



CÁLCULO DE LA ENERGÍA FIRME DE LAS USINAS DE YGUAZÚ Y ACARAY

J. Alcibiades López N.

Nestor F. Bernal G.

alci.lopez@gmail.com

nez.bernal@gmail.com

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Asunción

Anastacio Sebastián Arce Encina

arce@itaipu.gov.py

Itaipu Binacional

RESUMEN

Energía Firme es la máxima energía que puede suministrar una central hidroeléctrica suponiendo la ocurrencia de la Serie Histórica de caudales. Este trabajo presenta la metodología y los resultados del cálculo de la Energía Firme de las Usinas Hidroeléctricas de Acaray e Yguazú. Para el efecto fueron consideradas la serie histórica de caudales afluentes de los ríos Yguazú y Acaray, las características técnicas de las máquinas de Acaray, las características técnicas de las futuras máquinas del Yguazú obtenidas de los datos de proyecto, los límites operacionales y una regla para simular su operación.

PALABRAS CLAVES

Central de Acaray, Central de Yguazú, Calculo de Energía Firme, Simulación de Operación.

1. INTRODUCCION

En las centrales hidroeléctricas el combustible utilizado para generar energía es el agua que fluye por el río. Como este recurso presenta una disponibilidad natural irregular, embalses son construidos para regularizar los caudales para así garantizar la generación de energía eléctrica de forma más uniforme.

La energía firme de una central hidroeléctrica corresponde a la máxima producción continua que puede ser obtenida suponiendo la ocurrencia del registro histórico de caudales. Ella es la energía que la central hidroeléctrica produce en el periodo crítico que se inicia cuando el embalse está totalmente lleno y termina cuando alcanza su nivel mínimo operativo, sin que en este periodo haya habido otro llenado. Este concepto esta ilustrado en la Figura 1.1.

La Energía Firme, por su definición, asegura el atendimento de la demanda aun en las peores condiciones hidrológicas verificada en todo el registro histórico de caudales afluentes. Se puede decir que este es un criterio determinístico, porque asegura el atendimento de la demanda en un 100%, bajo la premisa que no existe otra serie histórica a simular peor que la serie histórica. La posibilidad de un ocasional déficit o el atendimento con una probabilidad inferior al 100%, se denomina criterio probabilístico [1].

Normalmente el valor de la Energía Firme es expresado en MW medio. Por ejemplo la usina hidroeléctrica de Emborcação posee una energía firme de 485 MW medio, es decir, esta central puede generar ininterrumpidamente, en promedio una potencia de 485 MW, hasta en las condiciones más severas de caudal afluente ya verificadas en el histórico.

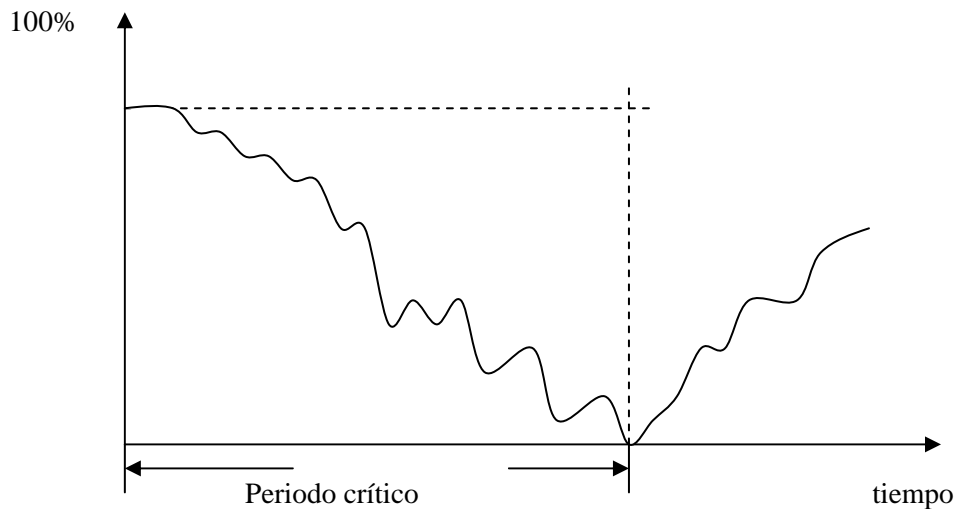


Figura 1.1– Representación gráfica de la Energía Firme.

