

Evaluación Energética del Aprovechamiento Hidroeléctrico Tayucay

María Carolina León De D`Alessandro / EDELCA - Venezuela

maleon@edelca.com.ve

Artículo destacado entre los presentados en el Seminario Internacional sobre Represas y Operación de Embalses, realizado en Puerto Iguazú, Argentina del 30 de Setiembre al 2 de Octubre de 2004

Índice

1. Introducción
2. Ubicación y características generales de la Cuenca
3. Características hidráulicas
4. Sistema integrado Bajo Caroní - Tayucay
5. Conclusiones
6. Lecciones aprendidas
7. Recomendaciones

RESUMEN

El aprovechamiento hidroeléctrico Tayucay se encuentra ubicado aguas arriba de las centrales del Bajo Caroní, que incluyen Guri, con una potencia instalada de 10.000 MW, Macagua con 2.930 MW, Caruachi con 2.196 MW y Tocomá, actualmente en construcción, con 2.160 MW. Para Tayucay, en etapa de estudio, se han estimado 2.450 MW, concebidos con un embalse a filo de agua.

Tayucay se localiza en una zona con figuras territoriales que presentan regímenes especiales de conservación, como el parque nacional Canaima, cuya principal belleza escénica se encuentra sobre el río Carrao.

Éste, afluente del Caroní, tiene su desembocadura 60 km. aguas arriba del sitio de presa. La factibilidad ambiental del desarrollo está asociada a la premisa que

establece que el efecto del embalse de Tayucay no debe afectar el perfil hidráulico del Carrao. Este río, en el tramo comprendido entre la Laguna de Canaima y la confluencia con el río Caroní presenta numerosas caídas y raudales, que actúan como controles hidráulicos del flujo. Un estudio hidráulico preliminar concluye que para un nivel de operación de 360 msnm el río Carrao no se ve afectado por el reservorio. A este nivel el embalse de Tayucay presenta poca capacidad de regulación, volumen útil igual al 3% del volumen escurrido medio anual del río.

Basados en un mercado de diferenciación del precio de la energía firme y secundaria, el objetivo del estudio es evaluar la operación de la central hidroeléctrica en conjunto con las del Bajo Caroní de manera de maximizar la Energía Firme del aprovechamiento.

Para esta evaluación se ha utilizado un modelo matemático que ha sido adaptado para considerar las centrales a filo de agua, tanto aguas abajo como aguas arriba del embalse regulador, el cual establece una regla de operación en base a la maximización de la Energía Firme del conjunto.

Bajo esta regla de operación se demuestra que la central hidroeléctrica Tayucay aportaría al sistema interconectado nacional una energía firme de 8.700 GWh/año y 12.300 GWh/año de energía media.

Este resultado le permite a EDELCA evaluar los flujos de caja por la venta de energía y decidir, con base en los costos preliminares de la obra, si su construcción futura agregaría valor a la empresa.

1. Introducción

EDELCA, empresa dedicada al desarrollo hidroeléctrico del río Caroní, cumple con el rol de suplidor de energía eléctrica en forma confiable y segura, entregando más del 65% de las necesidades del mercado venezolano.

Debido a la magnitud y al peso de la generación del Caroní dentro del sector eléctrico nacional, se requiere conocer la garantía de su energía, diferenciándola en Energía Firme y Secundaria.

Con base en el estudio del ciclo hidrológico a lo largo de 54 años de registros, para EDELCA la Energía Firme de un aprovechamiento hidroeléctrico es aquella que se puede garantizar en forma continua, calculada sobre la base de los caudales históricos.

El área de influencia de los proyectos del Alto Caroní se encuentra regulada por figuras jurídicas con regímenes especiales de conservación, que condicionan los aprovechamientos desde el punto de vista ambiental y obligan a una solución integrada.

Basados en una diferenciación del precio de la energía firme y secundaria, el objetivo del estudio es evaluar la operación de la central hidroeléctrica Tayucay en conjunto con el Bajo Caroní, con el propósito de maximizar la Energía Firme del aprovechamiento y alcanzar su factibilidad técnica y económica dentro del marco ambiental.

