



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

---

## **Aplicación de Algoritmos Genéticos para la Definición del Despacho de Unidades Generadoras Hidroeléctricas**

**Mario Enrique López Acosta<sup>1</sup>, Anastacio Sebastián Arce Encina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción- Sede Alto Parana (UCAP)

<sup>2</sup>Universidad Nacional del Este (UNE)

**Paraguay**

### **RESUMEN**

El despacho de unidades generadoras hidroeléctricas define el número de máquinas que serán comprometidas para atender la demanda a cada intervalo de tiempo. Este trabajo presenta un modelo de despacho de unidades generadoras hidroeléctricas que adopta como criterios de desempeño el caudal turbinado hora a hora, el número de arranques y paradas de unidades generadoras y la combinación de los criterios anteriores, llevando en cuenta el costo de los arranques y paradas de las unidades generadoras y el valor del volumen de agua ahorrado a través del despacho. El problema del despacho de unidades generadoras se caracteriza como un problema de programación mixta entero-no lineal y combinatorio, cuya solución puede complicarse en la medida que el número de unidades generadoras disponibles aumenta. En este trabajo se propone como método de solución la aplicación de técnicas de Algoritmo Genético.

### **PALABRAS CLAVES**

Despacho de unidades generadoras, caudal turbinado, arranques y paradas, optimización multiobjetiva, algoritmos genéticos, centrales hidroeléctricas, generación programada.



## 1 INTRODUCCIÓN

Un sistema hidrotérmico de generación eléctrica requiere de una cadena de planeamiento para una operación eficiente, económica y segura. En el planeamiento de la operación de largo plazo, los reservorios juegan un papel muy importante en la transferencia del agua del periodo húmedo para el periodo seco. En esta etapa normalmente son omitidos los detalles relacionados al modelado de las unidades generadoras.

En el planeamiento de la operación de corto plazo se busca determinar un programa de producción que sea compatible a las metas definidas por el Planeamiento de Largo Plazo y la red eléctrica. En esta fase, es realizada la integración del planeamiento energético con los requisitos operativos, donde se busca la compatibilidad de los aspectos operacionales y la administración de los recursos energéticos. Esencialmente, en esta etapa, se establece un punto de operación para cada intervalo de tiempo que servirá como referencia para la operación en tiempo real.

En los últimos años, varios trabajos realizados enfocaron sus estudios en el planeamiento de la operación de corto plazo considerando sistemas predominantemente hidroeléctricos, donde la decisión del número de unidades generadoras en operación a lo largo del día y sus respectivos puntos de operación tienen fuerte influencia sobre la eficiencia del sistema [1]. El criterio de desempeño adoptado en los sistemas de generación termoeléctrica fundamentalmente está relacionado al costo del combustible utilizado en la producción y en el proceso de arranque y parada de las unidades generadoras. En los sistemas de generación hidroeléctrica tales criterios de desempeño no se aplican ya que no existe un costo directo asociado al uso del agua ni un estudio conclusivo sobre el costo asociado a los arranques y paradas de las unidades hidroeléctricas.

Este trabajo presenta un modelo de despacho de unidades generadoras hidroeléctricas que adopta como criterio de desempeño el caudal turbinado total del conjunto de unidades en operación, el número de arranques y paradas de unidades generadoras y la combinación de los criterios anteriores, llevando en cuenta el costo de los arranques y paradas de las unidades generadoras y el valor del volumen de agua ahorrado a través del despacho. Se propone como método de solución la aplicación de técnicas de Algoritmo Genético.

## 2 CRITERIO DE DESEMPEÑO

El despacho de unidades generadoras hidroeléctricas define el número de máquinas que serán comprometidas para atender la demanda a cada intervalo de tiempo. Este número de máquinas varía conforme la carga varía a lo largo del día. Debido a esta variación del número de máquinas necesarias para satisfacer la demanda, surge la posibilidad de optimizar un criterio de despacho.

