
APLICACIÓN DE MODELOS DINAMICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA GENERACION EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE YACYRETA

Wilder M. Mereles, Dionicio González

Entidad Binacional Yacyretá

Paraguay

RESUMEN

El planeamiento y la operación de una central hidroeléctrica es una tarea bastante compleja, debido a que sugiere una serie de decisiones a tomar que afectan a la operación de la propia central y al sistema eléctrico asociado. Las decisiones operativas adoptadas en el presente tienen influencia en el resultado, para mejorarlo o empeorarlo.

El presente trabajo tiene como objetivo describir brevemente los aspectos relevantes de la elaboración de un modelo computacional para apoyo a las decisiones gerenciales de una planta generadora de energía hidroeléctrica (PGH). Dicho modelo es desarrollado aplicando la técnica de dinámica de sistemas (DS) e implementado a través de una herramienta computacional para su aplicación a la “Simulación de la Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY)”.

En esta línea, inicialmente se focaliza las ideas básicas asociadas a los objetivos empresariales; seguidamente se formulan y analizan los principales aspectos relacionados con las estrategias que permitan alcanzarlas.

Para el efecto, se elabora un modelo global dividido en varios sub-modelos, esto tomando en consideración los siguientes parámetros de operación de la CHY: 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-generator. La función de producción de la CHY es dada en función de la altura del salto y del caudal turbinado.

El modelo busca maximizar la energía generada a lo largo del periodo de planeamiento. El mismo permite simular por un periodo de 1 año (365 días) una amplia gama de escenarios de operación, simplemente variando algunos parámetros como por ejemplo: las restricciones operativas como los límites de los embalses y la capacidad de producción de las unidades generadoras y los componentes de la ecuación de balance hídrico.

Finalmente los resultados obtenidos son comparados con los valores provenientes de la operación de la CHY durante el año 2011 y los mismos presentan importantes aportes para el análisis del planeamiento de la operación, es decir, si las decisiones operativas futuras son realizadas implementando este modelo de simulación, es posible que se pueda obtener resultados que ayuden a incrementar la producción de energía.

PALABRAS CLAVES

*Sistema Eléctrico, Planeamiento energético, Generación Hidroeléctrica, Modelo computacional, Dinámica de Sistemas.

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.

En el Brazo Principal del río Paraná se encuentra la Central, 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 estas maquinas, está prevista la instalación de 3 nuevas unidades de generación [5].

En el Brazo Aña Cuá del mismo río, 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.



Figura 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 20.866 GWh de energía en 2011. De esto un 89,58 % fueron absorbidos por el mercado argentino y los restantes 10,42 % por el mercado paraguayo [4].

A todo lo expuesto y adicionando la posibilidad de la ampliación de la CHY con tres nuevas unidades generadoras, mas el maquinado de la Central Aña Cuá, no es difícil imaginar el alto grado de complejidad a la que está supeditado la elaboración de un planeamiento de la operación energética.

Como una posible respuesta a esta situación, se puede gestionar acciones a nivel gerencial a fin de recurrir a las técnicas de simulación; que son las que podrían dar una “visión futura” a las acciones actuales.

2. El problema de la programación energética de la operación

El objetivo del planeamiento energético de la operación (PEO) 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, las ecuaciones matemáticas asociadas a la CHY se pueden formular como sigue [1, 2,3]:

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T Egen_t (Pgen_t) \quad (1)$$

Sujeto a:

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

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

$$\underline{Qtur}_t \leq Qtur_t \leq \bar{Qtur}_t \quad (4)$$

$$Qver_{ACt} \leq \bar{Qver}_{ACt} \quad (5)$$

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

$$Qver_{ACt} \geq \underline{U}_t \quad (7)$$

$$\text{Para todo; } t = 1 \dots T$$

Donde:

- t - índice de los periodos del planeamiento;
- T - horizonte del planeamiento;
- $Qtur$ - caudal turbinado;
- $Qver$ - caudal vertido;
- V - nivel de almacenamiento del embalse;
- U - requisito de caudal mínimo aguas debajo de la planta;
- $Egen(Pgen)$ - Energía producida (durante el periodo t), asociado a la Potencia generada ($Pgen$).

