



Modelo de Simulación de la Operación de la Central Hidroeléctrica Yacyretá

María E. Barrios B.,¹ María L. Pérez D.,¹ Anastacio S. Arce E.²

(1) Universidad Nacional del Este – Facultad Politécnica

(2) Itaipu Binacional

Paraguay

RESUMEN

La principal fuente de suministro de energía eléctrica del Sistema Eléctrico Paraguayo es de origen hidroeléctrico, siendo una de las principales, la Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY), cuya capacidad instalada es de 3.200 MW distribuida en 20 unidades generadoras. Actualmente, en la Central Hidroeléctrica Yacyretá se encuentra en desarrollo un proyecto de ampliación de la capacidad instalada sobre el Brazo Principal (BP) y la maquinización de la presa sobre el Brazo Aña Cuá (BAC). La ampliación de la capacidad instalada traerá consigo la necesidad de una buena gestión del programa de mantenimiento de las unidades generadoras, de modo a maximizar la transformación de los caudales afluentes en energía eléctrica.

Considerando dicho proyecto, este trabajo propone la implementación de un modelo de simulación de operación de la central, que lleva en cuenta las características técnicas de las unidades generadoras, límites operativos de la central y otras restricciones relacionadas al medio ambiente. Los estudios de simulación permitirán evaluar los beneficios que traerá consigo la ampliación de la capacidad instalada, identificar la mejor estrategia que maximice la producción de la Central Hidroeléctrica Yacyretá, la cual es de vital importancia para un mejor aprovechamiento hidroenergético.

Dicho modelo se desarrolla a través del análisis de datos técnicos, tales como, polinomios cota versus volumen, polinomio cota versus caudal, curva colina de las unidades generadoras, límites operativos de la central y del embalse, serie histórica de caudales afluentes registrado desde el año 1901 hasta el 2017 de forma mensual. Este modelo permite ejecutar simulaciones de la central operando como central de pasada. Así también evaluar la producción con diferentes programas de mantenimiento de unidades generadoras, identificando la mejor estrategia que maximice la producción.

PALABRAS CLAVES

Modelo de simulación, operación, programa de mantenimiento.

1. MODELO DE SIMULACIÓN

Considerando que Yacyretá, básicamente es una central de pasada, y que el canal de fuga del BP depende de la efluencia en el BAC, el aprovechamiento correcto de los caudales afluentes consiste en determinar los valores de caudales a ser turbinado y vertidos tanto en el BP como también en el BAC. Para el efecto fue desarrollado un modelo que busca maximizar la producción energética, a través de la distribución óptima de los caudales afluentes al embalse, determinando los volúmenes a ser turbinados y vertidos tanto en el BP como en el BAC. Los resultados obtenidos por la aplicación del modelo de optimización para diferentes valores de caudales afluentes al embalse fueron adoptados como la regla óptima de operación de la central e incorporado al modelo de simulación.

1.1 Análisis de la Operación Hidroenergética

El análisis fue realizado con los resultados obtenidos por el simulador que considera todas las características físicas y operativas de la CHY. Dicho simulador permite el ingreso de los datos de afluencias, para así realizar la simulación de la operación de la central. El simulador define a partir de la regla de operación óptima, en función a la afluencia los valores de caudal turbinado y vertido, tanto del BP como del BAC, este busca atender todas las restricciones operacionales del embalse y de los equipos.

La simulación de la operación fue realizada tomando como referencia el histórico de caudales afluentes de la CHY, con el objetivo de evaluar los beneficios energéticos asociados a la ampliación de la capacidad instalada de la misma [1], de modo a maximizar la transformación de los recursos hídricos en energía eléctrica, además esta simulación fue realizada considerando la operación, de dieciocho unidades generadoras por mes en el BP y de tres unidades generadoras por mes en el BAC.