La función de producción de una unidad generadora hidroeléctrica es dada por la siguiente ecuación:

$$P = \rho \times g \times n_{tur} \times n_g \times h \times q \times 10^{-6} \quad (1)$$

Donde:  $\rho$  es el peso específico del agua;  $g$  la aceleración de la gravedad;  $n_{tur}$  y  $n_g$  son los rendimientos de la turbina y del generador, respectivamente;  $h$  es la altura de salto neto;  $q$  es el caudal turbinado;  $P$  es la potencia generada por una unidad generadora.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

La altura de salto neto a su vez es definida como siendo la diferencia entre la altura bruta ( $h_b$ ) y las pérdidas hidráulicas ( $h_p$ ).

El rendimiento  $n_g$  que representa las pérdidas en el generador, normalmente es dado como una función que depende de los valores de potencia obtenida en los bornes del generador, conforme a la Figura 1. Se puede apreciar que los mayores niveles de eficiencia se obtienen próximos a los valores nominales del generador.

El rendimiento  $n_{tur}$  a su vez representa las pérdidas en la turbina y normalmente es obtenido como una función que depende de la altura de salto neto y del caudal turbinado, conforme mostrado en la Figura 2. Se puede notar que el rendimiento de la turbina varía con la altura de salto neto y el caudal turbinado. La producción con mayores valores de rendimiento resultará en un mejor aprovechamiento del recurso hídrico obteniendo la misma producción energética para un volumen inferior de agua turbinada. El objetivo del despacho de unidades generadoras es definir el número necesario para atender a la demanda y operar en las proximidades del punto de mayor rendimiento.

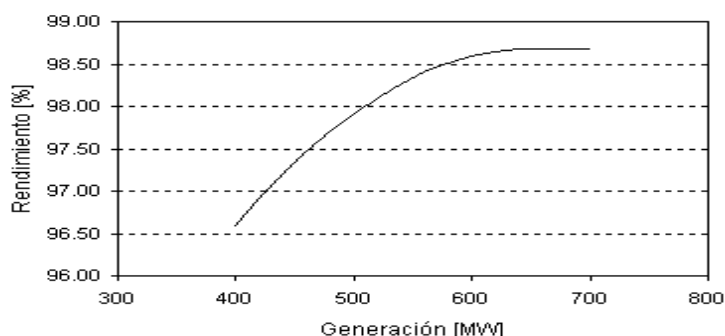


Figura 1: Rendimiento del generador

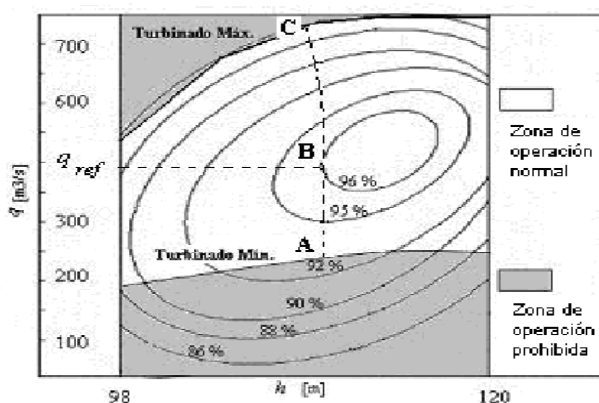


Figura 2: Rendimiento de la turbina

## 2.1 Arranques y Paradas de unidades generadoras

El proceso de arranques o paradas de las unidades generadoras hidroeléctricas, a diferencia de las termoeléctricas, es rápido y prácticamente sin ningún costo. Existe sin embargo algunos aspectos como los riesgos de una eventual falla que puede ocurrir tanto en el proceso de arranque o de parada

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

que dejaría la unidad indisponible para operar y las consecuencias económicas asociadas a la misma. Así también existen los desgastes de los componentes mecánicos, eléctricos y equipos de control asociados a los frecuentes arranques y paradas. A pesar de los inconvenientes citados no existe un estudio conclusivo que permite cuantificar el valor de un arranque o una parada de una unidad hidroeléctrica. En este trabajo será utilizado como referencia el valor estimado en [2], el cual establece que cada parada o arranque tiene un costo equivalente a 3,0 US\$ por MW de potencia nominal de la unidad generadora.

