

ESTUDIO DE LA OPERACIÓN CONJUNTA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA YACYRETÁ Y AÑA CUÁ

Wilder M. Mereles D., Dionicio González T.

Entidad Binacional Yacyretá

Paraguay

RESUMEN

La maquinización de la Central Brazo Aña Cuá (CBAC) permitirá el aprovechamiento energético de las descargas en este brazo, optimizando la producción hidroeléctrica del Río Paraná entre Paraguay y Argentina. Ambos países a su vez ante el continuo crecimiento en su demanda interna de energía, tienen la posibilidad de incrementar en aproximadamente 10 % la producción de energía hidroeléctrica en Yacyretá, aumentando de esta manera su matriz energética y obteniendo considerables beneficios debido a su maquinización.

Además de promover beneficios económicos para ambas naciones, también se tienen beneficios ambientales de importancia para toda su zona de influencia. Estos se derivan de la incorporación de una importante instalación de transferencia de peces y la descarga del caudal ecológico a través de las turbinas de la CBAC, por otro lado considerando la cota definitiva de operación del embalse, la CBAC contará con una potencia instalada de aproximadamente 272 MW, cuya operación representa un importante aumento de energía para el crecimiento y desarrollo de los dos países.

Este trabajo busca cuantificar la energía generada a lo largo del periodo de planeamiento. Para ello se harán simulaciones del modelo de la Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY) y de la Central Hidroeléctrica Aña Cuá (CHAC) operando conjuntamente. Serán utilizadas las series históricas de caudales afluentes a la central (1971-2013) y las características técnicas y condiciones operativas para ambas centrales, tales como: los valores máximos y mínimos de la capacidad del embalse, potencia de las unidades generadoras, polinomios cota-volumen, cota-área, nivel del canal de fuga (CHY y CHAC) y las demás componentes de la ecuación de balance hídrico.

Para el efecto, se elabora un modelo global dividido en varios sub-modelos, esto considerando los parámetros de operación de la CHY y la CHAC, tales como: la curva cota versus volumen asociado al embalse; la curva cota versus caudal efluente asociado al canal de fuga; las reglas y límites operativos del embalse y los límites operativos de las unidades turbina-generador. La función de producción de la CHY es dada en función de la altura del salto y del caudal turbinado.

Se busca maximizar la energía generada entre CHY+CHAC y para ello se clasifican en escenarios de operación a fin de poder visualizar los efectos de la operación conjunta de ambas centrales. Esto será posible variando algunos parámetros como por ejemplo: caudal mínimo en el Brazo Aña Cuá, las restricciones operativas como el límite del embalse y la capacidad de producción de las unidades generadoras y los componentes de la ecuación de balance hídrico.

Finalmente los resultados obtenidos serán analizados y comparados entre sí, visualizando las ventajas y desventajas de cada escenario de operación.

PALABRAS CLAVES

*Central H. Yacyretá, Central H. Aña Cuá, Maquinización, Matriz energética, Planeamiento energético, Generación Hidroeléctrica, Modelo computacional, Demanda de energía.

1. INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica de Yacyretá es un aprovechamiento binacional entre el Paraguay y la Argentina, localizado en el Río Paraná, está situada, aproximadamente a 120 Km Encarnación (Paraguay) y 70 km al oeste de Posadas (Argentina) y; a 300 Km al sudeste de Asunción y a 1000 km al Norte de Buenos Aires.

El Río Paraná se divide en dos vertientes: el Brazo Principal y el Brazo Aña Cuá. El 70% de caudal pasa por el Brazo Principal y el 30 % por el Brazo Aña Cuá [5,6].

En el Brazo Principal del río Paraná se encuentra la Central Hidroeléctrica Yacyretá, equipada con 20 máquinas de una potencia instalada de 3.200 MW; un vertedero provisto de 18 compuertas radiales y una Esclusa de Navegación. Además de esto, está prevista la instalación de 3 nuevas unidades de generación, cuya participación en la operación conjunta de la central no serán incluidas en el presente trabajo [5,6].

En el Brazo Aña Cuá, se encuentra la presa de Aña Cuá, cuyo vertedero está dotado de 16 compuertas, que operando en forma conjunta con el vertedero principal, son capaces de verter hasta 95.000 m³/s. Este vertedero descarga en forma permanente, un mínimo caudal de agua necesario para mantener las condiciones ambientales de dicho brazo [5,6].



Fig. 1- Ubicación de la Central Hidroeléctrica de Yacyretá [7]

La CHY se ha consolidado como una de las más importantes empresas generadoras de energía eléctrica siendo capaz de producir en promedio 20.357 GWh de energía (desde el Año 2011 a 2013). De esto un promedio de 88,38 % fueron suministrados al mercado argentino y los restantes 11,62 % al mercado paraguayo [4,5], durante el mencionado periodo.