Fuente: Referencia [2]

2. MODELADO MATEMÁTICO DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Una central hidroeléctrica se compone, básicamente, de las siguientes partes: presa, sistemas de captación y aducción de agua, casa de fuerza y sistema de restitución del agua al lecho natural del río.

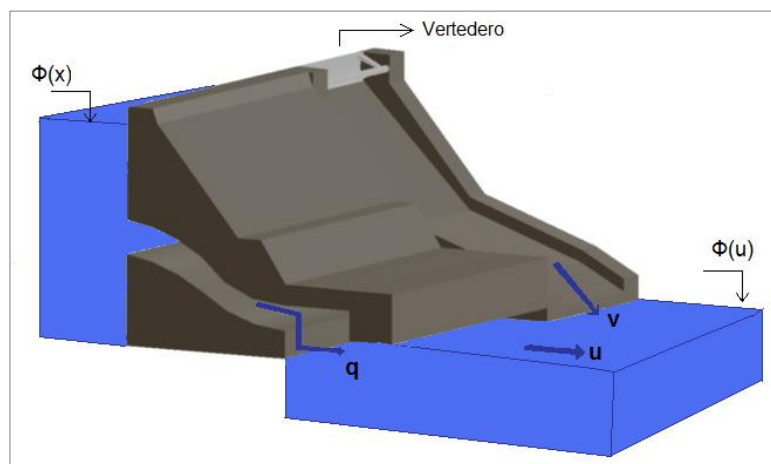


Figura 2.1 – Principales componentes de una usina hidroeléctrica.

La figura 2.1 muestra los principales componentes de una central hidroeléctrica. Se puede verificar una presa que permite la formación del embalse, el sistema de conducto forzado que conduce el agua hasta las unidades generadoras, el vertedero, cuya función principal es permitir la evacuación del volumen de agua del embalse sin pasar por las unidades generadoras. Las variables envueltas en la descripción del modelo de una central hidroeléctrica y sus respectivas unidades son: [3]

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ
29, 30 Y 31 De Octubre de 2008

x:	Volumen del embalse [hm^3].
Xmax:	Volumen máximo operativo del embalse [hm^3].
Xmin:	Volumen mínimo operativo del embalse [hm^3].
Xútil:	Volumen útil del embalse [hm^3].
u:	Total de caudal descargado por la central [m^3/s].
q:	Caudal turbinado [m^3/s].
v:	Caudal descargado por el vertedero [m^3/s].
$\phi(x)$:	Cota del nivel de agua del embalse [m].
$\phi(u)$:	Cota del nivel de agua del canal de fuga [m].
hb:	Altura del salto bruto [m].

2.1 - Embalse

Las centrales hidroeléctricas con embalses de regulación acumulan agua en los periodos húmedos para utilizar en periodos secos. Las centrales con embalses de poca capacidad, realizan la regulación semanalmente, acumulando aguas en los fines de semanas y feriados para utilizarlo en días útiles, o regulación diaria acumulando agua en los periodos de baja carga para utilizarlos en periodos de plena carga. Las centrales con embalses con pequeña capacidad de regulación son denominadas centrales a pelo de agua o centrales de paso.

El nivel de embalse es determinado por una función no lineal del volumen de agua almacenado en el mismo. Las unidades normalmente adoptadas son el metro sobre el nivel del mar (m.s.n.m) y el hectómetro cúbico, para el nivel del embalse y volumen, respectivamente. Esta representación normalmente es a través de un polinomio de cuarta orden. [3]

