



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 programación lineal en el planeamiento de la operación de usinas hidroeléctricas

Anastasio Sebastián Arce Encina¹, Liz Alvarez Ferreira², Luis Barrientos Mujica²

¹Departamento de Investigación – Universidad Nacional del Este

²Facultad Politécnica – Universidad Nacional del Este (UNE)

Paraguay

RESUMEN

Este trabajo presenta la aplicación de programación lineal en la optimización de la operación de usinas hidroeléctricas localizadas en un mismo río. La formulación matemática contempla una función de producción hidroeléctrica lineal y restricciones asociadas a la capacidad máxima y mínima de acumulación del embalse, de la descarga, los límites asociados a la producción, como también el balance hídrico. Estudios de casos contemplan la operación aislada y coordinada de las usinas hidroeléctricas de Yguazú y Acaray, del sistema eléctrico paraguayo, apuntando beneficios de una mayor producción en los casos de la operación conjunta.

PALABRAS CLAVES

Energía hidroeléctrica, optimización, programación lineal.

Anastasio Sebastián Arce Encina – sebastian_arce@fpune.edu.py



1. INTRODUCCIÓN

El planeamiento de la operación busca obtener una secuencia de decisiones que asegure el atendimento de la demanda, atendiendo criterios de calidad y economía. En un sistema de generación hidrotérmico el objetivo es minimizar el costo a través de la substitución de la generación termoeléctrica por la generación hidroeléctrica. Este problema puede ser formulado como el problema de optimizar la generación hidroeléctrica, dado que la demanda será atendida por la suma de la generación termoeléctrica y la hidroeléctrica. Por tanto la maximización de la generación hidroeléctrica llevará a la minimización de la generación termoeléctrica y consecuentemente la minimización del costo.

El horizonte del planeamiento de la operación depende fundamentalmente de las características hidrológicas y de la capacidad de regulación de los embalses de las usinas que componen el sistema de generación. El planeamiento de la operación por lo menos debe cubrir el periodo de un año, tiempo que dura el ciclo natural del agua.

Debido a la imposibilidad de considerar todos los aspectos relacionados al planeamiento de la operación a través de un único modelo, este problema normalmente es desagregado en etapas, planeamiento de la operación de largo, medio y corto plazo. En el planeamiento de la operación de largo plazo los reservorios juegan un papel importante en la transferencia del agua del periodo húmedo para el periodo seco. En esta etapa normalmente son omitidos detalles relacionados al modelado de las unidades generadoras. En grandes sistemas de generación hidroeléctrica, es común representarlo a través de un modelo agregado. Otros representan los aprovechamientos hidroeléctricos individualmente a través de modelos lineales o no-lineales.

En el planeamiento de la operación de corto plazo se busca determinar un programa de producción que sea compatible con las metas definidas por el planeamiento de medio plazo y la red eléctrica.

El acoplamiento espacial y temporal entre las usinas hidroeléctricas situadas en un mismo río hace que las condiciones de operación de cada usina sean dependientes, de modo que sus operaciones deben ser coordinadas.

La formulación matemática del planeamiento, que considere las variables asociadas a la operación, las restricciones asociadas a cada una de estas variables, la incertidumbre de la disponibilidad del recurso hídrico y el comportamiento de la demanda, resultan en un problema de gran porte, cuya solución puede ser complicada conforme al tamaño del sistema[1, 2, 3, 5].

En este trabajo se presenta la producción hidroeléctrica como una función lineal dependiente del volumen y del caudal turbinado y el método de solución basado en técnica de

programación lineal (PL) [4, 7].

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La mayor dificultad en el planeamiento de la operación de sistemas hidroeléctricos es el acoplamiento operativo hidráulico entre las usinas pertenecientes a una misma cuenca hidrográfica. Al contrario del parque termoeléctrico, donde la disponibilidad del combustible está asegurada y la operación de todas las usinas es independiente entre sí. Sin embargo, las hidroeléctricas de una misma cuenca hidrográfica constituyen un sistema hidráulico interconectado. Además, las afluencias futuras al sistema, dependientes de las condiciones climáticas, son desconocidas, dando al problema un carácter estocástico.