Se puede notar que la ecuación (2) corresponde al balance hídrico del reservatorio, la ecuación (3), (4), (5), (6), 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 (7) corresponde al caudal mínimo requerida para el Brazo Aña Cuá.

3. Construcción del modelo principal aplicando diagramas de dinámica de sistemas.

La Fig. 2 presenta un ejemplo de la aplicación del diagrama de lazo causal, en la misma se observa la integración de las principales variables del planeamiento de la operación de la central hidroeléctrica, representados a través de un diagrama de flujos. En dicho diagrama se puede notar la polaridad indicada, que muestra el sentido del efecto de una variable sobre la otra [2].

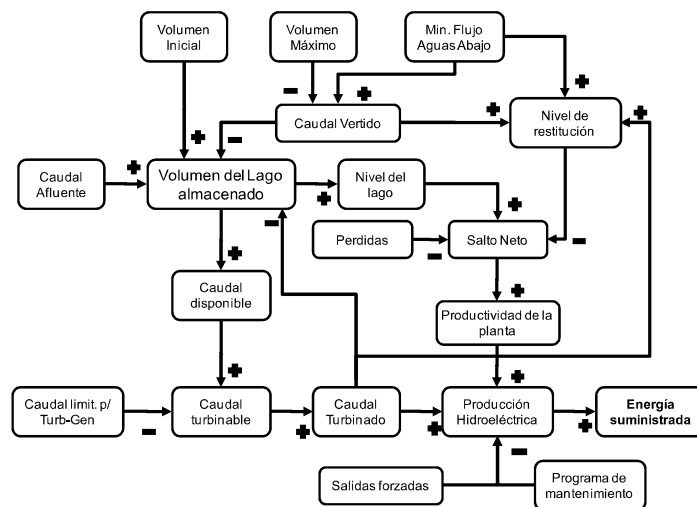


Figura 2. Diagrama de lazos causales del modelo global de la PGH.

También se puede visualizar los lazos cerrados que representan el comportamiento dinámico del modelo, entre los cuales debido a su grado de importancia se destacan:

- El primero está asociado a la variación del volumen almacenado en el reservorio, donde se observa que, aumentando el Caudal turbinado, aumenta la Producción hidroeléctrica.
- En el segundo, en la producción hidroeléctrica, se observa que el aumento del Caudal turbinado disminuye el Volumen del lago, lo cual a su vez afecta el Nivel del lago y el Nivel de Restitución que juntos modifican el estado del Salto Neto y que afecta la Productividad de la planta, que finalmente afecta la Producción hidroeléctrica.

Además se observan otras variables que influyen sobre el Volumen almacenado, por ejemplo: aumentando el Volumen inicial, aumenta el Volumen almacenado; este volumen también aumenta con el Caudal afluente y disminuye con el Caudal turbinado. Por último el aumento del Caudal Vertido, por su vez, disminuye el Volumen almacenado y aumenta el Nivel de Restitución.

4. Dinámica operativa de la planta

4.1. Aspecto dinámico del embalse.

En una PGH, 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.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

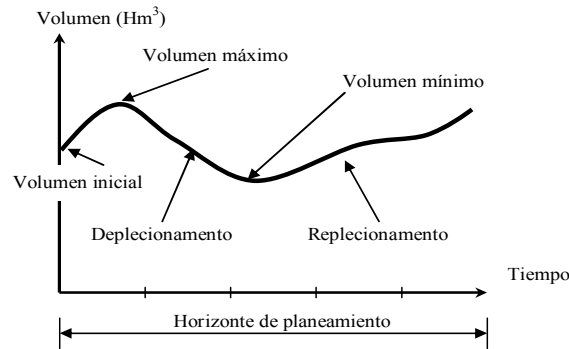


Figura 3. Ejemplo del comportamiento dinámico de un embalse [2].

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 [2].

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); 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:

$$P = g \times \rho \times 10^{-6} \times \eta_{tur} \times \eta_{ger} \times h_l \times q \quad (8)$$

Donde:

- 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_{ger} - 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].