1.2 Resultados de la simulación

Los resultados obtenidos de la simulación permiten visualizar la producción hidroeléctrica en diferentes escenarios hidrológicos contenidos en la serie histórica de caudales. Para un mejor análisis se realiza la comparación de los valores obtenidos en la simulación con los valores reales registrados en la CHY. En la **Figura 1**, se puede observar la curva de la potencia media mensual resultado de la simulación, en comparación con la curva de los valores de potencia real verificada del histórico de la central [2]. Se puede verificar efectivamente el aumento de la potencia como resultado de la aplicación de la regla óptima de operación y con la maquinización del BAC. Se observa también la diferencia entre la curva de la energía media mensual resultado de la simulación y la curva de los valores de energía reales generados por la CHY [2]. El aumento de la generación de la energía se atribuye a la aplicación de la regla óptima de operación y a la maquinización del BAC.

En la **Figura 2**, se verifican las descargas en el BP, con una notable disminución de la descarga como resultado de la simulación. La disminución de la descarga se debe fundamentalmente a la distribución óptima de las efluencias para maximizar la producción, esto implica en la mayoría de los casos los vertimientos se dan en el BAC [2].

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

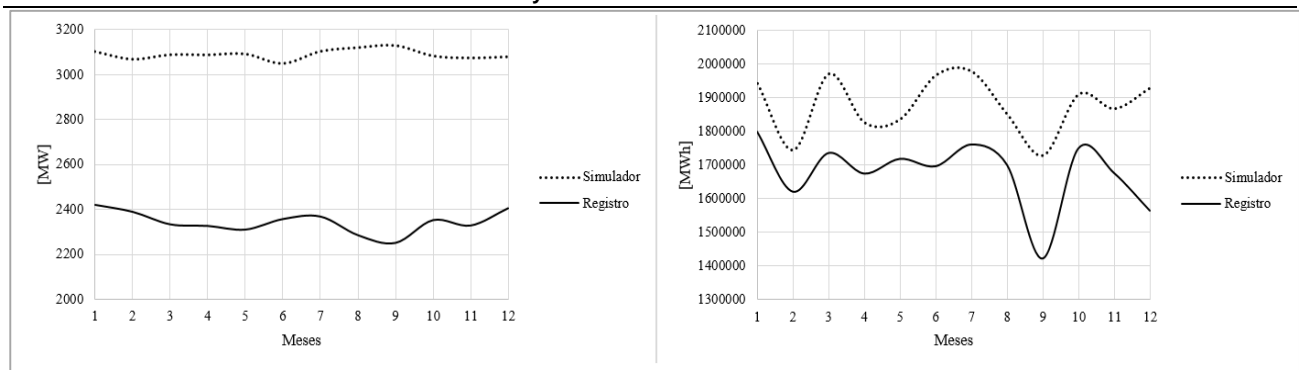


Figura 1: A la izquierda comparación de curvas de Potencia de la CHY, a la derecha comparación de curvas de Energía de la CHY.