2. EL PROYECTO DE AMPLIACIÓN DE LA CHY – LA MAQUINIZACIÓN DE LA CENTRAL AÑA CUÁ

La maquinización de la CBAC permitirá el aprovechamiento energético de las descargas en este brazo, optimizando la producción hidroeléctrica del Río Paraná entre Paraguay y Argentina. Ambos países a su vez ante el continuo crecimiento en su demanda interna de energía, tienen la posibilidad de incrementar en aproximadamente 10 % la producción de energía hidroeléctrica en Yacyretá, aumentando de esta manera su matriz energética y obteniendo considerables beneficios debido a su maquinización.

Además de promover beneficios económicos para ambas naciones, también se tienen beneficios ambientales de importancia para toda su zona de influencia. Estos se derivan de la incorporación de una importante instalación de transferencia de peces y la descarga del caudal ecológico a través de las turbinas de

la CBAC. Por otro lado considerando la cota definitiva de operación del embalse, la CBAC contará con una potencia instalada de aproximadamente 272 MW, cuya operación representa un importante aumento de energía para el crecimiento y desarrollo de los dos países [2].

Es importante destacar que la nueva Central no requerirá la ampliación del embalse existente, ni la inundación de ningún territorio adicional. Tampoco será necesaria la construcción de nuevas presas, vertederos o esclusas, ya que el Proyecto Yacyretá ya dispone de esas estructuras [2,3].

Se presenta a continuación una ficha técnica preliminar, con valores orientativos para los distintos parámetros del proyecto.

Tabla 1. Resumen de las características técnicas de la CHAC [2].

Ficha Técnica Preliminar	
Turbinas tipo	Kaplan de eje horizontal, tipo bulbo de regulación doble
Caudal mínimo a turbinar	1.500 m ³ /s
Potencia instalada	5 Un x 54,4 MW = 272 MW
Salto neto correspondiente	18,10 m
Caudal correspondiente	329,5 m ³ /s
Capacidad máxima del generador	59,15 MVA

3. EL PROBLEMA DE LA PROGRAMACIÓN ENERGÉTICA DE LA OPERACIÓN

El objetivo del planeamiento energético de la operación, puede ser formulado como siendo el de producir un programa de generación que atienda a sus compromisos de suministros, respetando a las restricciones operativas de la planta, y a un mínimo costo.

Aplicando un enfoque económico-financiero al problema global, y restringiendo el problema de la programación energética de la operación exclusivamente a aspectos técnicos y de medio ambiente, resumidamente las ecuaciones matemáticas asociadas a la operación de la CHY+CHAC se pueden formular como sigue [1]:

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T Egchy_t(Pgchy_t) + Egchac_t(Pgchac_t) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$V_{t+1} = V_t + Qaflu_t - (Qtur_{ACt} + Qtur_{BPt}) - (Qver_{ACt} + Qver_{BPt}) \quad (2)$$

$$\underline{V}_t \leq V_t \leq \bar{V}_t \quad (3)$$

$$\underline{Qtur}_{ACt} \leq Qtur_{ACt} \leq \bar{Qtur}_{ACt} \quad (4)$$

$$\underline{Qtur}_{BPt} \leq Qtur_{BPt} \leq \bar{Qtur}_{BPt} \quad (5)$$

$$\underline{Qver}_{ACt} \leq Qver_{ACt} \leq \bar{Qver}_{ACt} \quad (6)$$

$$\underline{Qver}_{BPt} \leq Qver_{BPt} \leq \bar{Qver}_{BPt} \quad (7)$$

$$Qtur_{ACt} + Qver_{ACt} \geq \underline{U}_t \quad (8)$$

Para todo; $t = 1 \dots T$

Dónde:

- t - índice de los períodos del planeamiento;
- T - horizonte del planeamiento;
- $Qtur$ - caudal turbinado;

- Q_{ver} - caudal vertido;
- V - nivel de almacenamiento del embalse;
- U - requisito de caudal mínimo aguas debajo de la planta;
- $Egchy(Pgchy)$ - Energía producida (durante el periodo t) en Yaciretá, asociado a la Potencia generada Yaciretá ($Pgchy$).
- $Egchac(Pgchac)$ - Energía producida (durante el periodo t) en Aña Cuá, asociado a la Potencia generada en Aña Cuá ($Pgchac$).

Se puede notar que la ecuación (2) corresponde al balance hídrico del reservatorio, la ecuación (3), (4), (5), (6), (7) corresponden a los límites del almacenamiento del embalse; límites superiores e inferiores de turbinado; límites de operación de los vertederos del Brazo Principal (VBP) y del Brazo Aña Cuá (VAC). Finalmente la ecuación (8) corresponde al caudal mínimo requerido en el Brazo Aña Cuá. En la Fig. 2, se puede apreciar la interrelación existente entre las principales variables invocadas.