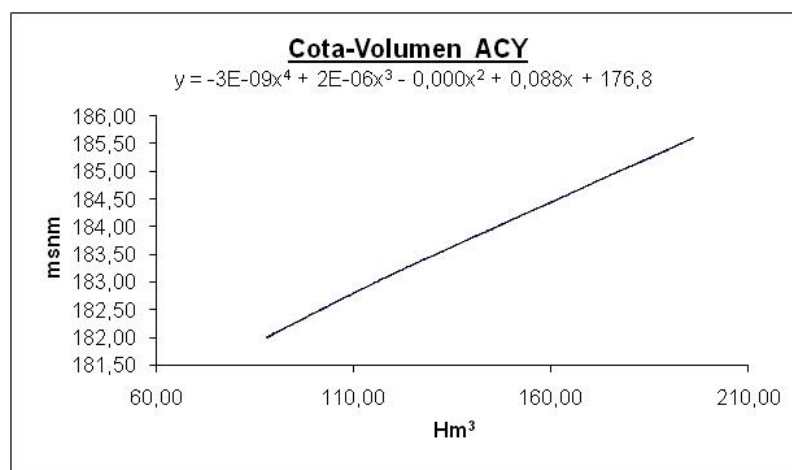


Figura 2.2 – Polinomio cota-volumen del embalse de la usina de Acaray.

Los límites operacionales del embalse son definidos por factores de seguridad de la presa, para el límite máximo operativo. El límite mínimo operativo normalmente es definido por

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ
29, 30 Y 31 De Octubre de 2008

restricciones hidráulicas, por ejemplo para evitar la formación de vórtices en la tomada de agua o evitar el fenómeno de cavitación en las paletas de las turbinas.

2.2 – Canal de Fuga

El nivel de aguas abajo de una central es dado en función del caudal descargado a través del vertedero y/o de las unidades generadoras. En algunas centrales, el vertimiento no tiene influencia en el nivel de aguas abajo de la central. Esto ocurre cuando la estructura del vertedero es localizada a gran distancia de la casa de máquinas. Similarmente al embalse, el comportamiento del nivel de canal de fuga es representado a través de un polinomio de tercera o cuarta orden. [3]

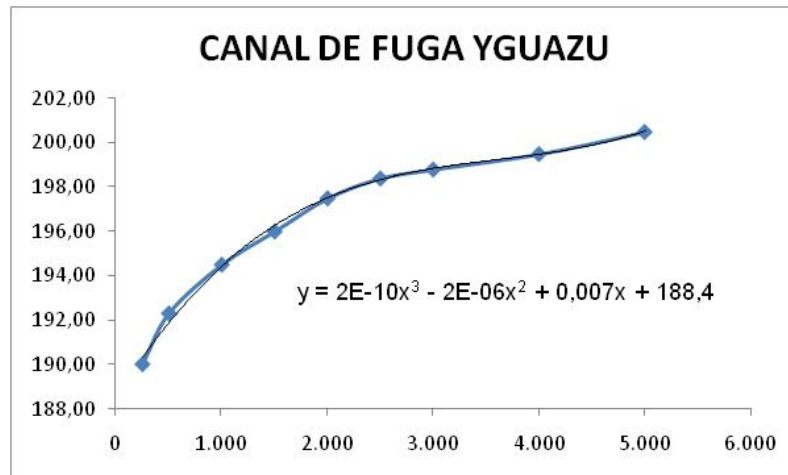


Figura 2.3 – Polinomio cota-caudal del canal de fuga de la presa Yguazú.

La figura 2.3 muestra el polinomio cota-caudal del canal de fuga de la presa Yguazú. En el caso de la usina de Acaray el nivel del canal de fuga es obtenido en función del nivel del Río Paraná en el punto de confluencia del Río Acaray con el Río Paraná.

2.3 – La altura de salto bruto

La altura de salto bruto es definida como la diferencia entre el nivel del embalse y el nivel del canal de fuga. Debido a la fricción del agua al fluir por el sistema de succión, desde el embalse hasta el canal de fuga, ocurre una pérdida de presión hidráulica que normalmente es representada como una pérdida de altura de salto. La diferencia de la altura del salto bruto y las pérdidas hidráulica es definida como altura del salto líquido. Estos conceptos son representados por la ecuación (1).

$$h_l = \phi(x) - \phi(u) - h_p \quad (1)$$

donde:

- $\phi(x)$ es el nivel del embalse.
- $\phi(u)$ es el nivel del canal de fuga.
- h_p es la altura de pérdida hidráulica.