2. Ubicación y Características Generales de La Cuenca

La cuenca del río Caroní se encuentra al sureste de Venezuela, en el estado Bolívar. Posee un área aproximada de 95.000 km² y está dividida en dos grandes sectores, el Alto Caroní, que comprende el tramo desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Paragua, y el Bajo Caroní, constituido por el tramo restante hasta su desembocadura en el río Orinoco.

El aprovechamiento hidroeléctrico Tayucay, uno de los posibles desarrollos del Alto Caroní, se localiza aproximadamente a 130 km aguas arriba de la central hidroeléctrica de Guri.

Geográficamente el sitio de presa se ubica a 6°41'23" de latitud norte y 62°49'15" de longitud oeste. La superficie

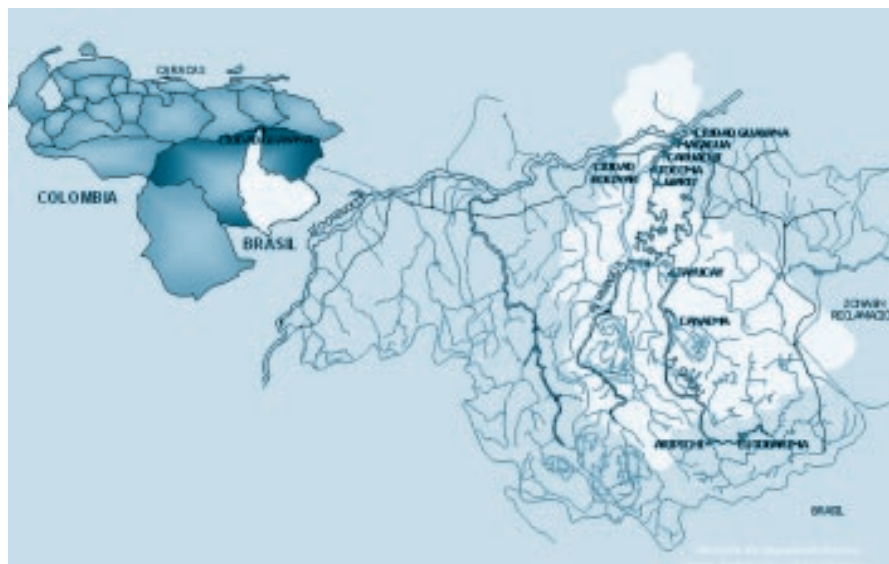


Figura 1. Ubicación relativa de la cuenca del río Caroní dentro del territorio venezolano

de la cuenca hasta el sitio de presa ocupa tres figuras jurídicas principales: La Reserva Forestal de La Paragua, la Zona Protectora Sur del Estado Bolívar y El Parque Nacional Canaima.

3. Características Hidráulicas

La cuenca tributaria hasta el sitio de presa Tayucay es de aproximadamente 43.264 km² y presenta un caudal medio anual de 2.300 m³/s.

El nivel de operación del reservorio está asociado a la premisa ambiental que establece que el efecto del embalse no debe afectar al Parque Nacional Canaima, en particular el perfil hidráulico del río Carrao, aguas abajo del vertedero natural de la

Laguna de Canaima, sector de gran valor escénico.

Este tramo de río, de 20 km de longitud hasta la desembocadura en el río Caroní, presenta numerosas caídas y raudales que actúan como controles del flujo. El estudio preliminar del perfil hidráulico del río, realizado para las condiciones naturales y para distintos niveles del embalse de Tayucay, establece que para un nivel de operación de 360 msnm se cumple con la condición ambiental impuesta.

El cierre del río a esta cota conlleva a una presa de 83 metros de altura con lo cual, para un nivel de restitución promedio de 283 msnm, se dispone de una carga bruta de 77 metros.