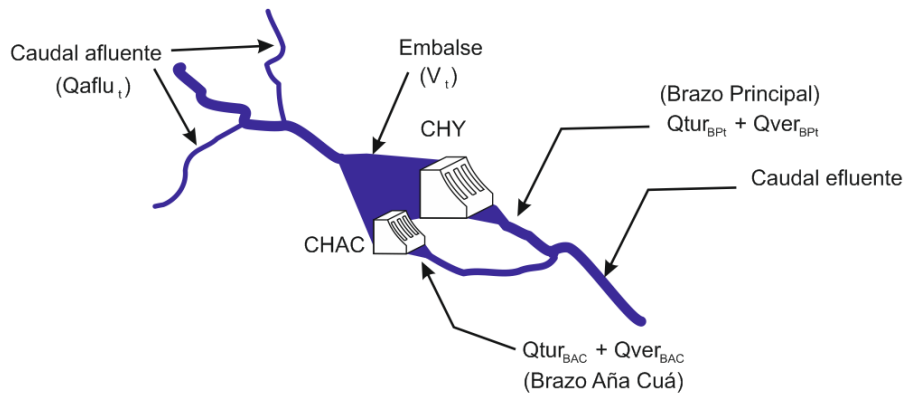


Fig. 2. Representación de la interacción de las principales variables del modelo CHY+CHAC.

4. DINÁMICA OPERATIVA DE LA PLANTA

4.1. Aspecto dinámico del embalse.

En una central hidroeléctrica, un factor fundamental de la operación de sus unidades está asociado a la variación dinámica del embalse, que debe satisfacer la demanda de energía y/o potencia, atendiendo también la restricción de caudal mínimo del río.

La demanda deriva de compromisos contractuales y el mínimo flujo del río tiene que ver con utilidades complementares del agua, tales como: navegación, irrigación, minimización de crecidas, exigencias ecológicas, etc.

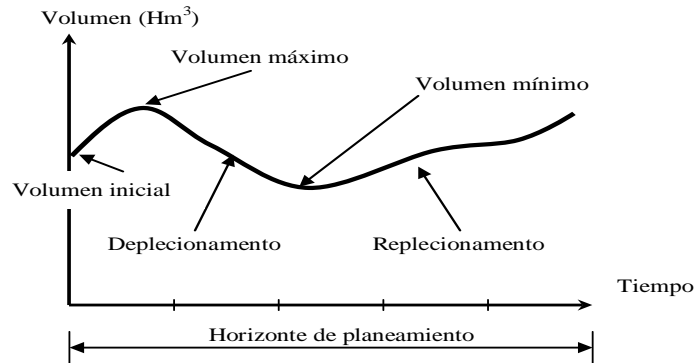


Fig. 3- Ejemplo del comportamiento dinámico de un embalse [1]

Llevando en cuenta estos factores, a los reservorios se le puede asociar cambios de niveles entre dos valores extremos: nivel máximo y nivel mínimo. En la Figura 3, se observa que el volumen del reservorio disminuye durante el deplecionamiento, pues la generación óptima exige cantidad de agua mayor al afluente del reservorio; sin embargo, en el replecionamiento, esta situación se invierte [1].

4.2. La Generación Hidroeléctrica

La potencia de generación en las usinas hidroeléctricas es función, primordialmente, del caudal turbinado (q) y de la altura de la caída del agua (h_l); a esto se debe asociar que en el generador, la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica no es totalmente verificada, debido a las distintas pérdidas tales como: pérdidas en los arrollamientos, pérdidas del sistema de excitación, pérdidas en el sistema de ventilación y pérdidas por histéresis y de corrientes de Foucault. Todos estos parámetros dan un carácter no lineal a la función de generación de una hidroeléctrica [1].

Finalmente, la interacción de los principales parámetros involucrados para la determinación de la potencia generada se puede representar por la expresión:

$$P = g \times \rho \times 10^{-6} \times \eta_{tur} \times \eta_{ger} \times h_l \times q \quad (9)$$

Dónde:

- P - es la Potencia Generada en la maquina en [MW]
- g - es la aceleración de la gravedad en [m/s^2].
- ρ - peso específico del agua en [kg/m^3].
- η_{tur} - es el rendimiento de la turbina en [%].
- η_{gen} - es el rendimiento del generador en [%].
- h_l - es la altura del salto neto en [m].
- q - es el volumen de agua que pasa por las turbinas por unidad de tiempo en [m^3/s].