2.4 – Función de producción hidroeléctrica

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ
29, 30 Y 31 De Octubre de 2008

La potencia generada por una unidad generadora hidráulica puede ser representada por la siguiente ecuación: [3]

$$p = g \cdot \rho \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot h_l \cdot q \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

donde

- p potencia generada (MW).
- g aceleración de la gravedad (m/s^2).
- ρ peso específico del agua (kg/m^3).
- η_t rendimiento de la turbina (%).
- η_g rendimiento del generador (%).
- h_l altura del salto líquido (m).
- q caudal turbinado (m^3/s).

El rendimiento en cualquier dispositivo de transmisión es medido por la relación de la potencia de salida y potencia de entrada. En el caso del rendimiento del generador, el mismo representa las pérdidas verificadas en los devanados, sistema de ventilación, en los cojinetes, etc. Es frecuente encontrar en los generadores modernos en el orden de 90 a 97 %.

Del mismo modo, el rendimiento de la turbina representa las pérdidas en la turbina debido a que la transformación de la energía potencial del agua en energía mecánica no es directa.

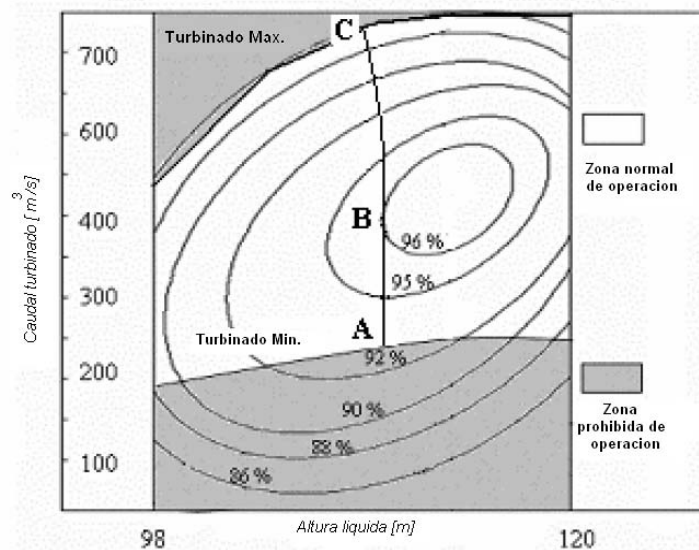


Figura 2.4 – Curva Colina.

El rendimiento de la turbina es representado por la Curva Colina, conforme se puede observar en la figura 2.4. En la misma se puede observar las curvas de niveles dados en función a la altura del salto neto y el caudal turbinado. Considere un punto de operación, definido por el par de valores de altura de salto neto y caudal turbinado, por ejemplo el punto A. Sí a partir de este punto se aumenta el caudal turbinado, los valores de rendimiento de la turbina aumentarán, pasando por un valor máximo, punto B, para luego comenzar nuevamente disminuir hasta alcanzar la capacidad de turbinado máximo, punto C, cuando el rendimiento de la turbina, nuevamente alcanza valores muy bajos.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ
29, 30 Y 31 De Octubre de 2008

En la Curva Colina se pueden observar también las zonas permitidas de operación. La evaluación de la capacidad de producción de una unidad hidroeléctrica es obtenida a través del levantamiento de valores de caudal turbinado y rendimiento en los diferentes puntos sobre la curva de turbinado máximo. Esta evaluación permite también obtener el factor de productividad en función a la altura del salto bruto. El factor de productividad mide la relación de potencia y caudal turbinado, normalmente representado a través de polinomios de segunda orden, conforme a la ecuación (3).

$$FP(h_b) = a \times h_b^2 + b \times h_b + c \quad (3)$$

donde:

FP es el factor de productividad (MW/m³/s).

h_b es la altura de salto bruto (m).

3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA ENERGÍA FIRME

El cálculo de la Energía Firme es un procedimiento iterativo en el cual se adopta una Regla de Operación para la central y valores de mercado que la misma debe atender.