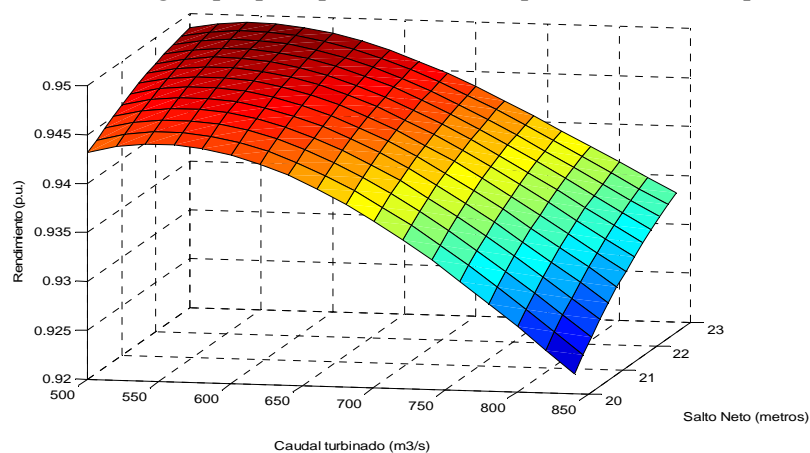


Figura 4. Curva colina de rendimiento de la turbina Kaplan.

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 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:

$$h_l = h_r - h_{cf} - h_p \quad (9)$$

Donde:

- 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 - Pérdida hidráulica o pérdida de altura, en [m].

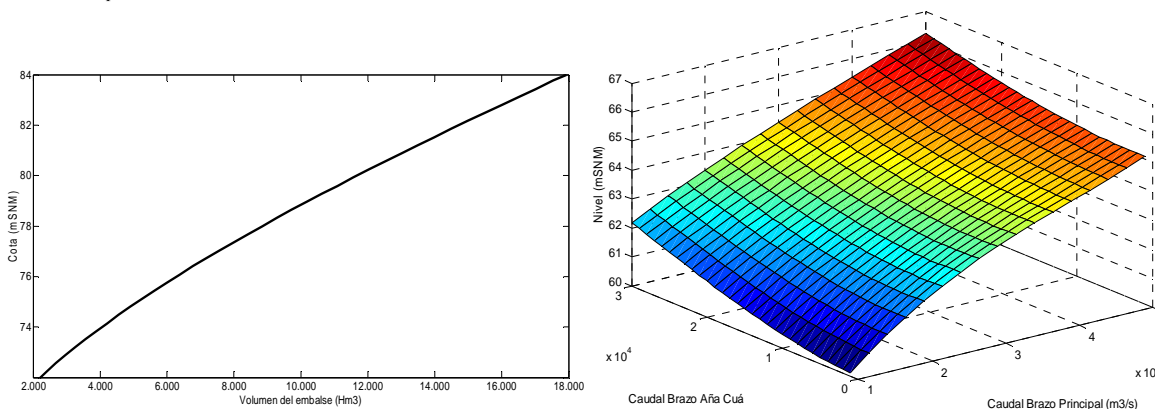


Figura 5. (Izq.) Curva Cota-Volumen de la CHY. (Der.) Curva Caudal BP-VAC-Nivel de restitución

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].

5. Simulaciones computacionales

Para realizar los ensayos de funcionalidad del modelo, fueron utilizados parámetros reales de la CHY. Este procedimiento permitió la obtención de resultados realistas y lo más importante, permitió validar el modelo con la comparación de los datos reales de operación correspondiente al periodo 2011 con los valores obtenidos de la ejecución del simulador construido mediante el simulink (Matlab).

Las simulaciones computacionales, descritas a seguir, incluyen todos los parámetros mencionados los apartados 2, 3, 4 y fueron realizados para probar exhaustivamente el modelo de planeamiento de la operación de la PGH.

El modelo es totalmente desarrollado en simulink y debido a la limitación de espacio, serán presentados solamente algunos de los modelos componentes del modelo global de simulación. La fig. 6 presenta el modelo

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

global de simulación desarrollado y en el mismo se puede notar los distintos módulos de que se compone este modelo. A fin de dar una idea de lo que contempla cada bloque se puede hacer la siguiente clasificación:

Tabla 1. Descripción de los modelos componentes del modelo global.