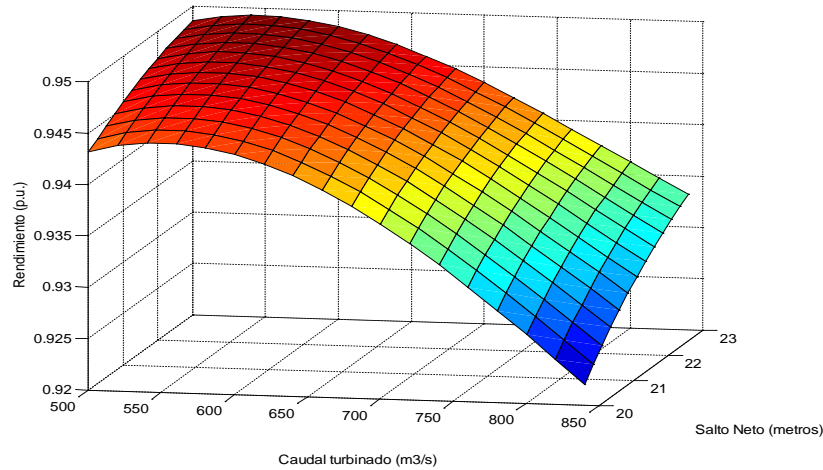


Fig. 4- Curva colina de rendimiento de la turbina Kaplan

El rendimiento de la turbina hidráulica es una función no lineal del caudal turbinado y de la altura líquida. En la figura 4, se puede observar el rendimiento de la turbina hidráulica Kaplan de la CHY [6], que por su forma es conocida como curva colina. En general el uso del rendimiento del conjunto turbina-generator (η_{tg}) es más frecuente, lo cual puede ser definido como el producto entre rendimientos de la turbina (η_{tur}) y del generador (η_{gen}).

4.3. Determinación del salto neto.

El nivel del embalse (h_r) es una función no lineal del volumen de agua almacenado (V) en el reservatorio. El nivel del canal de fuga (h_{cf}) es una función no lineal del caudal turbinado (q) total de la usina, en un instante dado. La pérdida hidráulica (h_p) se refiere a la reducción de la energía potencial por la fricción del agua al descargarse por el interior del conducto forzado. Para el cálculo de la pérdida son llevados en consideración los datos referentes a las características físicas del conducto forzado y el nivel de almacenamiento del embalse así como el nivel del canal de fuga [1].

En términos matemáticos, para la determinación del salto neto (h_l), se puede apreciar la integración de los parámetros mencionados mediante la siguiente expresión:

$$h_l = h_r - h_{cf} - h_p \quad (10)$$

Dónde:

- h_l - Salto neto, en [m]
- h_r - Cota o nivel del embalse, en [m].
- h_{cf} - Cota o nivel del canal de fuga, función del caudal efluente, en [m].
- h_p - Perdida hidráulica o perdida de altura, en [m].

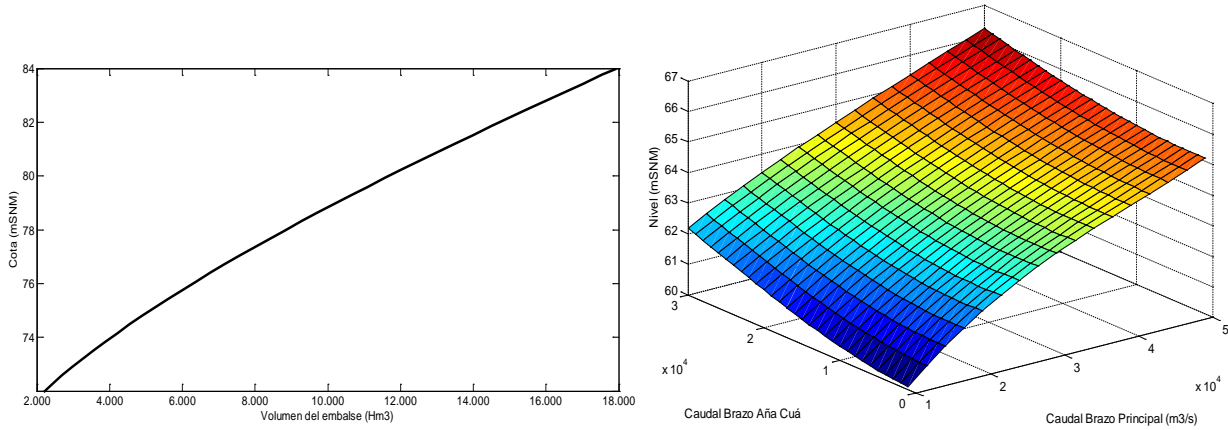


Fig. 5- (Izq.)Curva Cota-Volumen de la CHY. (Der.) Curva Caudal BP-VAC-Nivel de restitución

Normalmente el nivel del embalse es definido por una función polinomial del volumen medio, similar al representado en la Figura 5 (Izq). En la CHY, debido que el nivel del canal de fuga (restitución), está asociado a la variación del caudal efluente en el Brazo Aña Cuá y el caudal efluente del Brazo Principal, se tiene una familia de curvas, debiendo para el mismo adoptar una curva para cada valor efluente de ambos brazos. Dichas curvas se pueden observar en la Figura 5 (Der.) [6].

4.4. Representación de los recursos hídricos

Serán utilizadas las series de caudales promedios diarios disponibles del Río Paraná en la CHY correspondiente al periodo de 1971 a 2013. En la Fig. 6, se puede apreciar la mencionada serie histórica y su comportamiento a lo largo del tiempo, con esto será posible la simulación de la Central con una discretización en promedio diario [4,5].