La Regla de Operación de la central puede ser:

- Central de Paso: En este caso, se considera que la central no posee ninguna capacidad de regulación, es decir, todo el caudal afluente debe ser descargado a través de las turbinas o del vertedero.
- Central de Acumulación: En este caso se considera el volumen comprendido entre el nivel mínimo y máximo del embalse, pudiendo ser utilizado para la regulación de los caudales. Se puede constatar que en el caso de la usina de pasada, la energía firme será definida por el menor valor del caudal afluente. En el caso de la usina con capacidad de regulación se podrá asegurar un valor de generación superior al caudal mínimo, gracias al efecto de la regulación. Los procedimientos adoptados para el cálculo de la energía firme son:
 - **Paso 1:** Estimar un valor de Mercado o Valor de Energía a ser producida por la usina.
 - **Paso 2:** Utilizando la Serie de Caudales Naturales y una Regla de Operación simular la operación, buscando atender el mercado.
 - **Paso 3:** Verificar si el Mercado o Valor de Energía fue atendida en todas las simulaciones.
 - **Paso 4:** Si hubo registro de producción inferior al valor de Mercado estimado en el Paso 1 y registro de nivel mínimo del embalse, disminuir este valor y volver al Paso 2. Caso contrario si todos los valores de producción simulada fueron mayores que el Mercado y el nivel del embalse no registró su valor mínimo, aumentar el valor de Mercado y volver al Paso 2.El proceso termina cuando todos los valores de producción fueren iguales al valor de Mercado y el nivel del embalse ha alcanzado su nivel mínimo. La figura 3.1 muestra un diagrama esquemático del cálculo de la Energía Firme. Durante la simulación, un procedimiento importante es el cálculo del caudal turbinado necesario para atender el valor del mercado. El cálculo se basa en un procedimiento iterativo donde primeramente se estima como caudal necesario un valor igual al valor del mercado para posteriormente ir corrigiendo hasta alcanzar una determinada tolerancia, definida como la diferencia entre la energía producida con un valor de caudal turbinado y el valor del mercado.

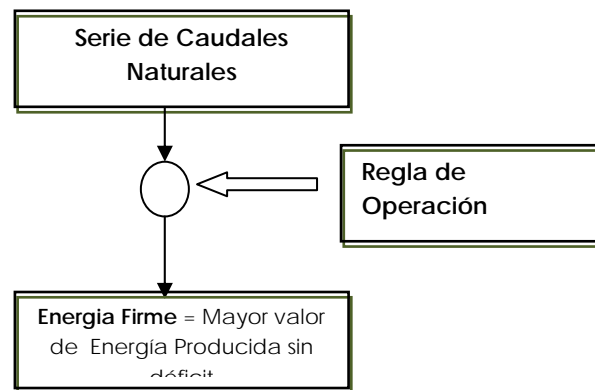


Figura 3.1– Diagrama esquemático de la simulación para el cálculo de la Energía Firme.

A seguir son detallados los pasos para el cálculo de la Energía Firme:

Paso 1: Lectura de datos entrada

- Tolerancia de convergencia de cálculo del caudal turbinado (ε).
- Paso de ajuste del cálculo de caudal turbinado (α).
- Volumen máximo (x_{\max}) y mínimo (x_{\min}) del embalse en Hm^3 .
- Volumen inicial del embalse (V_{\min}) en Hm^3 .
- Valor de la Energía Firme (ef) en MWmed.
- Factor de conversión de Hm^3 a m^3/s (Δ).
- Serie histórica de caudales afluentes.
- Polinomios Cota-Volumen y Cota-Caudal del canal de fuga de la central
- Factor de productividad

Paso 2: Para t variando de 1 hasta cubrir todo el histórico de caudales repetir los siguientes pasos:

- Considerar: $u_t = ef$, donde u_t es la descarga total de la usina en el mes t .
- Calcular:

$$x_{t+1} = x_t + y_t - u_t$$

$u_t = q_t + v_t$, donde q_t y v_t son el caudal turbinado y vertido en el mes t , respectivamente.

Paso 3: Verificar el cumplimiento de las restricciones asociadas a los límites operativos del embalse.