La operación hidráulica de usinas hidroeléctricas localizadas en un mismo río puede ser representada como un problema de flujo en redes, conforme se puede apreciar en la figura 1. Los nudos de la red conectados por arcos, representan a la usina en diferentes instantes en el tiempo.

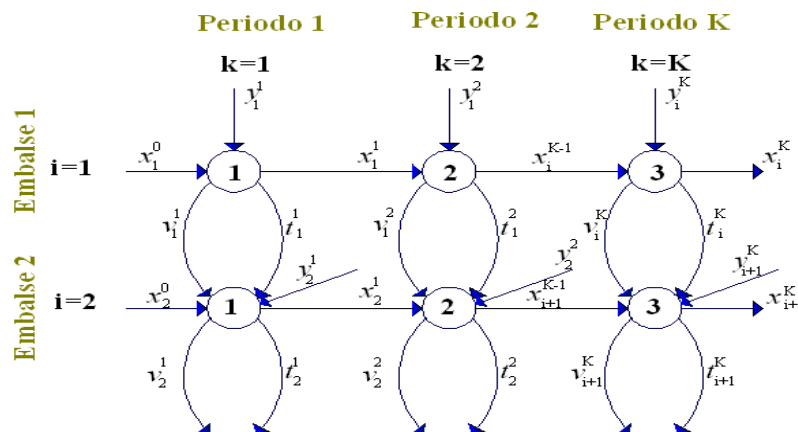


Figura 1. Red lineal de flujos para una cuenca hidráulica con dos embalses y K periodos del horizonte temporal

Los arcos que llegan verticalmente a cada nudo representan los caudales afluentes al embalse, los arcos que salen de cada nudo representan los caudales turbinados y vertidos en cada intervalo de tiempo.

Horizontalmente, los arcos que llegan representan el estado o volumen del embalse en el inicio del periodo. Los arcos que salen representan el estado o volumen del embalse al final del periodo.

Se puede identificar los arcos verticales como las variables de decisión. Se incluye dentro de este conjunto de variables a los caudales descargados por el vertedero para permitir el cumplimiento de las restricciones asociadas a la capacidad de acumulación u operación del embalse.

La función de producción hidroeléctrica, en el planeamiento de la operación de largo plazo,



puede ser representada como una función dependiente del volumen del embalse y del caudal turbinado, conforme a la ecuación (1).

$$P = \alpha \times X + \beta \times t \quad (1)$$

donde,

X es el volumen de agua acumulado en el embalse.

t es caudal turbinado.

Las constantes α y β son definidas por las características técnicas de las unidades generadoras.

La operación hidráulica debe atender continuamente la ecuación de balance hídrico, conforme a la ecuación (2). Esta ecuación define el volumen en un embalse i al final de un periodo k como el volumen almacenado al final del periodo anterior, más el volumen de agua turbinado o vertido por los embalses situados inmediatamente aguas arriba, más las afluencias incrementales, menos el volumen turbinado o vertido por el propio embalse, conforme se presenta en la ecuación (2).

$$X_i^k = X_i^{k-1} + t_{i-1}^k + v_{i-1}^k - t_i^k - v_i^k + y_i^k \quad (2)$$

Una decisión de descarga en un intervalo dado afecta el volumen almacenado que interfiere en las decisiones de los intervalos futuros, y por tanto, la producción de energía total del periodo considerado.

3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La formulación matemática del planeamiento de la operación debe representar el objetivo de maximizar la generación hidroeléctrica observando al mismo tiempo las restricciones asociadas a los límites operacionales de los embalses, las restricciones asociadas a la capacidad de producción y el balance hídrico, a lo largo del periodo de estudio.