A la cota 360 el embalse de Tayucay inunda un área aproximada de 150 km², su forma alargada sigue el valle del cauce del río Caroní y se extiende en una longitud de

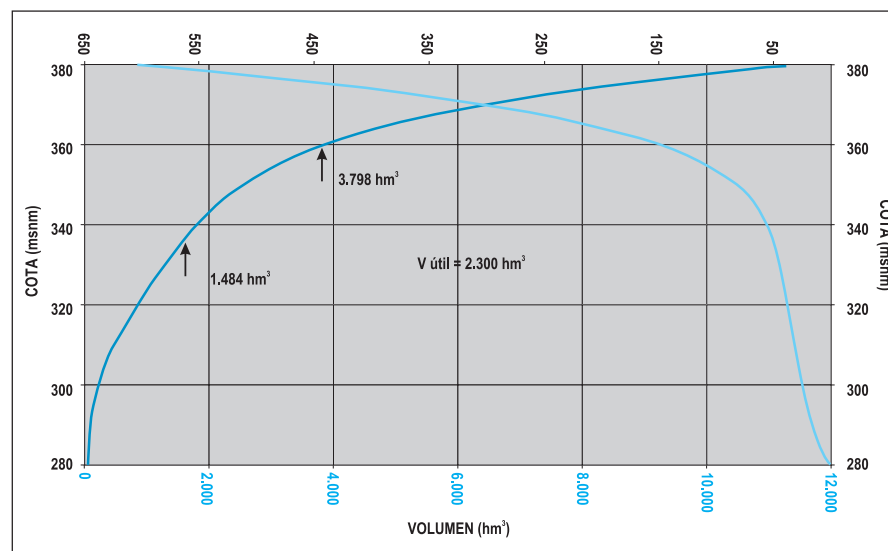


Figura 2.- Curva Altura - Área - Capacidad

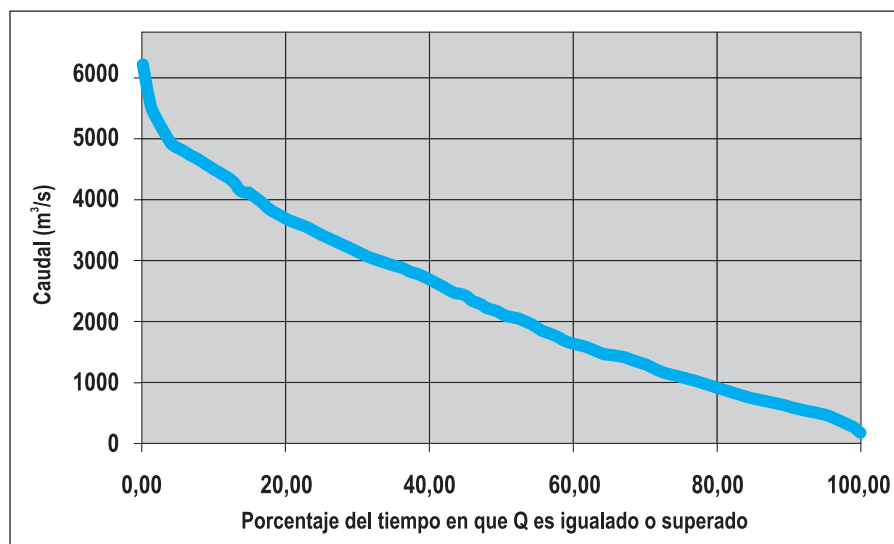


Figura 3.- Curva de Duración de Caudales. Sitio de presa Tayucay

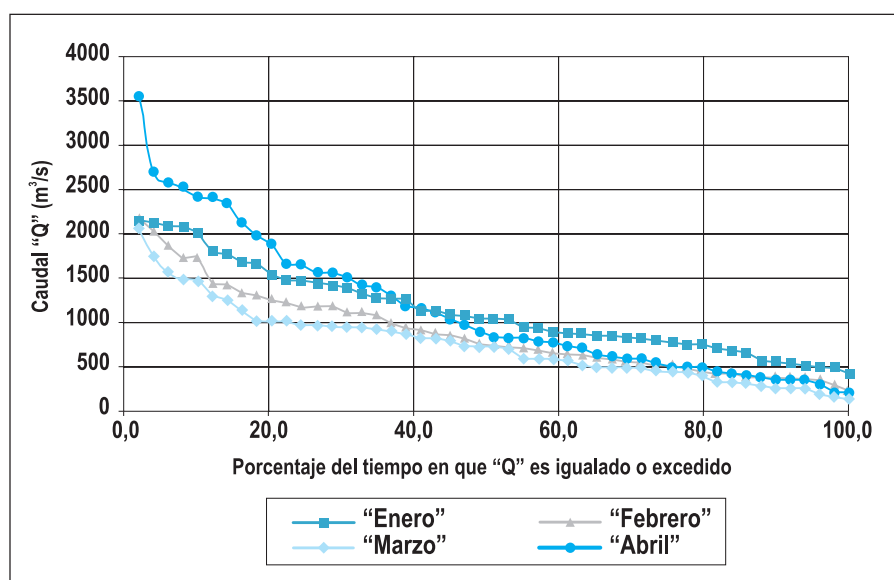


Figura 4.- Curva de Duración de Caudales. "Meses secos"

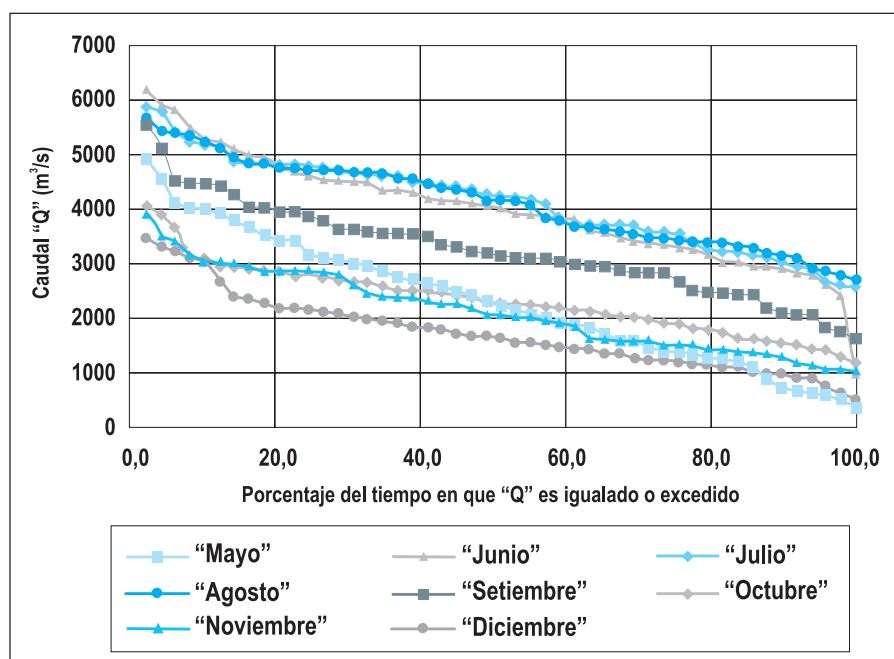


Figura 5.- Curva de Duración de Caudales. "Meses húmedos"

120 km. A este nivel, la capacidad de almacenamiento es de 3.798 hm³.

El Nivel Mínimo de Operación, fijado por el rango admisible de operación de las turbinas, se encuentra a 335 msnm. El volumen muerto, correspondiente al nivel de sedimentos en 100 años de vida útil del embalse, se ubica en la cota 303.

Con estos niveles característicos el reservorio dispone de un bajo efecto regulador del río. Si se analiza la curva Cota - Área - Capacidad, (figura 2) se observa que el volumen útil, como embalse, es de 2.314 hm³, lo cual representa 3.15% del volumen escurrido medio anual del río Caroní en este sector.

Esta reducida regulación se manifiesta en una producción de energía firme, que alcanza 2.800 GWh/año, con un caudal regulado de 475 m³/s.

Al analizar la curva de duración de gastos medios mensuales (figura 3), se observa que un caudal de 475 m³/s tiene una probabilidad de ocurrir o de ser superado del 94%. Esto indica que el embalse se mueve 25 metros para regular un caudal de esta ocurrencia, lo que adicionalmente representa pérdida en la altura neta de generación.