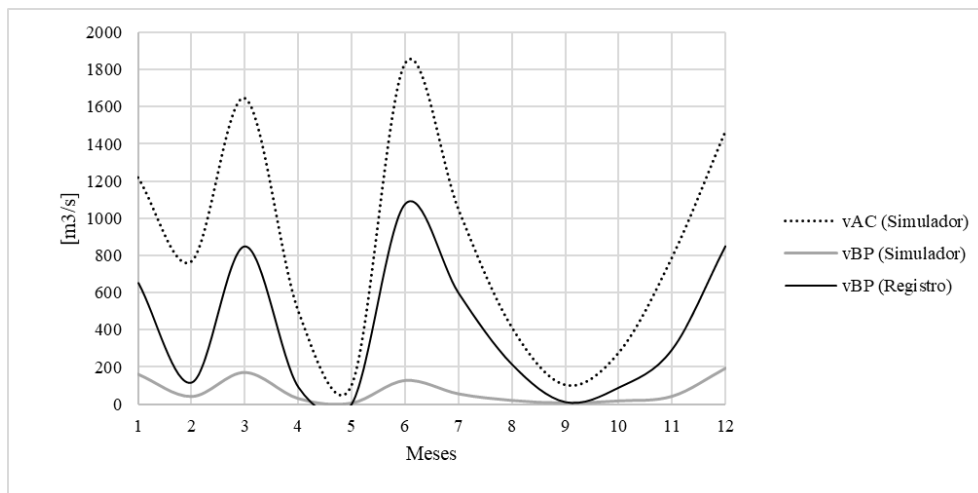


Figura 2: Comparación de curvas de Vertimiento Brazo Aña Cuá de la CHY.

2. PROGRAMA DE PARADAS PARA MANTENIMIENTO

La obtención de un plan óptimo de paradas de unidades generadoras para mantenimiento en una central hidroeléctrica, es una de las estrategias más importantes para el diseño de calendario de producción. Esto, porque diferentes calendarios de mantenimiento llevarán a distintos niveles de generación [3].

De modo a identificar la mejor estrategia que maximice la producción, se analizan los efectos en la producción energética de la CHY con la adopción de distintos programas de mantenimiento de unidades generadoras.

1.3 Análisis de la influencia del comportamiento del recurso hídrico sobre la generación de energía

Para maximizar la producción de energía, del planteamiento anterior se deduce, que esto se conseguirá aumentando la producción en los meses húmedos colocando la mayor cantidad de unidades generadoras en operación y postergando los servicios de mantenimiento de las mismas para los meses más secos. Con el fin de definir los distintos periodos hidrológicos y el impacto de estos en la operación de la Central Hidroeléctrica, se analiza la operación hidroenergética de la central simulando durante todo el registro histórico de caudales afluentes. En la **Figura 3** se observa el promedio mensual de caudales afluentes del registro histórico de Yacyretá, desde el año 1904 a 2017. Se constata que el caudal afluente sufre una disminución en los meses secos de junio a noviembre.

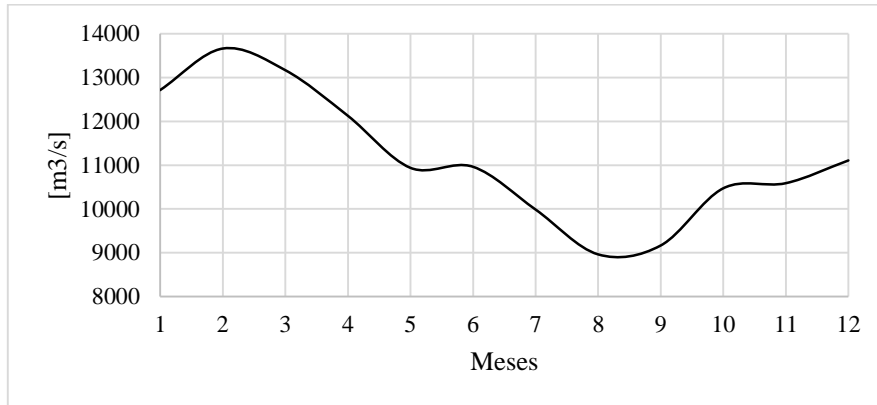


Figura 3: Curva del registro histórico de afluencias de la Central Hidroeléctrica Yacyretá.

En lo que respecta a la determinación de los periodos hidrológicos, con los resultados de la simulación mencionados anteriormente, se realizaron análisis de frecuencias empleando las curvas de permanencia de la energía generada para cada uno de los meses del registro histórico. En la **Figura 4**, se presenta la curva de permanencia de la generación media de los diferentes meses. Verificándose también una disminución de la generación en los meses secos, de junio a noviembre.