En este caso la formulación matemática es dada por:

$$\text{Max } E_g = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^2 (a_i \cdot X_i^k + b_i \cdot t_i^k) \quad (3)$$

Sujeto a:

$$X_i^k \leq X_i^k \leq \bar{X}_i^k \quad (4)$$



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

$$t_i^k \leq t_i^k \leq t_i^{-k} \quad (5)$$

$$0 \leq v_i^k \leq v_i^{-k} \quad (6)$$

$$y_1^k = -X_1^{k-1} + X_1^k + t_1^k + v_1^k \quad (7)$$

$$y_2^k = -X_2^{k-1} + X_2^k - t_1^k + t_2^k - v_1^k + v_2^k \quad (8)$$

$$k=1, \dots, K$$

Donde:

E_g : Energía total generada en MWmed;

i : índice de embalses;

k : índice que denota periodo;

a_i, b_i : Coeficientes de producción de la usina i ;

x_i^k : Volumen de agua en el embalse, en Hm^3 , de la usina i en el periodo k ;

t_i^k : Caudal turbinado en Hm^3/mes de la usina i en el periodo k ;

v_i^k : Caudal vertido en Hm^3/mes de la usina i en el periodo k ;

y_i^k : Caudal afluente al embalse i en Hm^3/mes en el periodo k .

La solución del problema fue obtenida a través del Matlab [6].

4. ESTUDIO DE CASOS

Para evaluar el modelo serán considerados las usinas hidroeléctricas de Yguazú y Acaray, del sistema eléctrico paraguayo. Las funciones de producción consideradas son similares a la mostrada en la ecuación (1). Serán estudiados el caso de la operación aislada y el caso de la operación coordinada. En el caso de la operación aislada se busca obtener el máximo beneficio de la operación de cada usina sin considerar la operación de la otra. En el caso de la operación coordinada se busca maximizar la producción de las dos usinas en forma conjunta.