- a) Si $x_{t+1} > x_{\max}$, entonces se descarga un volumen de agua por el vertedero.
 - el caudal vertido es: $v = [(x_{t+1} - x_{\max}) / \Delta]$ [m^3/s].
 - el volumen en ese periodo queda en el máximo ($x_{t+1} = x_{\max}$)
- b) Si $x_{t+1} < x_{\min}$, entonces
 - se disminuye el caudal turbinado en $q_{t+1} = q_{t+1} - [(x_{\min} - x_{t+1}) / \Delta]$.
 - el volumen en ese periodo queda en el mínimo ($x_{t+1} = x_{\min}$).

Paso 4: Calcular:

- $\theta_t = f(u_t)$; cota del canal de fuga.
- $\phi(x_t)$; cota del embalse en función del volumen en Hm^3 .
- $H_b = \phi(x_t) - \theta_t$; altura de salto bruto.
- $F_{p_t}(H_b)$; factor de productividad.
- $P_t = q_t \times F_{p_t}$; potencia generada por la central.

Paso 5: Verificar la convergencia.

$$|P_t - ef| \leq \varepsilon$$

a) Si no se cumple se ajusta el valor del caudal turbinado conforme a la siguiente ecuación:

$$q_{t+1} = q_t + \alpha \cdot (ef - P_t)$$

y volver al Paso 4.

b) Si se cumple entonces se tienen los valores de potencia y caudal correctos:

$$P_g = P_t$$

$$q = q_{t+1}$$

Paso 6: Graficar la potencia generada y el volumen del embalse cubriendo todo el periodo de la serie histórica.

4. RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES

Para las usinas de Acaray e Yguazú fueron necesarias realizar algunas consideraciones para cubrir todos los aspectos del modelado, necesarios para el cálculo de la Energía Firme.

El comportamiento del canal de fuga de la usina de Acaray es influenciado por el nivel del Río Paraná. Para modelar la relación entre el Río Paraná y el canal de fuga de Acaray fue tomada como referencia la descarga de Itaipu, dado que la cota del Río Paraná en este punto depende fundamentalmente de Itaipu. En la figura 5 se presenta la relación existente entre las descargas de Itaipú y Acaray.

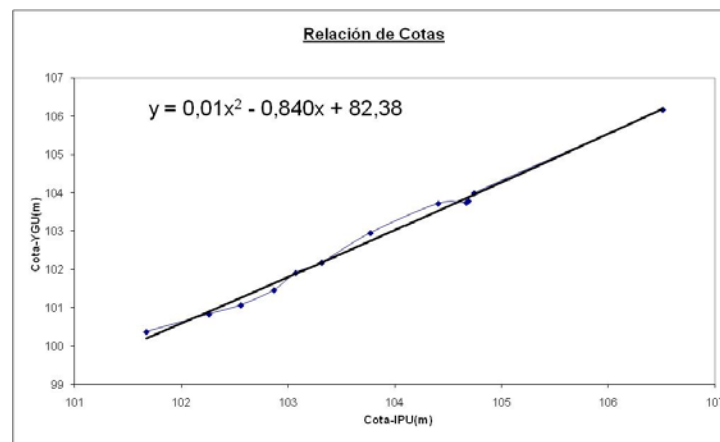


FIGURA 4.1: Canal de fuga de Acaray

La serie de caudales utilizada para el cálculo de la Energía Firme de Acaray corresponde al periodo de 1937 a 2007. La figura 4.2 muestra el resultado de la simulación y cálculo de la Energía firme de Acaray, que resultó en 53,5 MW med.

En el caso de la usina de Yguazú, la serie de caudales naturales corresponde al periodo de 1978 a 2007. Otro aspecto importante a considerar en este caso es lo relacionado a las características de las unidades generadoras. Para el efecto fue estimada la Curva Colina de las unidades generadoras sobre la base de los valores nominales de las mismas. Estos datos son 21 metros, 1083 m³/s y 100 MW, para la altura de salto, caudal turbinado y potencia nominal, respectivamente. Otro dato importante es el tipo de turbina. La figura 4.3 muestra la Curva Colina estimada para las unidades generadoras de la usina de Yguazú.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ
29, 30 Y 31 De Octubre de 2008

