiento de reserva es una mejor distribución de la reserva a lo largo del intervalo total de mantenimiento para conseguir una mucha mayor confiabilidad en la operación del sistema y continuidad de servicio. Entonces sería necesario asociar el nivelamiento de reserva a un criterio objetivo que permita además un mantenimiento económico.

Se pueden incorporar al problema consideraciones más reales, y sería muy importante trabajar con los costos de mantenimiento asociados a la anticipación y retraso del tiempo ideal o recomendado para mantenimiento.

APENDICE A

DATOS DEL SISTEMA Y DEL PROBLEMA DE PROGRAMACION DE MANTENIMIENTO

- Número de centrales del sistema = 7
- Número de unidades del sistema = 20
- Número total de periodos para mantenimiento = 26 (quincenas)
- Capacidad total instalada = 952 MW.

TABLA IV

| NOMBRE UNIDAD | MW | DURA PERIODOS | PER. DISPO. PRIM. | ULT. | NUMERO DE VARIABLE. |
|---------------|-----|---------------|-------------------|------|---------------------|
| PISAY. 1 | 35 | 2 | 6 | 21 | 13 |
| PISAY. 2 | 35 | 2 | 6 | 21 | |
| ESMER 1 | 135 | 3 | 1 | 14 | 12 |
| S. ROSA 1 | 17 | 2 | 7 | 22 | 11 |
| S. ROSA 2 | 17 | 2 | 7 | 22 | |
| S. ROSA 3 | 17 | 2 | 7 | 22 | |
| ESV. 2 | 73 | 3 | 1 | 16 | 9 |
| ESV. 3 | 73 | 3 | 1 | 16 | |
| E.S.G. 4 | 20 | 2 | 7 | 16 | 9 |
| PAUTE 1 | 100 | 2 | 6 | 21 | 7 |
| PAUTE 2 | 100 | 2 | 6 | 21 | |
| PAUTE 3 | 100 | 2 | 6 | 21 | |
| PAUTE 4 | 100 | 2 | 6 | 21 | |
| PAUTE 5 | 100 | 2 | 6 | 21 | |
| T.Q.D. 1 | 5 | 2 | 9 | 26 | 7 |
| T.Q.D. 2 | 5 | 2 | 9 | 26 | |
| T.Q.D. 3 | 5 | 2 | 9 | 26 | |
| T.Q.D. 4 | 5 | 2 | 9 | 26 | |
| T.Q.D. 5 | 5 | 2 | 9 | 26 | |
| T.Q.D. 6 | 5 | 2 | 9 | 26 | |
| | | | | | |
| | | | | | |

APENDICE B

El programa de computación tiene capacidad para 100 variables y 100 restricciones. El ejemplo del SNI fue corrido en un computador PRIME 550 demorándose en el proceso 540 seg.

5.- REFERENCIAS

1. Dopazo J.F., Merrill H.M., "Optimal Generator Maintenance Scheduling using Integer Programming", IEEE, PAS-94, N° 5, Sept./Oct. 1975. pp. 1537-1545.
2. Merrill H.M., "Power Plant Maintenance Scheduling with Integer Programming", IEEE Tutorial on Application of Optimization Methods in Power System Engineering, 76 CH 1107-2PWR, pp. 44-51, 1976.
3. Dopazo J.F., Merrill H.M., "Power Plant Maintenance Scheduling-- A Survey", Presented at the 42nd. American Power Conference, Chicago, Illinois, April 21-23, 1980.
4. Souza Roberto de, "Soluciones óptimas de escalas de manutencao de generadores a través de programacao linear inteira", Universidade Federal de Santa Catarina, Febrero 1981.
5. Electrobras - UFSC, "Escalonamiento de unidades para manutencao".
6. Aguirre Proaño Roberto, "Programación del Mantenimiento de Generación", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Marzo 1983.

BIOGRAFIAS



AGUIRRE PROAÑO, ROBERTO. Nació en Quito, el 28 de Mayo de 1957, obtuvo su Bachillerato en el Colegio "Sebastián de Benalcazar" en 1976. Estudios Superiores en la Escuela Politécnica Nacional, título de Ingeniero Eléctrico en Marzo de 1983.



MENA PACHANO, ALFREDO. Nació en Ambato, Ecuador, en 1944 y se graduó de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, en 1966. Realizó estudios de Post-Grado en Técnicas de Alta Tensión en la Universidad Técnica de Braunschweig, Alemania Federal hasta fines de 1967 y posterior

mente obtuvo la Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en el Instituto Tecnológico de Monterrey, México. Desde 1966 ha dedicado la mayor parte de su tiempo a la docencia superior en la Escuela Politécnica Nacional en donde es Profesor Principal desde 1973.

Fue Presidente de la Asociación de Profesores de la Politécnica, Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Presidente del Colegio de Ingenieros Eléctricos de Pichincha, Vicepresidente de la sección Ecuador del

IEEE, Vicepresidente de la Sociedad de Ingenieros del Ecuador (SIDE). Fue también miembro del Directorio del Instituto Ecuatoriano de Telecomunicaciones en representación de SIDE y actualmente es miembro principal del Directorio del Instituto Ecuatoriano de Electrificación en representación del Colegio Nacional de Ingenieros Eléctricos.