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

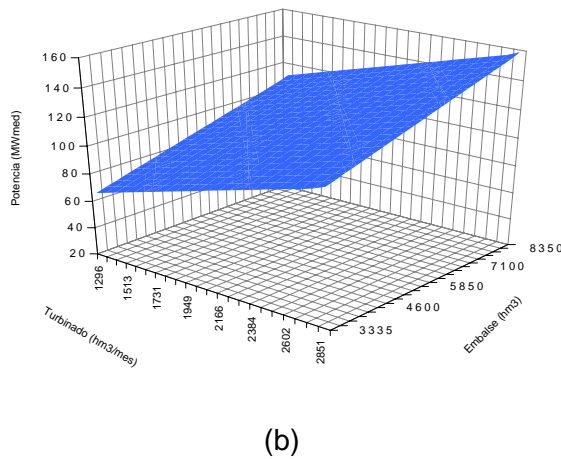
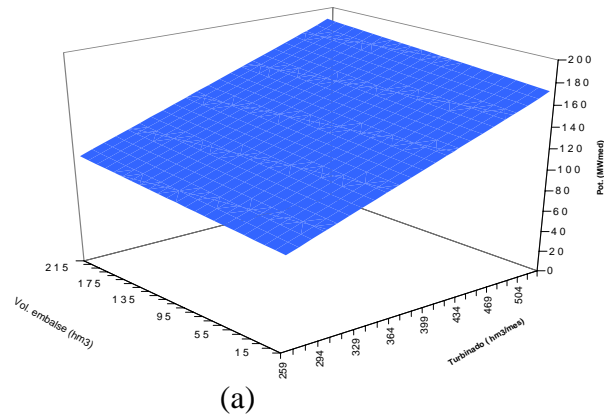
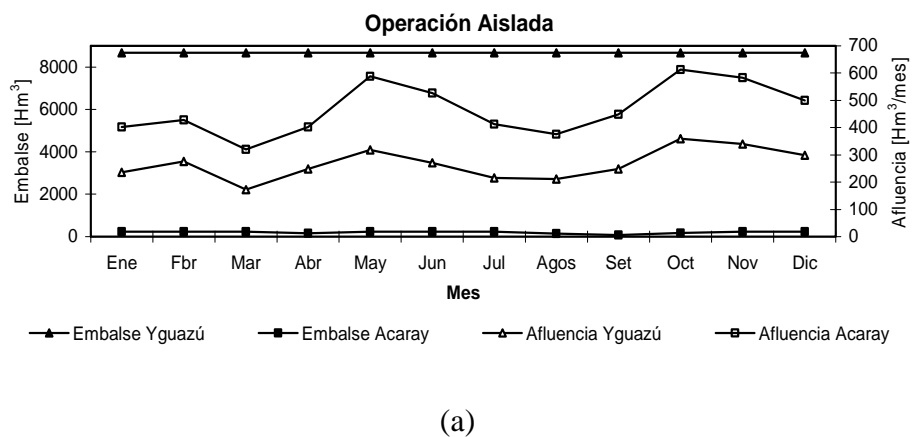
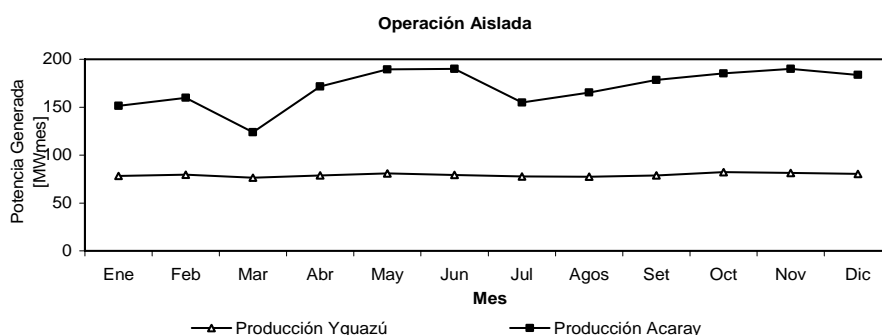


Figura 3 – (a) Función de producción de Yguazu. (b) Función de producción de Acaray.



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

(b)

Figura 4. (a) Comportamiento del embalse y afluencia de las usinas Yguazú y Acaray. (b) Producción en MWmed de las usinas Yguazú y Acaray.

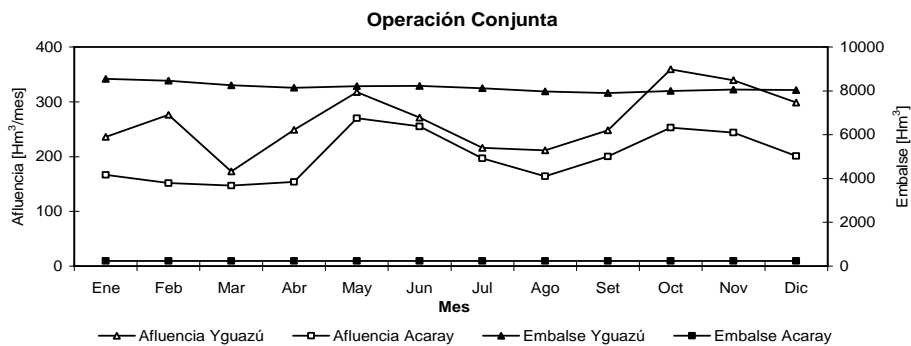
Para realizar los estudios fueron necesarios modelar las funciones de producción de las dos usinas basado en los datos disponibles referentes a la Curva Colina de las unidades generadoras de la usina de Acaray. En el caso de la usina de Yguazú, fueron utilizados los datos nominales de proyecto como altura de salto nominal, capacidad de turbinado nominal, tipo de turbina, para primeramente estimar la Curva Colina de las unidades generadoras y luego ajustar la función de producción de esta usina. Las figuras 3 (a) y 3 (b) muestran la función de producción de las usinas del Yguazú y Acaray, respectivamente.