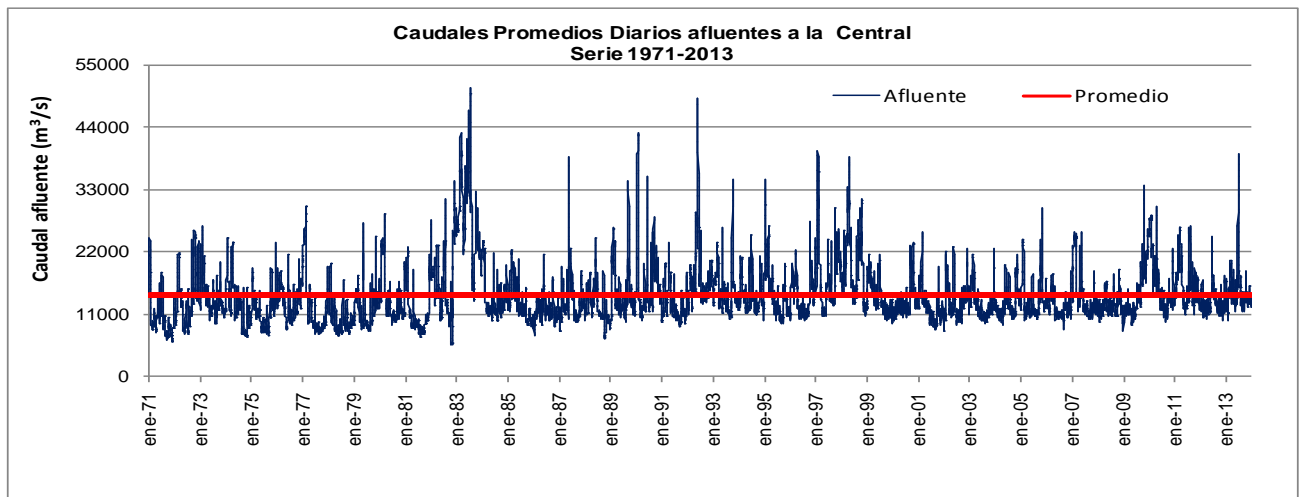


Fig. 6- Serie 1971-2013, afluentes promedios diarios en la CHY

5. SIMULACIONES COMPUTACIONALES

El modelo de simulación a emplear es el desarrollado en [1], con la variante que para este trabajo ha sido desarrollado un submodelo específico para la generación en Aña Cuá que al igual que el modelo principal, también fue desarrollado en simulink. Debido a la limitación de espacio, serán presentados algunos de los submodelos componentes del modelo global de simulación:

Tabla 2. Descripción de los submodelos componentes del modelo global.

Modelo del embalse:	Polinomio cota-volumen, polinomio volumen-cota, polinomio del canal de fuga, límites máximo y mínimo del embalse, etc.
Modelo de la CHAC + Modelo de vertimiento: <i>(Cuenta con 5 sub-modelos, que representa a cada unidad generadora)</i>	Limitaciones operativas máximos y mínimos de la turbina y del generador, curva colina de la turbina Kaplan, pérdidas eléctricas del generador, límites del VBAC y VBP, regla de operación de vertederos, caudal mínimo del BAC.
Modelo de la CHY: <i>(Cuenta con 20 sub-modelos, que representa a cada unidad generadora)</i>	Limitaciones operativas máximos y mínimos de la turbina y del generador, curva colina de la turbina Kaplan, pérdidas eléctricas del generador.

La fig. 7 presenta el modelo global de simulación desarrollado y en el mismo se puede notar los distintos módulos de que se compone este modelo.