Por otra parte, la opción de no regular implica que la generación garantizada (95 % del tiempo) está asociada a un caudal de 425 m³/s. Con la variación de caudales que muestra la curva es posible una generación significativamente mayor en los meses de invierno con relación a los meses de verano, lo cual evidencia que en condiciones de no permanencia, se dispone de un volumen de agua importante para generar energía.

Al analizar en forma discreta la información de caudales mensuales y asignando probabilidad de ocurrencia a cada muestra de gastos se obtiene una mejor visión del comportamiento del río. Las figuras 4 y 5 presentan las curvas de duración de cada mes, agrupadas en períodos "seco" y "húmedo". La figura 6 presenta los caudales garantizados en cada mes asociados a una probabilidad de ocurrir o de ser superados de 50, 90, 95 y 100% (mínimos registrados).

A manera comparativa, se puede contar con caudales superiores a 1000 m³/s con una garantía mayor al 90% durante 7 meses al año.

Sobre la base de este volumen de agua garantizado, Tayucay puede ofrecer una cantidad significativa de energía segura al año, aunque variable mes a mes. La garan-

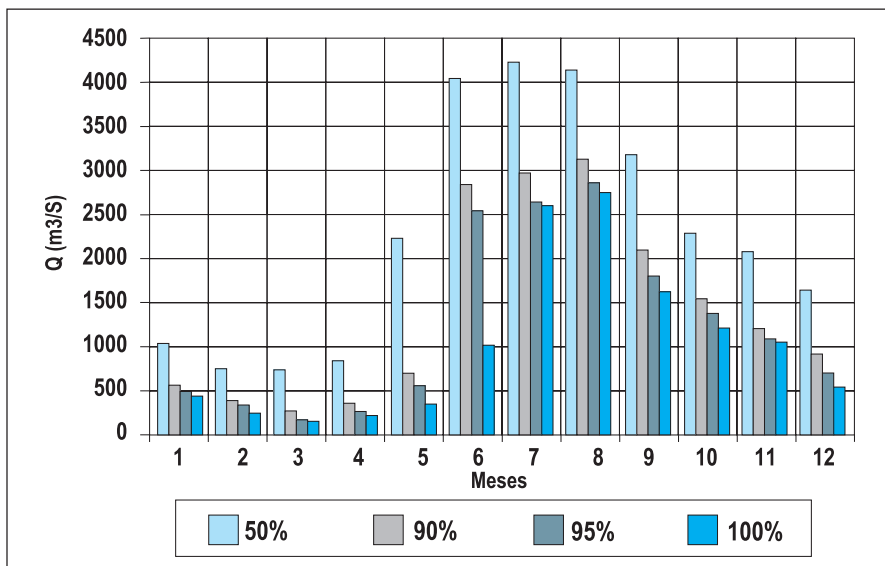


Figura 6.- Probabilidad de ocurrencia de Gastos

tía de estos caudales favorece la operación sin regulación, lo que se ha denominado aprovechamiento a “filo de agua”.

Para lograr un mejor uso de Tayucay operando como filo de agua, surge la opción de incorporar su generación al sistema Bajo Caroní, utilizando el embalse de Guri como regulador de la energía de Tayucay.

4. Sistema Integrado Bajo Caroní – Tayucay

Las centrales hidroeléctricas del Bajo Caroní, con excepción de Guri, son centrales sin capacidad de regulación, alimentadas por las descargas reguladas del embalse de Guri. Este sistema con regulación aguas arriba se opera en forma conjunta para maximizar la energía firme del sistema.

La opción de incorporar Tayucay a la generación del Bajo Caroní, surge bajo la hipótesis de aprovechar la capacidad de regulación de Guri para lograr el mejor uso de la generación aguas arriba. Básicamente, si Tayucay no cambia el patrón de caudales de entrada a Guri y genera una cantidad de energía segura mensual, esta energía puede agregarse estacional o mensualmente a la generación del Bajo Caroní, de forma que, al adaptar la operación de Guri y demás centrales a la disponibilidad de esta nueva energía garantizada, se maximice la energía firme del conjunto.