## 2.2 Caudal Turbinado

El despacho que maximiza la eficiencia buscará alcanzar la meta de producción con el menor consumo del recurso hídrico. La curva de eficiencia del generador muestra una saturación próxima a los valores nominales por lo que puede ser considerado como una constante. Sin embargo, la curva de eficiencia de la turbina presenta variaciones en un espectro mayor según varíe el caudal turbinado.

De la Figura 2 se puede deducir que para cada valor de salto neto existe un valor ideal de caudal a ser turbinado para obtener el mejor rendimiento. Por ejemplo, para un salto neto en la línea del punto A, se puede verificar que la producción de una unidad generadora turbinando  $600 \text{ m}^3/\text{seg}$  será diferente de la producción de dos unidades generadoras cada una turbinando  $300 \text{ m}^3/\text{seg}$ , debido al rendimiento. Las unidades con turbinado de  $300 \text{ m}^3/\text{seg}$  estarán con un rendimiento aproximado de 95 %, mientras que la unidad con turbinado de  $600 \text{ m}^3/\text{seg}$  estará con un rendimiento aproximado de 92 %. Este mismo raciocinio se aplica a la generación de un mismo valor de potencia con diferentes números de unidades generadoras, es decir, existe un número ideal de unidades generadoras asociado para cada valor de salto y potencia a ser generada.

La obtención de una configuración ideal de unidades generadoras puede ser obtenida analizando la Figura 3. Se puede notar que para cada valor de altura bruta y potencia a ser generada existe un número de unidades generadoras que resulta con el menor valor de caudal turbinado. Esta figura puede ser utilizada como guía para la minimización del caudal turbinado. Como ejemplo de aplicación, considere la demanda de 5.000 MW y la altura bruta de 115 metros. Conforme a las curvas de la Figura 3 el número óptimo de unidades generadoras que minimiza el caudal turbinado es nueve.

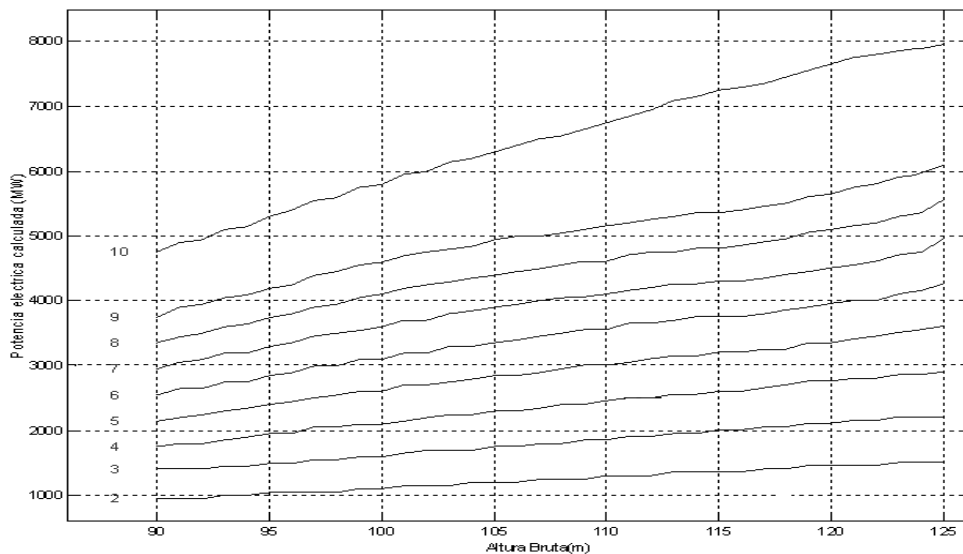


Figura 3: Curvas de número de máquinas con menor caudal turbinado

### 3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema del despacho de unidades generadoras tomando como criterio de desempeño el caudal turbinado y el número de arranques y paradas puede ser representada por la siguiente formulación:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T [c^p q(n_t, h_t, P_t) + c^{AP} |n_t - n_{t-1}|] \quad (2)$$