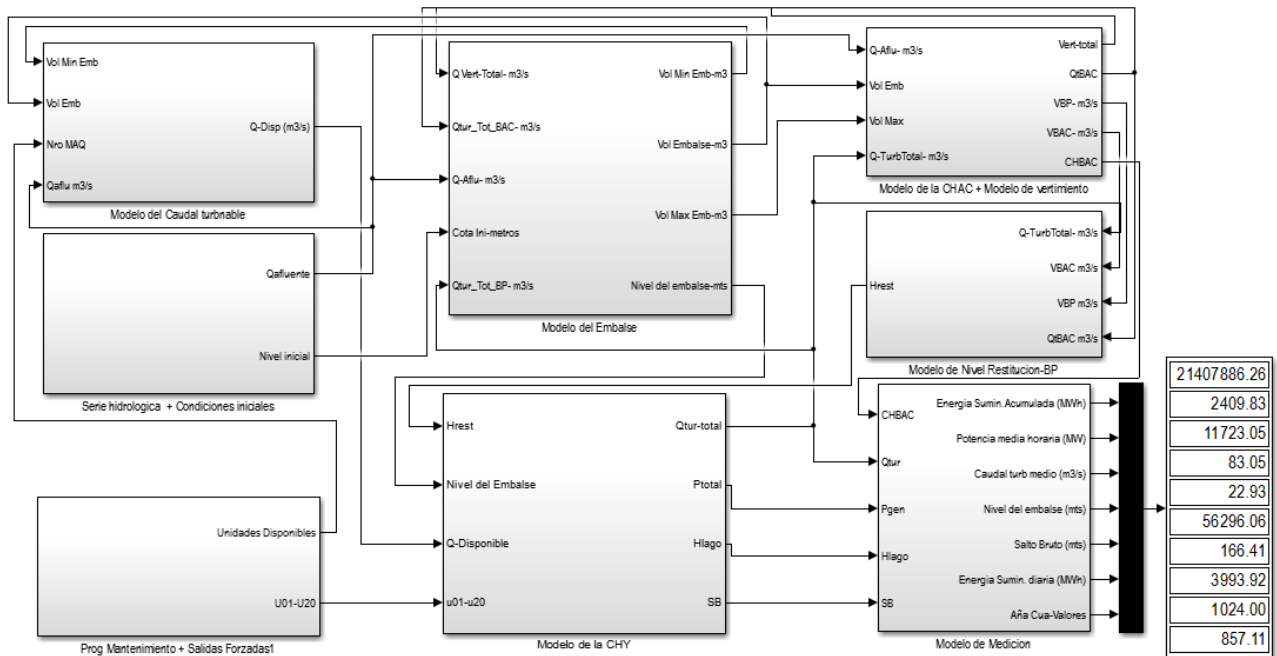


Fig. 7- Representación del modelo global de simulación.

6. RESULTADOS

En este apartado son presentados los productos de las simulaciones realizadas y serán expuestos los resultados más relevantes que ayuden a visualizar los beneficios de la operación conjunta de la CHY con la CHAC. Para todos los casos fueron estudiados los escenarios de:

- Escenario N° 1:** Operación conjunta: CHY (20 x 155 MW) + CHAC (5 x 54,4 MW).
- Escenario N° 2:** Operación de la CHY (20 x 155 MW) y caudal mínimo del VBAC = 1.000 m³/s.
- Escenario N° 3:** Operación de la CHY (20 x 155 MW) y caudal mínimo del VBAC = 1.500 m³/s.

Los resultados obtenidos en las simulaciones, descritas a continuación, incluyen todos los parámetros y condiciones mencionados en los apartados 2, 3, 4 y fueron realizadas varias simulaciones con distintos escenarios para probar exhaustivamente el modelo de planeamiento de la operación.

En cuanto al vertimiento total (VT) en la Central, se puede destacar la complejidad del sistema de vertimiento de Yacyretá, debido a que el mismo está asociado a la suma de los caudales vertidos por VBAC y VBP. La operación de estos dos vertederos están interrelacionados entre si y dependiendo de los valores que estos asumen, afectan de manera directa la altura del canal de fuga y por consiguiente el salto útil de la presa, pudiendo afectar de manera positiva o negativa la generación en ambas centrales.

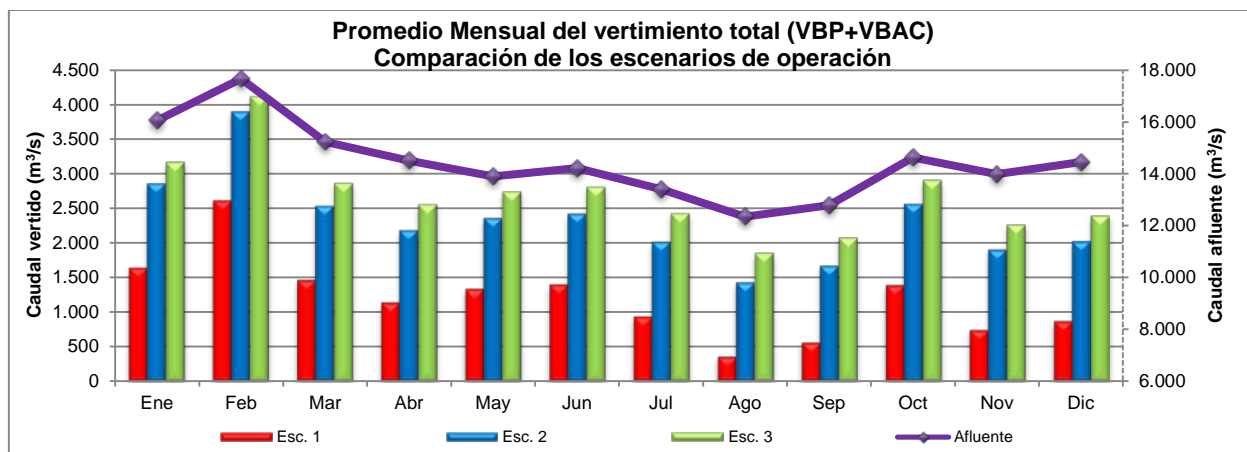


Fig. 8- Vertimiento total ocurrido en los escenarios

Como primer análisis se puede observar los resultados obtenidos en la Fig. 8, este se refiere al comportamiento que experimenta el vertimiento total de la operación conjunta de la central (VBP+VBAC), para distintos escenarios de operación. Se puede apreciar que con la maquinización de Aña Cuá y Yacyretá operando con todas sus máquinas a su potencia nominal de diseño, el caudal de agua vertido es considerablemente inferior a los otros escenarios con un promedio de 1.209 m³/s para todos los meses. Por otro lado la operación de la central en el Escenario N° 2 muestra que el caudal vertido aumenta considerablemente a 2.329 m³/s de promedio. Para el Escenario N° 3, los valores de vertido son aún mayores, sobrepasando claramente a los resultados simulados para los escenarios 1 y 2, llegando a 2.688 m³/s en promedio.