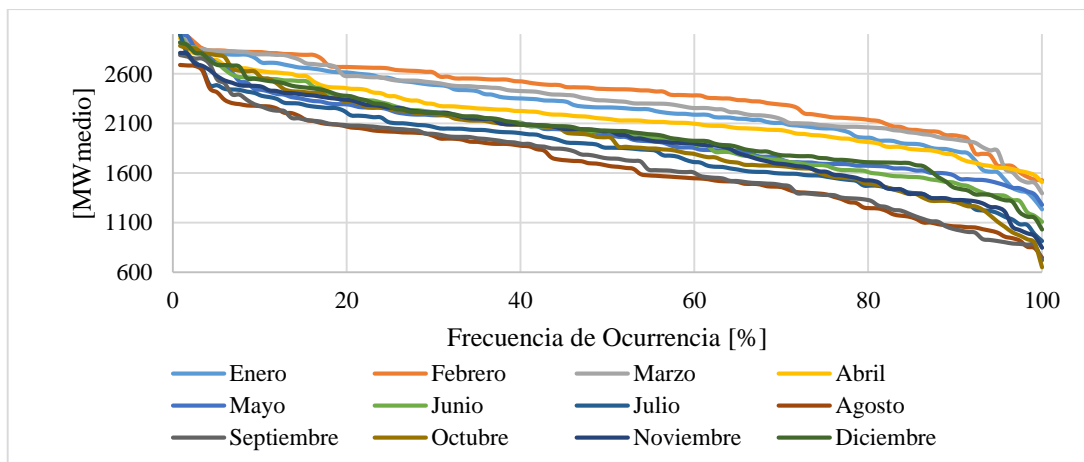


Figura 4: Curva de permanencia de la Energía media mensual.

En la **Figura 4**, el valor porcentual representa el porcentaje de tiempo que puede ser generada una determinada potencia para todos los escenarios analizados, cuanto mayor porcentaje indica una mayor posibilidad de generar esa energía. La energía garantizada es aquella que puede ser generada durante el 95% del tiempo del registro histórico de caudales [4].

Los valores resultantes de la energía media de la curva de permanencia para el 95% de la frecuencia, son presentados en la **Tabla I**, también se presenta el valor de la potencia promedio disponible por unidad generadora y es calculado el número de unidades generadoras necesarias para atender esa generación. Estos resultados son obtenidos de la simulación con 18 unidades en operación por mes en el BP.

Tabla I: Resultados del 95% de la curva de permanencia.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
Energía	1608	1678	1826	1653	1500	1379	1198	999	915	1112	1253	1348
Pot por UG.	157	157	157	157	158	156	156	158	158	156	157	158
Mínimo Nro UG.	10	11	12	11	10	9	8	6	6	7	8	9

A su vez se verifica, que en el periodo seco de junio a noviembre con un número menor de unidades generadoras en operación es posible la producción de la energía necesaria, por lo cual resulta conveniente establecer un programa de paradas para mantenimiento que contemple un mayor número de unidades generadoras en operación en los meses húmedos y posponer las paradas de las unidades generadoras para los meses secos.

1.4 Estudio de casos

En virtud al análisis anterior fueron generados cuatro programas de paradas de unidades para mantenimiento con el objetivo de simular y verificar el impacto de estos programas en la generación del BP y tres programas de paradas de unidades para el BAC; y así evaluar la mejor estrategia que maximiza la transformación de los caudales afluentes en energía eléctrica. En base a esto, se presenta un resumen de cada caso analizado para el BP y el BAC respectivamente, donde las **Tablas II y III** muestran la cantidad de máquinas en operación para cada mes de los distintos programas y el número total de máquinas paradas al año.

Tabla II: Programas de paradas Brazo Principal.

	Programa de paradas de unidades generadoras												Total máquinas paradas al año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	
Programa 1	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	24
Programa 2	20	20	20	20	20	17	16	13	14	16	20	20	24
Programa 3	19	20	20	18	18	18	18	16	16	17	18	18	24
Programa 4	19	19	19	19	18	18	18	16	16	17	18	19	24

Tabla III: Programas de paradas Brazo Aña Cuá.