La evaluación energética del sistema integrado se realiza mediante un modelo matemático secuencial de operación de

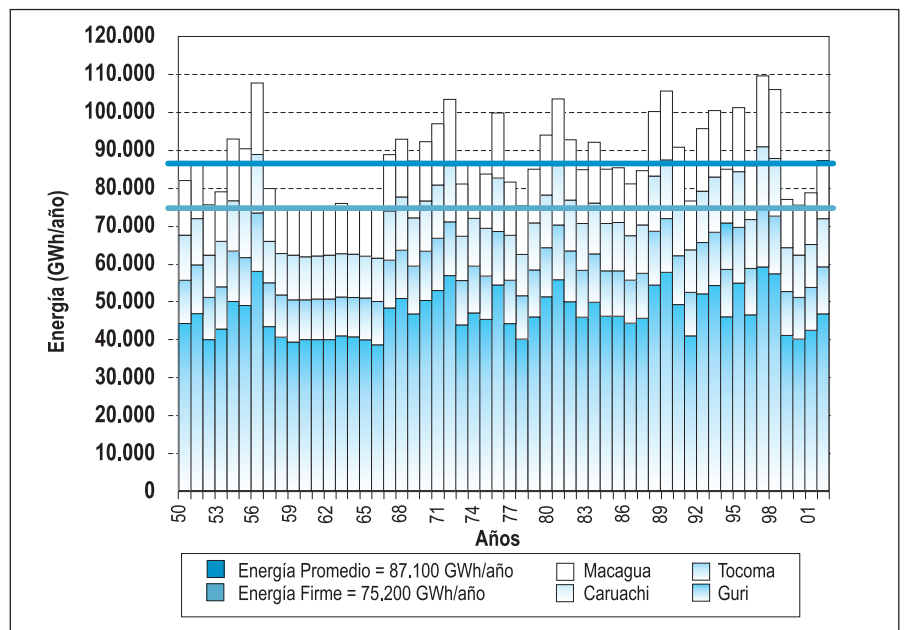


Figura 7.- Energía del Bajo Caroní

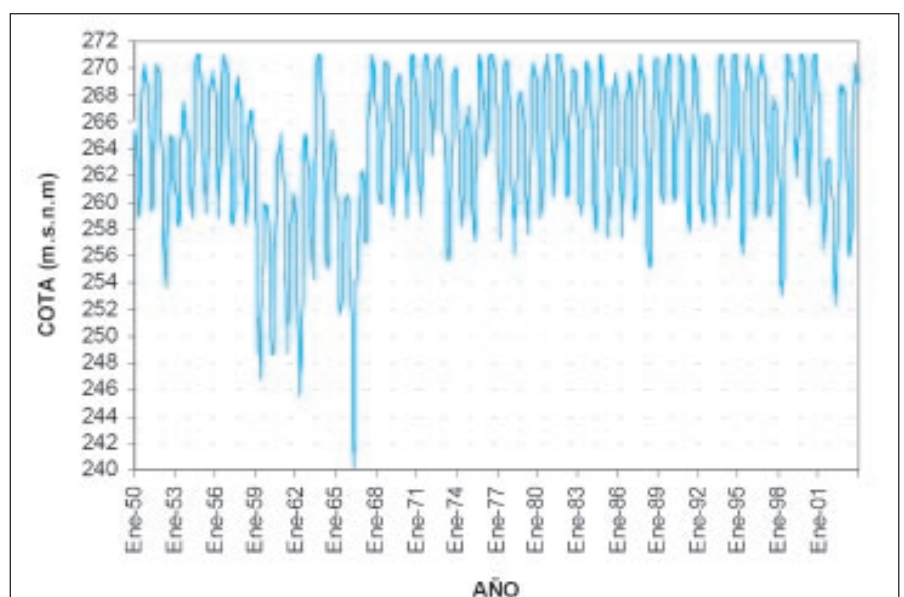


Figura 8. Niveles alcanzados en el embalse de Guri a lo largo de la simulación de 54 años de registros históricos