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

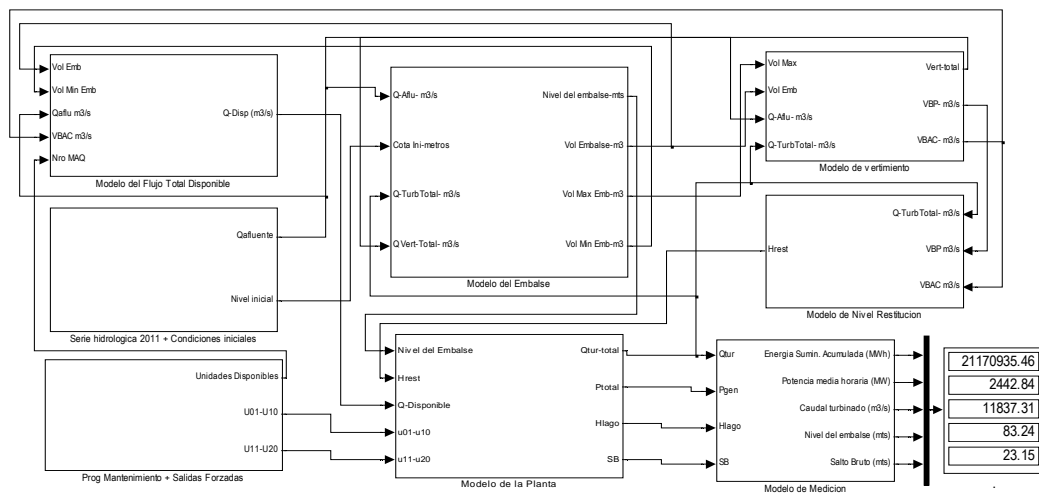


Figura 6. Representación del modelo global de simulación.

Un ejemplo de la composición de cada sub-modelo se puede apreciar en la Fig. 7, en la misma es posible observar los parámetros y su interrelación para el funcionamiento de una unidad generadora de la CHY, para este caso la U01.

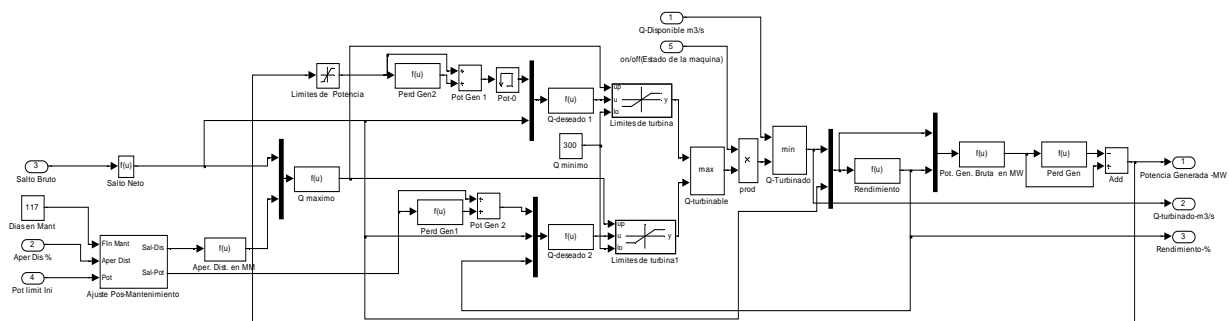


Figura 7. Modelo del generador U01 en simulink [8].

6. Resultados

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

En este apartado son presentados los resultados de los ensayos para verificación del modelo principal, en esta oportunidad serán presentados los resultados más relevantes. Para analizar la coherencia de los resultados, fue realizada múltiples simulaciones, sea variando el volumen inicial del reservatorio, sea manteniendo el volumen inicial del reservatorio en el máximo valor y variando la afluencia natural.

Los resultados obtenidos en la Fig. 8, se refieren a la principal comprobación en la que es sometido nuestro simulador, comparando los valores reales de la operación de la CHY en 2011 con los valores obtenidos como productos de la simulación.