	Programa de paradas de unidades generadoras											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Programa 1	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3
Programa 2	3	3	3	3	3	3	2	1	1	2	3	3
Programa 3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3

1.5 Resultados de los distintos programas

A través de los resultados obtenidos de la simulación de los distintos programas de paradas de unidades generadoras, son definidas estrategias que buscan maximizar la producción energética y asegurar el cumplimiento del programa de paradas de unidades generadoras para mantenimiento, observando el periodo más beneficioso para la desconexión de las unidades generadoras.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

A seguir las comparaciones de los resultados de los diferentes programas de paradas para mantenimiento, en donde se puede apreciar que la Central Hidroeléctrica Yacyretá no sufre alteraciones significativas en la generación operando con menor cantidad de unidades generadoras en los meses secos de junio a noviembre.

Tabla IV: Resultados de los distintos programas de paradas de Potencia Brazo Principal en MW.

CASOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL AÑO
Programa 1	2840	2823	2832	2852	2889	2886	2909	2931	2926	2897	2889	2881	34553
Programa 2	3155	3136	3146	3169	3210	2726	2586	2117	2276	2575	3210	3201	34506
Programa 3	2998	3136	3146	2852	2889	2886	2909	2833	2828	2736	2889	2881	34982
Programa 4	2998	2980	2989	3010	2889	2886	2909	2605	2601	2736	2889	3041	34531

Tabla V: Resultados de los distintos programas de paradas de Energía Brazo Principal.

CASOS	ENERGÍA MEDIA MENSUAL [MW _{medio}]												TOTAL AÑO [MWh]
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Programa 1	2256	2397	2324	2171	1995	1995	1846	1683	1714	1915	1934	2016	18039024
Programa 2	2266	2417	2339	2176	2003	1988	1837	1630	1676	1889	1935	2021	17987688
Programa 3	2264	2417	2339	2171	1995	1995	1846	1677	1704	1905	1934	2016	18051672
Programa 4	2264	2414	2337	2174	1995	1995	1846	1676	1702	1905	1934	2020	18050928

Tabla VI: Resultados de los distintos programas de paradas de Vertimiento Brazo Principal en m³/s.

CASOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL AÑO
Programa 1	94	177	138	53	59	68	35	6	9	53	23	49	763
Programa 2	43	67	54	27	18	106	86	309	231	201	16	20	1179
Programa 3	51	65	52	53	58	66	33	38	68	108	23	49	663
Programa 4	51	87	67	34	58	68	35	47	83	108	23	27	687

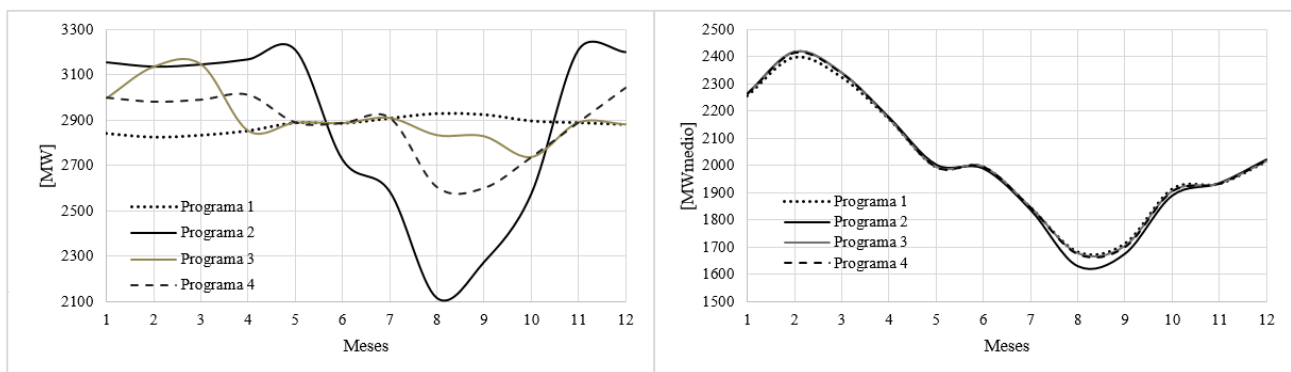


Figura 5: A la izquierda resultados de la simulación de Potencia Brazo Principal, a la derecha resultados de Energía Brazo Principal.