S.a.

$$\underline{n}_t(P_t) \leq n_t \leq \overline{n}_t(P_t) \quad (3)$$

$$\underline{P}_t(n_t) \leq P_t \leq \overline{P}_t(n_t) \quad (4)$$

$$n \in N \quad (5)$$

Donde:  $T$  es el horizonte de programación;  $P_t$  es la potencia generada;  $n_t$  es el número de máquinas en operación en el intervalo  $t$ ;  $q(\ )$  es la función que representa el caudal turbinado total;  $c^p$  es el valor del volumen del agua turbinado;  $c^{AP}$  es el costo de arranques y paradas de máquinas.

La ecuación (3) representa el número mínimo  $\underline{n}_t(P_t)$  y máximo  $\overline{n}_t(P_t)$  de unidades generadoras que pueden ser despachadas para generar  $P_t$ . La ecuación (4) representa la potencia mínima  $\underline{P}_t(n_t)$  y máximo  $\overline{P}_t(n_t)$  asociado a  $n_t$  unidades generadoras. Finalmente la ecuación (5) define que la variable  $n$  pertenece al conjunto de números naturales.

El problema de despacho de unidades generadoras formulado de esta manera se caracteriza como un problema de programación mixta entero-no lineal y combinatorio, cuya solución puede complicarse en la medida que el número de unidades generadoras disponibles aumenta. En este trabajo se propone como método de solución la aplicación de técnicas de Algoritmo Genético.

### 4 ALGORITMO GENÉTICO

Los Algoritmos Genéticos (AG) son algoritmos de búsqueda basados en la evolución natural de las especies. En este contexto, *población* es un conjunto de individuos o potenciales soluciones al problema de optimización que cambia probabilísticamente en el tiempo, a través de operadores inspirados biológicamente como el *cruzamiento* y *mutación* [3]. El proceso de selección determina cuáles individuos, entre los padres y descendientes, permanecen en la próxima generación. Según las teorías evolutivas, solo los individuos más aptos de la población tienen mayor probabilidad de sobrevivir y generar descendencia, y de esta manera, transmitir su herencia biológica a las nuevas generaciones.

**Representación:** En los AG, cada candidato a solución es representada en una forma análoga a los cromosomas en los sistemas biológicos. En el AG básico, cada variable del problema, o gen, se encuentra codificada en un alfabeto binario o mediante números enteros. Estos genes son asociados para formar una cadena de dígitos que, por lo general, reciben el nombre de cromosomas o *string* de genes. En este trabajo, se optó por la codificación entera o real por las ventajas que presenta esta



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

codificación para el problema y por considerar las características de las unidades generadoras iguales. El cromosoma está compuesto por 24 genes que representan las 24 horas del día, donde a cada gen u hora se tiene un número de máquinas en operación dentro de los límites de número mínimo y máximo de máquinas capaces de satisfacer la demanda.

**Operadores genéticos:** El operador más importante en los AG es el de cruzamiento o *crossover*. Este operador posibilita la creación de nuevos individuos a través de la combinación de dos o más individuos. El tipo de cruzamiento determina la forma como se procederá al cambio de segmentos de información entre los cromosomas seleccionados para el cruce. El tipo de cruzamiento implementado en este trabajo, fue el cruzamiento por un punto, ya que se busca implementar un algoritmo genético simples.

El operador de *mutación* es fundamental para un AG, pues es él el que garantiza la continuidad de la existencia de diversidad genética en la población. Al contrario del operador de cruzamiento, la mutación depende del tipo de codificación escogida. El operador de mutación debe ser elaborado de modo a no producir cromosomas inválidos.

**Función de aptitud o fitness:** El valor *fitness* utilizado para calificar al individuo y encontrar la probabilidad de que cada individuo sea seleccionado para la próxima generación, es obtenido utilizando la propia función objetivo del problema. El Algoritmo Genético desarrollado en este trabajo busca satisfacer tres objetivos, los cuales son resueltos separadamente.