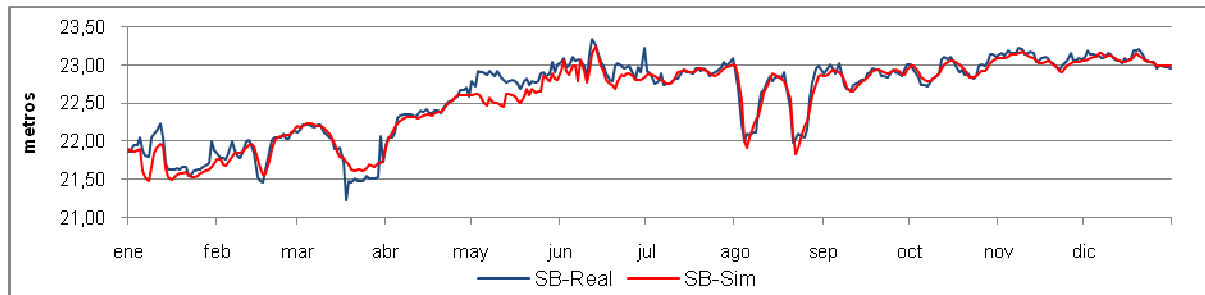


Figura 8. Salto bruto. Comparación de los valores reales vs simulado.

En la Fig. 8, se ha analizado a modo a referenciar el modelo basado en la comparación del salto bruto. En el mismo se observa que la variación del salto bruto simulado tiene un comportamiento idéntico al del salto bruto real y que su comportamiento es consistente con el modo de referencia adoptado.

En cuanto al vertimiento total (VT) en la CHY, se puede apreciar en la Fig. 9 que los resultados de la comparación de los casos real y simulado son muy parecidos, salvo algunas diferencias visibles en los valores pico de vertimiento, no se destacan mayores diferencias. Cabe destacar que a pesar de la complejidad del sistema de vertido de la CHY tiene asociado por la suma de los vertidos por VBAC y VBP, los resultados presentan alto grado de similitud. La operación de estos dos vertederos están interrelacionados entre si y dependiendo de los valores que estos presentan afectan de manera directa la altura del canal de fuga y por consiguiente el salto útil de la presa, pudiendo de afectar de manera positiva o negativa la generación.

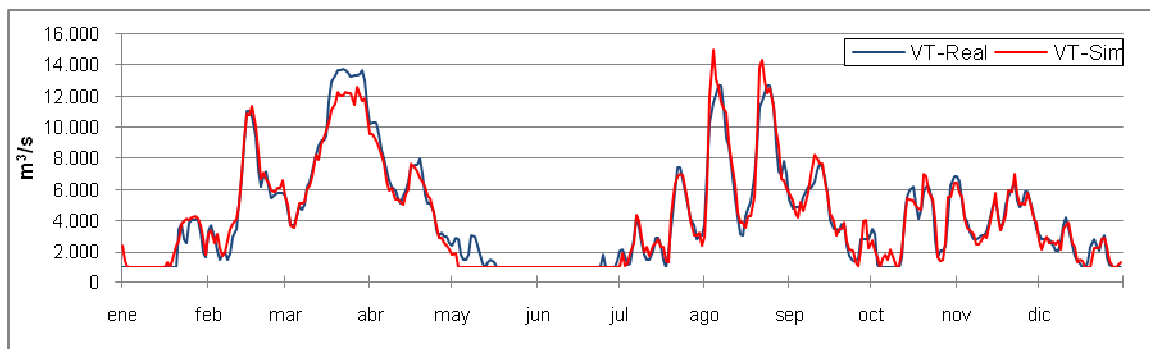


Figura 9. Vertimiento total de la CHY. Comparación de los valores reales vs simulado.

Para la producción de energía eléctrica, la CHY depende de los caudales afluentes; estos a su vez provienen de las diversas usinas aguas arriba y de las cuencas que componen el Rio Paraná. Los valores de generación diaria en la CHY están sujetos a maniobras en tiempo real.

La Fig. 10, presenta el comportamiento de la energía bruta diaria para los casos real y simulado. Las decisiones adoptadas en la operación horaria, tales como las variaciones de demanda, los trabajos de mantenimientos, salidas de líneas y de maquinas, etc.; hacen que los resultados obtenidos por el simulador presenten algunas diferencias. Estas diferencias se deben en gran medida a que el simulador utiliza una discretización diaria para el cálculo de las ecuaciones diferenciales que contiene el modelo, esto a su vez genera que todos los resultados estén en valores diarios.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