En la figura 4 (a) se puede observar los caudales afluentes y el comportamiento de los embalses en la política de operación aislada. El nivel de los embalses tiene un comportamiento continuo a lo largo del periodo de planeamiento. La producción sin embargo, conforme muestra la figura 4 (b) muestra un comportamiento un poco diferente a los caudales afluentes a los embalses, principalmente en la usina Acaray, que en el mes de octubre ante un aumento significativo de la afluencia apunta también a un aumento de la producción. Las dos usinas operan prácticamente como centrales de pasadas, transformando en energía todo el caudal afluente sin comprometer el volumen de agua almacenado en el embalse. La tabla 1 muestra el total de producción de cada una de las hidroeléctricas, como también el total de todo el sistema.

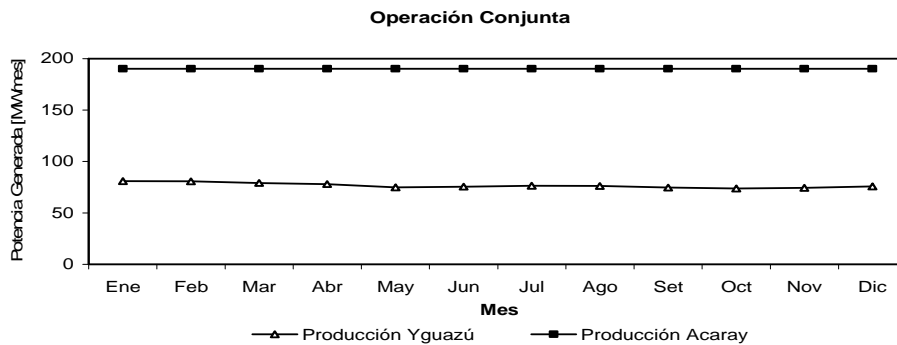
La figura 5 (a), similarmente a la figura 4(a), muestra el comportamiento del embalse y la afluencia en las usinas Yguazú y Acaray. En la figura 5 (b) muestra el comportamiento de la producción en el caso de la operación conjunta. Se puede notar que el comportamiento de los embalses y la producción son similares en los dos casos. Sin embargo, por la tabla 2 se puede constatar que en el caso de la operación coordinada hay un aumento de 11,55 %, de la usina Acaray.

Tabla I: Energía total generada en MWmed por las usinas Yguazú y Acaray, operando de manera aislada.

Operación Aislada	
Usina	Producción Promedio Anual (MWmed)
Yguazú	79,2275
Acaray	170,3700
Sumatoria	249,5975



(a)



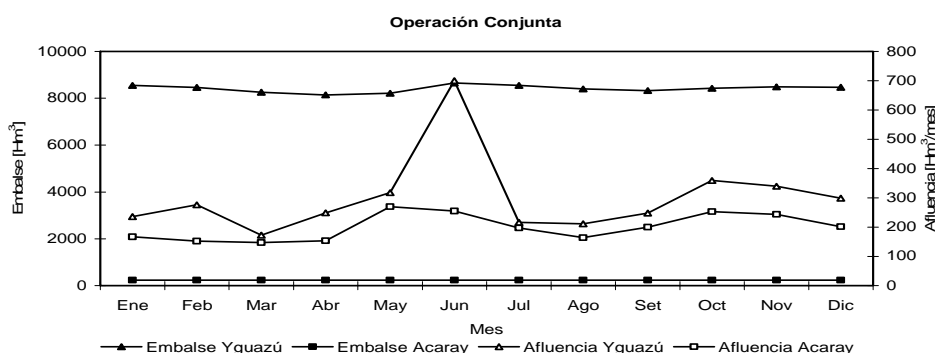
(b)

Figura 5. (a) Comportamiento del embalse y afluencia de las usinas Yguazú y Acaray. (b) Producción en MWmed de las usinas Yguazú y Acaray.