Es importante recalcar que en el escenario 1, se garantiza el caudal mínimo de 1.500 m³/s por el Brazo Aña Cuá, siendo vertido el caudal que sobrepase el caudal máximo turbinado resultante de la operación de las 5 unidades tipo bulbo proyectadas. En todos los meses se percibe una gran diferencia entre el escenario 1 y los demás, en cuanto al volumen de agua vertido, todos a su vez asociados al caudal afluente, en este gráfico representado por su promedio mensual, donde se puede apreciar que el mes de febrero es el mes con mayor afluencia y también el mes con mayor vertido.

Para la producción de energía eléctrica, la CHY depende de los caudales afluentes; estos a su vez provienen de las centrales aguas arriba y de las cuencas que componen el Río Paraná. En este trabajo se destaca la influencia de la generación en la CHAC para los valores de generación diaria en la CHY.

La simulación diaria en cuanto a la generación de la CHY para los tres escenarios se puede apreciar en la Fig. 9, la misma presenta la evolución de la Energía Suministrada Neta Acumulada. Así como el caso del vertimiento, se puede apreciar que la condición más desfavorable es el presentado en el Esc. 3, donde se destaca que el menor valor de energía anual acumulada ocurre en esa condición.

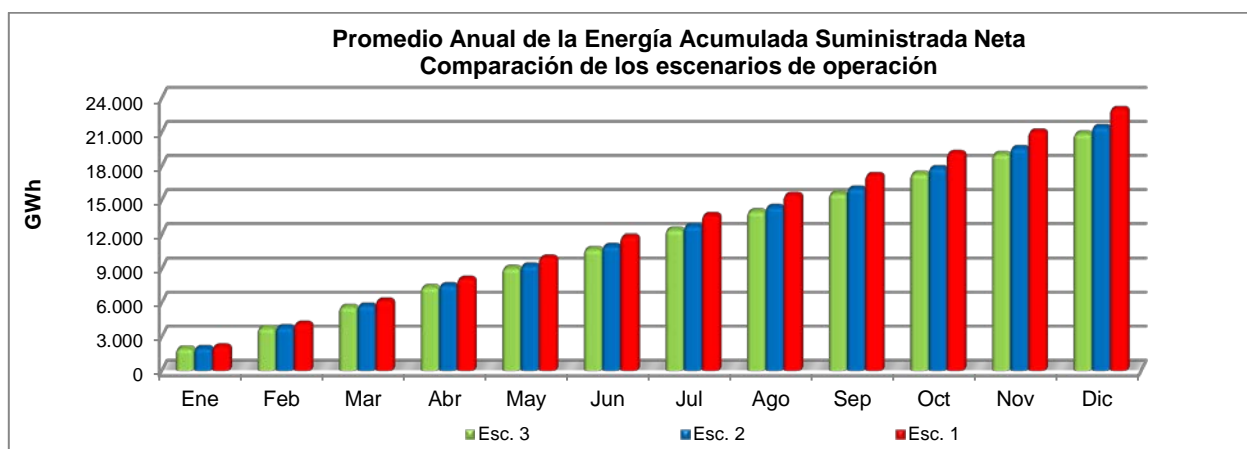


Fig. 9. Comparación de la Evolución de la Energía Anual entre los distintos escenarios de operación.

Tomando como referencia el escenario 3, dado a que corresponde a la modalidad de operación proyecta, se puede precisar que el Escenario 1, es de 10,5 % superior al Esc. 3 y 7,4 % mayor al Esc. 2. Con esto es posible cuantificar el beneficio neto de la operación conjunta de la CHY+CHAC. La Fig. 10, resume claramente la diferencia existente entre cada escenario estudiado, indicando una importante diferencia de energía anual neta entre el escenario 1 y los demás.

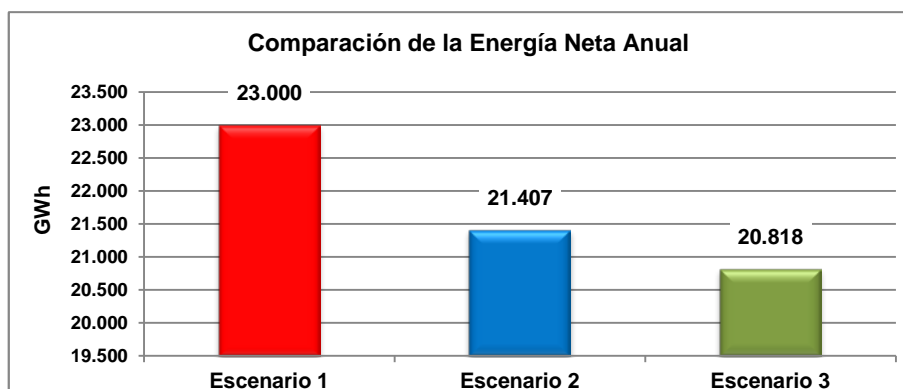


Fig. 10. Comparación de la Energía Anual Neta Suministrada para los distintos escenarios.