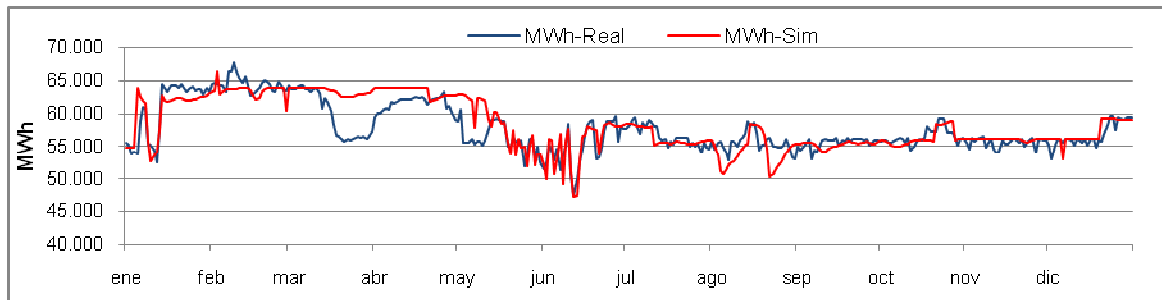


Figura 10. Energía bruta diaria de la CHY. Comparación de los valores reales vs simulado.

La diferencia del caso real y simulado, comparado en forma puntual da una sensación de divergencia, pero considerando los valores medios a un intervalo de tiempo mayor, dan señales de un comportamiento consistente que genera resultados muy próximos al de la operación real.

A fin de comprobar la factibilidad del uso del modelo, son presentados las figuras 11,12 y 13. En estas figuras es posible apreciar el grado de exactitud que puede obtener el simulador, observándolos desde distintas ópticas del funcionamiento de la CHY.

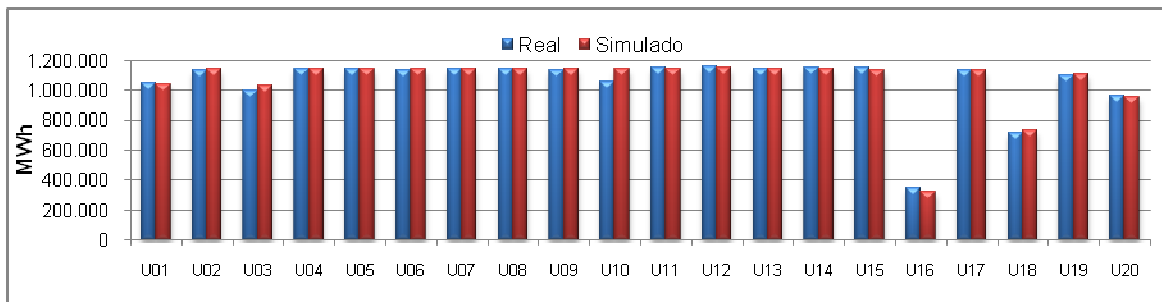


Figura 11. Energía producida por cada grupo generador de la CHY.

Para la Fig. 11, se puede apreciar la energía producida por cada grupo generador durante el año 2011, desde la unidad U01 hasta la U20, para esto fueron incluidas las informaciones de los programas de mantenimiento para cada unidad. La Fig. 11 presenta claramente el alto grado de similitud entre el caso real y el simulado.

En nuestro siguiente análisis se encuentra la Fig. 12, donde en este caso es posible observar la evolución mensual de la energía bruta generada. El alto grado de similitud también se verifica para este caso, que además cuenta con los valores registrados reales y simulados, a fin de que el lector pueda apreciar la similitud de los resultados.

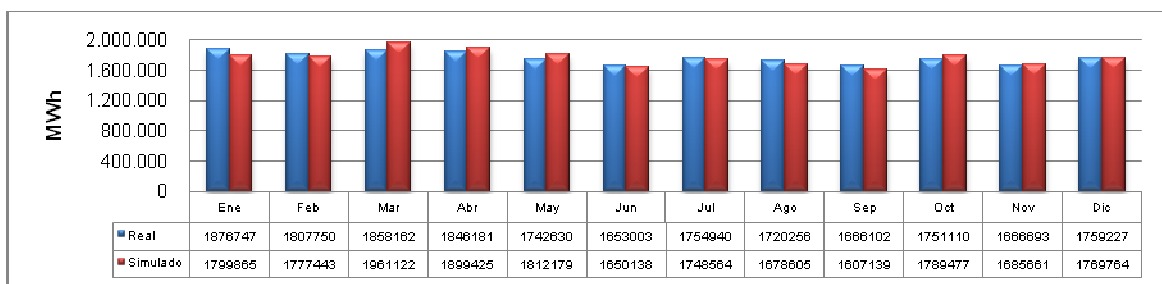


Figura 12. Energía bruta generada. Evolución mensual de la generación durante 2011.