- **Minimización del caudal turbinado:** La función *fitness* que representa el caudal turbinado es la suma de los caudales totales a cada hora, representada por la siguiente ecuación:

$$Fitness = \frac{1}{\sum_{i=1}^{24} q_i} \quad (6)$$

- **Minimización de arranques y paradas:** Esta función busca una configuración de máquinas que tenga la menor cantidad de transiciones en el día. El valor del fitness que representa el total de arranques y paradas en el día es dado por la siguiente ecuación:

$$Fitness = \frac{1}{\sum_{i=1}^{23} |n_{i+1} - n_i|} \quad (7)$$

- **Minimización multiobjetiva:** Esta función posee dos objetivos que son resueltos simultáneamente. En AG, este tipo de función es conocida como una función multiobjetiva, en el cual el valor del fitness puede ser representado como la suma de los dos objetivos, a cada objetivo se aplica un factor que equivale al peso que se da a cada objetivo. El fitness es representado por la siguiente ecuación:

**VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**29, 30 y 31 de Octubre de 2008**

$$Fitness = \frac{1}{C^p \times \sum_{i=1}^{24} \Delta P_i + C^{ap} \times \sum_{i=1}^{23} |n_{i+1} - n_i|} \quad (8)$$

$$\Delta P_i = \rho \times g \times n_g \times \bar{n}_t^{-i} \times h^i \times \Delta q^i \quad (9)$$

$$\Delta q^i = |q_{op}^i - q^i| \quad (10)$$

La ecuación (10) representa la diferencia entre la solución corriente y la solución que minimiza el caudal turbinado.

## 5 RESULTADOS

La metodología propuesta fue aplicada a la central hidroeléctrica de Itaipu. Para el efecto fueron considerados el programa de generación de un día domingo y la disponibilidad de 10 unidades generadoras.

### 5.1 Caso 1- Minimización del Caudal Turbinado

Fueron utilizados dos metodologías para la definición del despacho de las unidades generadoras. Una que utiliza la Figura 3 y otra a través de AG. Los resultados se pueden verificar en la Tabla I. Los valores obtenidos en la columna Conf. Op. se refieren a los resultados obtenidos a través de la Figura 3 y los datos de la columna Conf. AG se refieren a los resultados obtenidos a través de AG. Comparando los resultados se puede notar una única diferencia entre las dos metodologías y con esto se puede verificar la factibilidad de la técnica aplicada.

**Tabla I: Configuración Óptima y Configuración AG**

H	Conf. OP.	Conf. AG	H	Conf. OP.	Conf. AG	H	Conf.OP.	Conf. AG
1	8	8	9	8	8	17	9	9
2	7	7	10	9	9	18	9	9
3	6	6	11	9	9	19	9	9
4	6	6	12	9	9	20	10	10
5	6	6	13	9	9	21	10	10
6	6	6	14	8	8	22	10	9
7	6	6	15	8	8	23	9	9
8	7	7	16	9	9	24	10	10

### 5.2 Caso 2- Minimización de Arranques y Paradas

En la Figura 4, se muestra la configuración obtenida por el AG, el cual resultó en dos arranques y una configuración óptima, que puede ser obtenida, inclusive por inspección visual, resultó en un arranque de máquina.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