Tabla VII: Resultados de los distintos programas de paradas de Potencia Brazo Aña Cuá en MW.

CASOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	TOTAL AÑO
Programa 1	268	263	266	271	273	272	274	92	92	272	273	272	2887
Programa 2	268	263	266	271	273	272	183	92	92	182	273	272	2705
Programa 3	268	263	266	271	273	272	274	184	183	272	273	272	3071

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Tabla VIII: Resultados de los distintos programas de paradas de Energía Brazo Aña Cuá.

CASOS	ENERGÍA MEDIA MENSUAL [MW _{medio}]												TOTAL AÑO [MWh]
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Programa 1	265	263	265	270	269	264	258	92	91	256	257	263	2053619
Programa 2	265	263	265	270	269	264	182	92	91	181	257	263	1941783
Programa 3	265	263	265	270	269	264	258	183	183	256	257	263	2187527

Tabla IX: Resultados de los distintos programas de paradas de Vertimiento Brazo Aña Cuá en m³/s.

CASOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL AÑO
Programa 1	2041	2966	2429	1372	1037	1121	688	834	909	1006	810	1062	16273
Programa 2	2041	2966	2429	1372	1037	1121	942	834	909	1174	810	1062	16696
Programa 3	2041	2966	2429	1372	1037	1121	688	608	691	1006	810	1062	15829

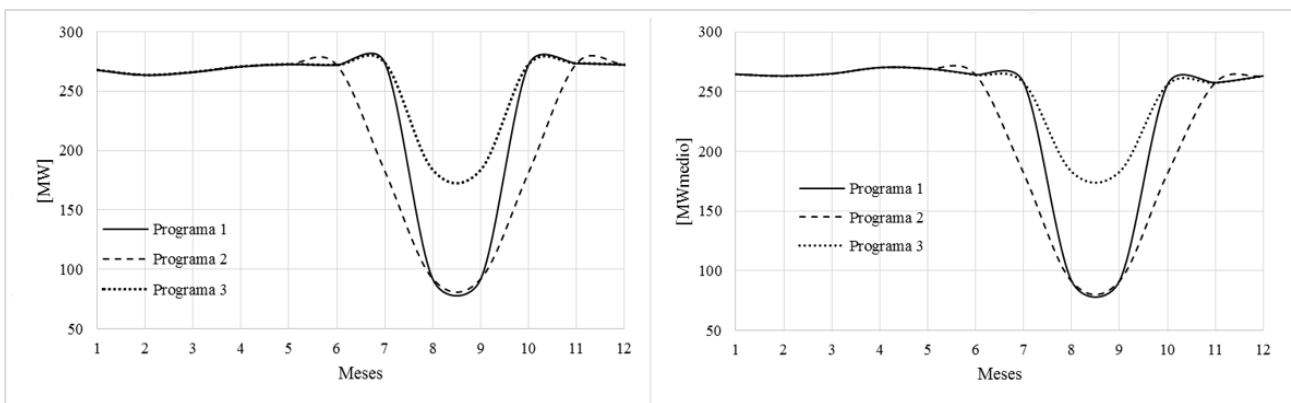


Figura 7: A la izquierda resultados de la simulación de Potencia Brazo Aña Cuá, a la derecha resultados de Energía Brazo Aña Cuá.