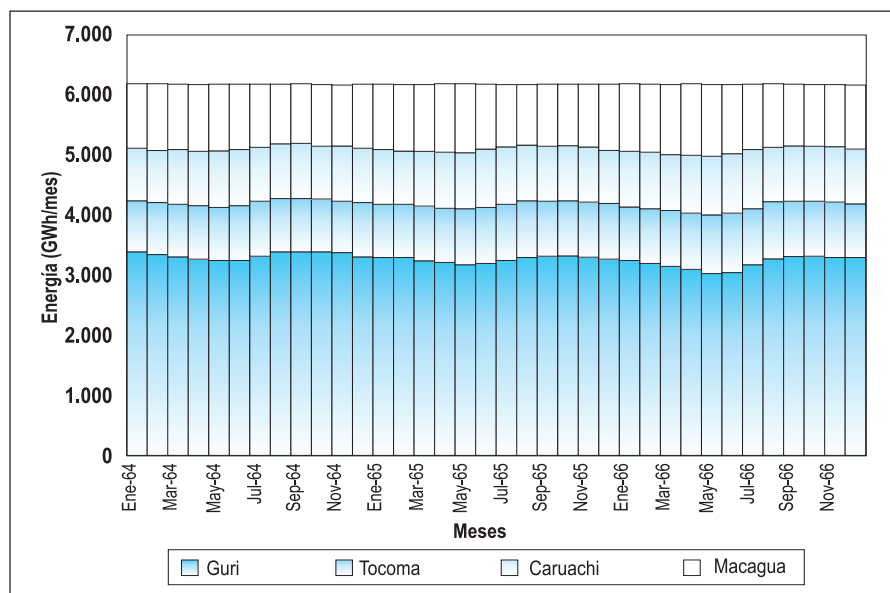


Figura 9.- Energía Firme del Bajo Caroní. Período 1964 – 1966

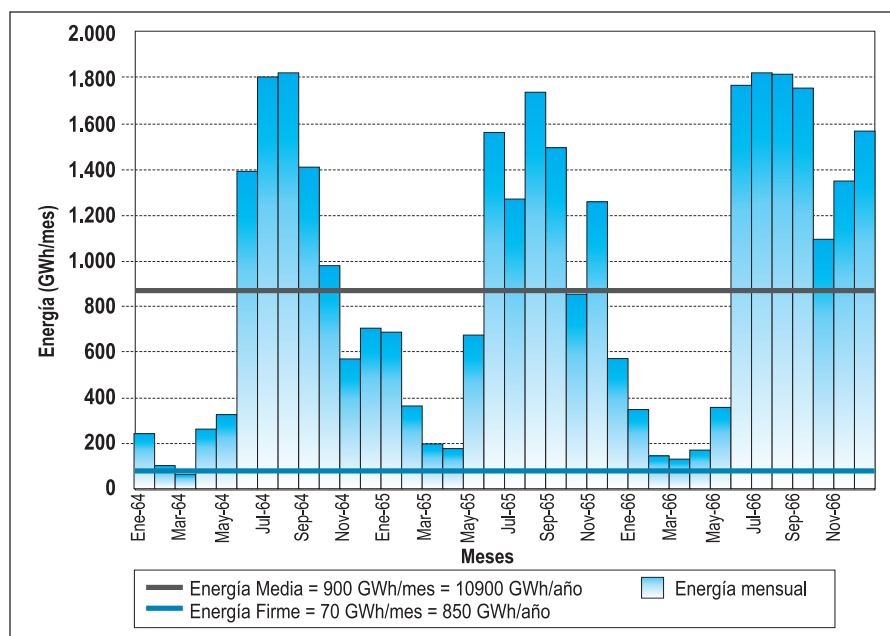


Figura 10.- Energía Firme Tayucay Filo de Agua – Operación Aislada. (Período 1964 – 1966)