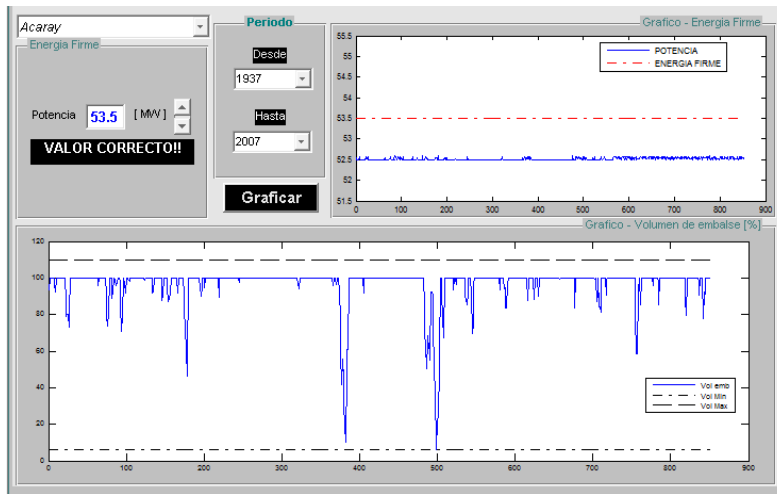


Figura 4.2 – Evolución del embalse de Acaray

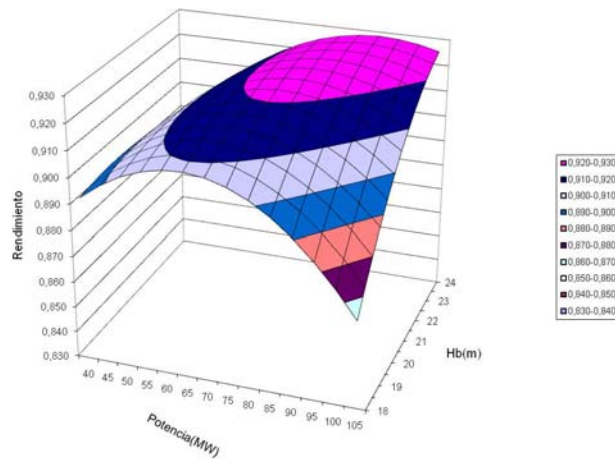


Figura 4.3 – Curva Colina estimada para las unidades generadoras del Yguazú.

Las simulaciones de la operación del Yguazú apuntan el valor de 31,5 MWmed como Energía Firme, conforme se puede apreciar en la figura 4.4.

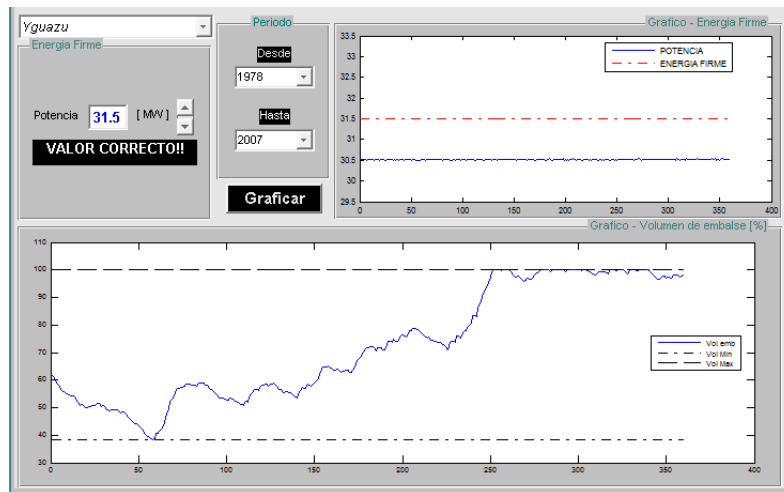


Figura 4.4 – Evolución del embalse de Yguazú



5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rodrigo García, “Simulación de Operación Hidroenergética y Calculo de Energía Firme de Centrales Hidroeléctricas”, “Universidad Nacional del Este”, “Ciudad del Este”, Abril de 2006
- [2] *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, EDFF, 1990.
- [3] *Gaudencio Zoppetti Júdez*, “Centrales Hidroeléctricas: Su Montaje, regulación y ensayo” Publicado por Gustavo Gili, 1982.