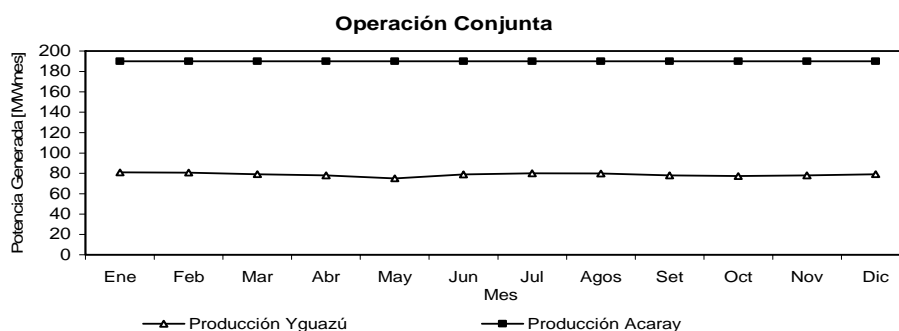
Tabla II: Energía total generada en MWmed por las usinas Yguazú y Acaray, operando coordinadamente

Operación Conjunta	
Usina	Producción Promedio Anual (MWmed)
Yguazú	76,6922
Acaray	190,0474
Sumatoria	266,7396

En los casos mostrados se pueden verificar que los embalses no tuvieron variaciones a lo largo del periodo de planeamiento, debido a que los caudales afluentes no fueron significativos como para exigir una variación que busque regular los caudales. Para evaluar la regulación de los embalses, en el caso de la operación coordinada, se considera un aumento del caudal afluente en la usina Yguazú. Los resultados se pueden apreciar en la figura 6.



(a)



(b)

Figura 6. (a) Comportamiento del embalse y la afluencia de las usinas Yguazú y Acaray. (b) Producción en MWmed de las usinas Yguazú y Acaray

Anastasio Sebastián Arce Encina – sebastian_arce@fpune.edu.py



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

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

Se puede notar una disminución del volumen del embalse de la usina Yguazú en el mes que precede al aumento del caudal afluente. La disminución del embalse ocurre a través del aumento de la producción. Este comportamiento se explica por la necesidad de crear un volumen suficiente en el embalse de la usina Yguazú que permita encajar el aumento del caudal afluente.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado una aplicación de técnica de programación lineal para tratar el problema de planeamiento de la operación de largo y medio plazo de usinas hidroeléctricas. Como ejemplo de la aplicación fueron consideradas las usinas hidroeléctricas de Yguazú y Acaray. Fueron analizados los casos de operación aislada y coordinada, apuntando una mayor producción en el caso de la operación coordinada.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pereira, M., V., F.; “*Optimal Scheduling of Hydrthermal System*” – An Overview – IFAC – Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, rio de Janeiro, pp. 1-9, 1985.
- [2] Soares, S.: “*Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos*”, SBA – Controle e Automação, vol. 1, N^a 2, pp.122-131- 1987.
- [3] Fortunato, L. M. A, Neto, T. A. A., Albuquerque, J. C. R. e Ferreira, C.; “*Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica*”, Niterói: Universidade Federal Fluminense, EDFD, 1990.
- [4] Luemberger, D., G.; “*Linear and Non Linear Programming*” – Addison – Wesley Publishing Co., 1984.
- [5] Arce, A., Ohishi, T., Soares, S.; “*Optimal Dispatch of Generating Units of the Itaipu Hydroelectric Plant*”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, pp. 154-157, February 2002.
- [6] Matlab 6.5; User’s Manual, 2003.
- [7] Taha, Hamdy A.; “*Investigación de Operaciones*”, 5^a edición, Ediciones Alfaomega, México, 1992.