La generación en CHAC y su comportamiento en promedio mensual se puede observar en la Fig. 11, en la misma se puede notar la potencia promedio producida por la central a cada mes del año. También se visualiza que la potencia máxima promedio alcanzada llega a 244 MW y un mínimo de 226 MW de potencia promedio, siendo el promedio anual de aproximadamente 237 MW.

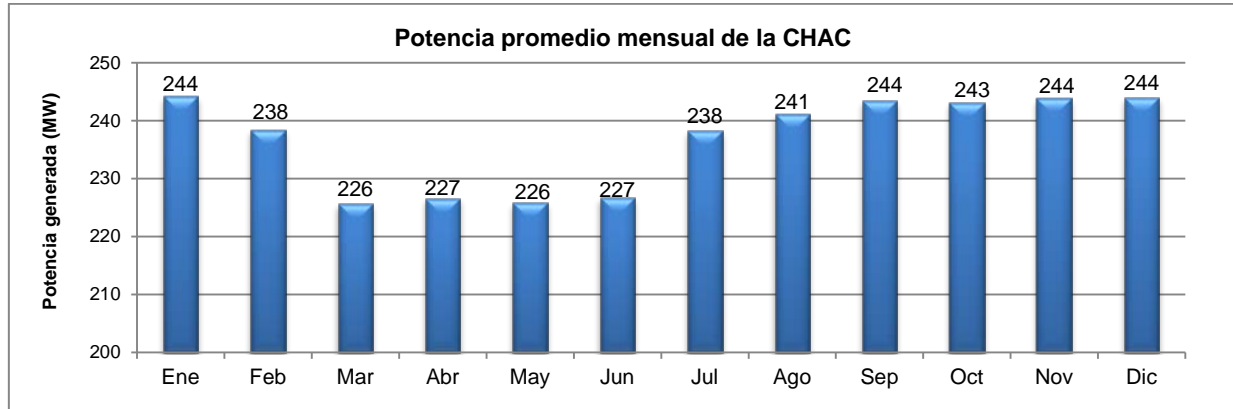


Fig. 11. Evolución de la potencia promedio de la CHAC.

7. CONCLUSIONES

Con base a los resultados de los escenarios estudiados, en cuanto a la aplicación del modelo computacional a la operación energética conjunta de la CHY+CHAC permite formular las siguientes conclusiones:

- 1- La maquinización de la Central Aña Cuá permitirá aprovechar la descarga permanente de 1.500 m³/s que se realiza para mantener las condiciones ambientales en dicho brazo, para la generación adicional de energía eléctrica. Con esto se optimiza la relación MW-Generado/Área-inundada del aprovechamiento hidroeléctrico del Río Paraná, dado que la mayor parte de la estructura de la central hidroeléctrica ya se encuentra instalada en Aña Cuá.
- 2- La producción de energía en Yacyretá, experimentará un 10,5 % de incremento con relación a la modalidad de operación proyectada. Esto representa un importante aumento en la Matriz Energética de Paraguay y Argentina, pues es de aproximadamente 2.077 GWh/Año que se estará produciendo de manera continua.
- 3- La implantación de la CHAC, también tiene importantes beneficios ambientales pues permite incorporar una instalación de transferencia de peces y a su vez mejorar las condiciones ambientales de dicho brazo.

8. REFERENCIAS

- [1]. Mereles D.W., González T. D. “Aplicación de modelos dinámicos para la estimación de la generación en la Central Hidroeléctrica Yacyretá”. X Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo – CIGRÉ. Setiembre de 2012.
- [2]. Entidad Binacional Yacyretá. Licitación Pública Internacional N° 486. Pliego de Preselección para: “El suministro electromecánico específico de generación para la ampliación del Parque de Generación de la Central Hidroeléctrica de Yacyretá en el segundo brazo del Río Paraná (Brazo Aña Cuá)”. Año 2011
- [3]. Harza y Consorcios - CIDY. Proyecto Yacyretá. “Estudio de Operación a Cotas Intermedias del Embalse de Yacyretá”. Informe N° 1252-I-31.3.00 R0. Julio de 2002
- [4]. Entidad Binacional Yacyretá. Informe Anual (2011 a 2013). Departamento Técnico. Movimiento de energía.
- [5]. Entidad Binacional Yacyretá. Datos Técnicos. Tomado de: <http://www.eby.gov.py/index.php/chy/datostecnicos>. Agosto de 2014.
- [6]. Entidad Binacional Yacyretá. Manual de operación y mantenimiento-Volumen 2. 1998
- [7]. Google-maps: “<http://maps.google.com.py/maps/place/Central+Hidroelectrica+Yacyretá/>”. Agosto de 2014.