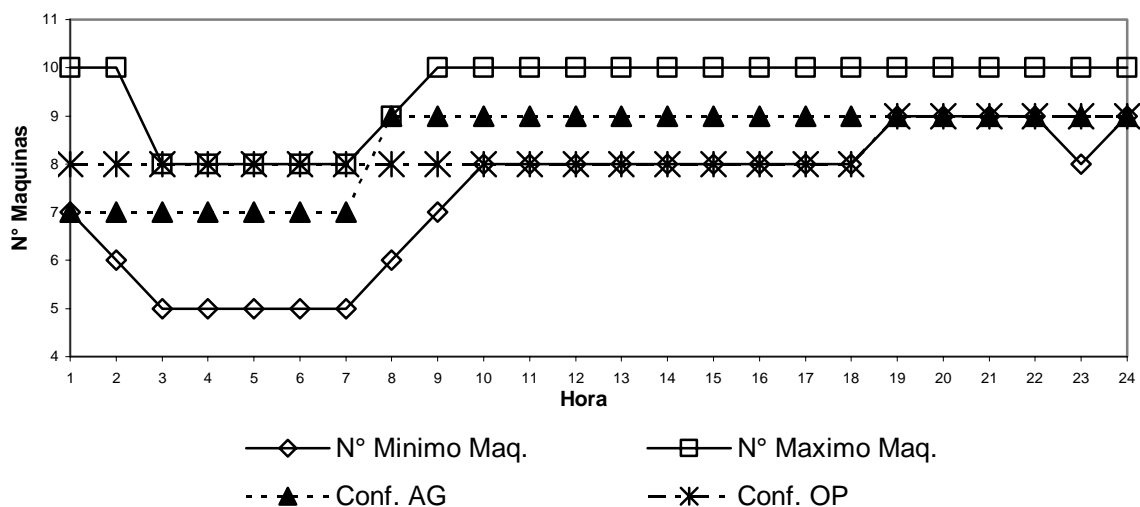


Figura 4: Despacho de minimización de arranques y paradas

### 5.3 Caso 3- Minimización Multiobjetiva

En este estudio, serán considerados los costos de arranques y paradas y el valor de volumen de agua turbinado, buscando de esta manera obtener una solución de compromiso entre los dos objetivos. El valor atribuido al costo de arranques y paradas es una extrapolación a los costos asociados a los arranques y paradas encontrados en [2]. El valor atribuido al volumen de agua turbinado es equivalente a la energía posible de ser generada por el mismo. En la Tabla II, se sintetizan los resultados del despacho para diferentes valores de costos en términos de caudal turbinado, número de arranques-paradas y variación medio de caudal turbinado, que representa el volumen medio de agua ahorrado.

Tabla II: Resumen del despacho para los tres objetivos

Costo Arranque/Paradas [US\$]	Costo de energía [US\$/MWh]	N° de Arranques y paradas	Caudal turbinado [m <sup>3</sup> /seg]	Variación medio de caudal turbinado [m <sup>3</sup> /seg]
0	30	10	109.973	0
2100	0	1	111.054	45,041
2100	30	4	110.055	3,416

En la Tabla II puede ser constatado que la minimización multiobjetiva resulta en valores intermedios en términos de caudal turbinado y número de arranques o paradas de máquinas.

## 6 CONCLUSIÓN

Este trabajo presenta un modelo para el Despacho de Unidades Generadoras Hidroeléctricas que utiliza como criterio de desempeño la minimización de arranques y paradas y el caudal turbinado. Como metodología de solución aplica Algoritmos Genéticos.

Los estudios de casos, utilizando datos de programa de generación de un día domingo apuntan que:





VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

---

- La optimización del despacho que minimiza el caudal turbinado acompaña la variación de la carga y resulta en frecuentes arranques y paradas.
- La optimización del despacho que minimiza el número de arranques y paradas resulta en un alto valor de caudal turbinado al final del día.
- Para determinar el despacho óptimo, desde el punto de vista económico, es fundamental determinar principalmente cuánto cuesta un arranque o parada.

Finalmente se puede concluir que, debido a sus características de robustez y simplicidad, los algoritmos genéticos constituyen una excelente alternativa para enfrentar problemas complejos de optimización combinatoria como el problema de despacho de unidades generadoras hidroeléctricas.

## 7 REFERENCIAS

- [1] Arce, A.; Ohishi, T.; Soares, S., Optimal Dispatch of Generating Units of the Itaipu Hydroelectric Plant, "IEEE Transactions on Power Systems Vol. 17", (February 2002, páginas 154-157).
- [2] Nilsson, O.; Sjelvgren, D., Hydro unit start-up costs and their impact on the short term scheduling strategies of swedish power producers, "IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12", (no. 2, July 1997, páginas 38-43).
- [3] Linden, Ricardo, *Algoritmos Genéticos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2006