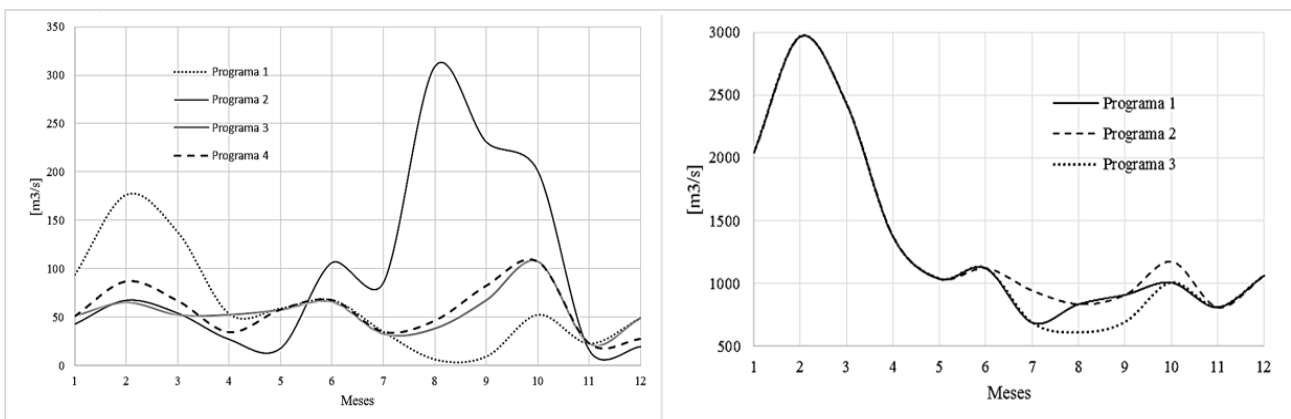


Figura 8: A la izquierda resultados de la simulación de Vertimiento Brazo Principal, a la derecha resultados de Vertimiento Brazo Aña Cuá.



CONCLUSIÓN

El modelo de simulación elaborado de la Central Hidroeléctrica Yacyretá permite el cálculo de la generación hidroenergética en conjunto tanto del Brazo Principal y el Brazo Aña Cuá para diferentes valores de caudales afluentes teniendo en cuenta todas las variables que influyen en ella y la evaluación de distintos programas de paradas para mantenimiento de unidades generadoras teniendo en cuenta el recurso hídrico disponible, definiendo así épocas del año donde parar mayor cantidad de unidades.

Los resultados obtenidos muestran que efectivamente la ampliación de la capacidad instalada de la central, traerá beneficios en cuanto a mayor generación, permitiendo el aprovechamiento de las descargas que son realizadas en el Brazo Aña Cuá. A su vez de los distintos programas de paradas analizados se encuentra que, en los periodos de baja afluencia de junio a septiembre, es factible operar con menos cantidad de unidades generadoras sin que existan variaciones significativas en términos de producción energética. El programa de paradas que mejores resultados ha obtenido, es decir de mayor potencia, mayor energía y menor vertimiento, es el programa 3 en ambos casos analizados, tanto para el Brazo Principal como para el Brazo Aña Cuá.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Entidad Binacional Yacyretá pone en marcha proyecto para maquinizar Aña Cuá. Información disponible en: <http://www.eby.gov.py/index.php/7950-eby-pone-en-mercha-proyecto-para-maquinizar-ana-cua>
- [2] Estadística desde la puesta en marcha de la Central Hidroeléctrica Yacyretá en 1994. Información disponible en: <http://www.eby.org.ar/index.php/generacion>
- [3] A. D. Cabo Devila Medina, V. E. Ortiz Román, A. S. Arce Encina, R. J. García Ramírez, “Análisis del Programa de Mantenimiento de Unidades Generadoras considerando la disponibilidad hidroenergética”, en X Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo – CIGRÉ, 2012.
- [4] A. S. Arce Encina, “Despacho ótimo de unidade geradoras em sistemas hidrelétricos via heurística baseada em relaxação lagrangeana e programação dinâmica”, Tese doutoral, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, Sao Paulo, Brasil, 2006.