Finalmente tenemos la Fig. 13, esta figura simplemente ilustra el comportamiento de energía bruta generada acumulada durante el periodo 2011. Esta figura conjuntamente con las figuras 10 y 11 dan una idea acabada del desempeño del simulador utilizado.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

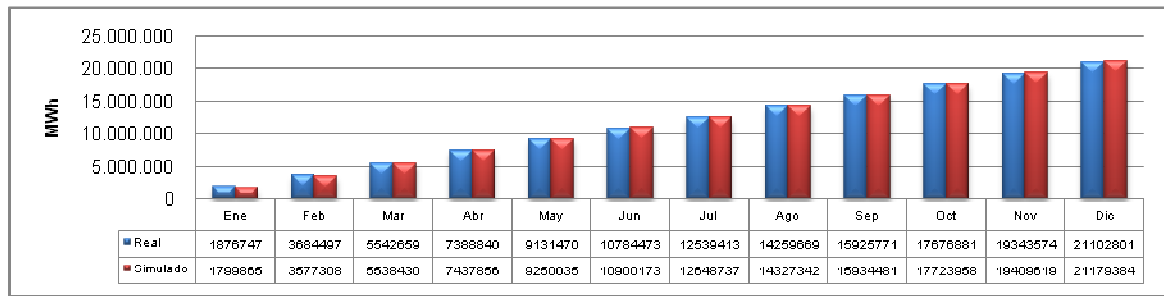


Figura 13. Evolución de la energía bruta generada en 2011.

7. Conclusiones

Con base en los resultados, de los ensayos de sensibilidad y de políticas, se puede afirmar que los productos obtenidos son similares a los datos reales; o sea, se puede afirmar que los resultados suministrados por el modelo son consistentes y robustos. Por lo tanto, en cuanto al desarrollo y aplicación del modelo computacional mediante las técnicas de dinámicas de sistemas, a la operación energética de la CHY, permite concluir que:

- Es factible simular la operación de Central para condiciones futuras, desde una cota inicial a la cota esperada de operación.
- Con la calibración y ajustes necesarios, será posible simular el comportamiento de la Central ante distintos escenarios hidrológicos e inclusive proyectar la generación hidroeléctrica para periodos desde corto a largo plazo.
- Debido a la estructura modular del modelo, es posible el desarrollado de un modulo de operación para la Central Hidroeléctrica de Aña Cuá (CHAC) y de las unidades adicionales para la Central Hidroeléctrica de Yacyretá. Todos estos modelos podrían ser integrados para la simulación de la operación integral futura de la CHY.

Finalmente, una vez consolidado el modelo de simulación, el mismo puede ser utilizado como un instrumento de análisis, planificación y de adiestramiento.

8. Referencias

- [1]. ARCE S. A. Un Modelo de Otimização do Despacho de Máquinas em Usinas Hidrelétricas. Tesis de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 1999
- [2]. CARDOZO C.M. Operação de Sistemas Hidroelétricos em Ambiente Competitivo: Uma Abordagem Da Gestão Empresarial Via Simulação Estocástica e Dinâmica de Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2000
- [3]. FORTUNATO L. A., et al. Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, Centrais Elétricas Brasileiras. Universidade Federal Fluminense. 1990.
- [4]. Explotación de la Central. Informe mensual .Entidad Binacional Yacyretá.. Dpto. Técnico. Movimiento de energía. Diciembre de 2011.
- [5]. Datos Técnicos. Entidad Binacional Yacyretá.
http://www.eby.gov.py/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=86
- [6]. Entidad Binacional Yacyretá. Manual de operación y mantenimiento-Volumen 2. 1998
- [7]. Google-maps. 2011 - <http://maps.google.com.py/maps?hl=es&tab=wl> .
- [8]. Matlab. SimPowerSystems. User's Guide. Hydro-Québec. 2003