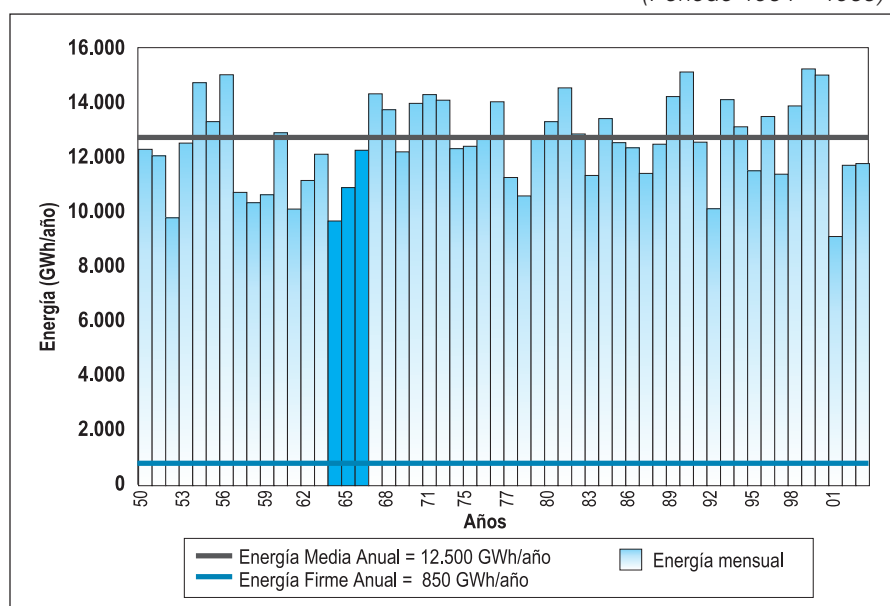


Figura 11.- Energía Media. Tayucay Filo de Agua-Operación Aislada

embalses, adaptado por EDELCA al Bajo Caroní. Éste determina la máxima energía firme que, de acuerdo a la serie de escurrimientos históricos, puede generar un aprovechamiento hidroeléctrico, operando en forma aislada o en conjunto con otras centrales. El modelo establece una regla de operación para el embalse regulador considerando su generación y la de las otras centrales y luego simula la operación del conjunto.

Para el período histórico 1950 – 2003 la energía promedio del Bajo Caroní es de 87.100 GWh/año, la cual se distribuye, de acuerdo a la operación conjunta de las cuatro centrales, como se muestra en la figura 7.

En la simulación se advierte un ciclo seco de aproximadamente 10 años, dentro de éste se encuentra el período crítico del embalse de Gurí (1964-1966). Al analizar los niveles alcanzados por el reservorio a lo largo de la simulación de los 54 años de registros históricos (figura 8), se observa que éste se mueve desde su cota máxima (sep.1963) hasta su cota mínima (may. 1966). Esta condición de uso total del volumen útil del embalse no se encuentra en ningún otro período de los años de registro, por lo tanto, con base en la serie histórica, se puede afirmar que éste es el período que fija la energía firme de Gurí y como consecuencia del Bajo Caroní. Por ello para fines de comparación entre central aislada en Tayucay e integrada al Bajo Caroní se usará este período histórico seco.

La Energía Firme del Bajo Caroní es de 75.200 GWh/año, lo cual representa una producción mensual de 6.180 GWh. La figura 9 muestra la distribución de la generación de esta energía mensual en el período crítico del conjunto.

En la simulación de la operación de la central hidroeléctrica Tayucay, a filo de agua y en forma aislada a lo largo del período histórico, puede observarse, en el lapso 1964 – 1966, que la variación de caudales entre el verano y el invierno permite disponer de una energía promedio de 10.900 GWh/año. Sin embargo, bajo el concepto de energía firme, tan solo se cuenta con 850 GWh/año, asociados al mes de menor producción (figura 10)

La figura 11 muestra la generación a lo largo del período histórico. En ella se advierte la capacidad generación del aprovechamiento, 12.500 GWh/año de energía media, frente a 850 GWh/año de energía firme.

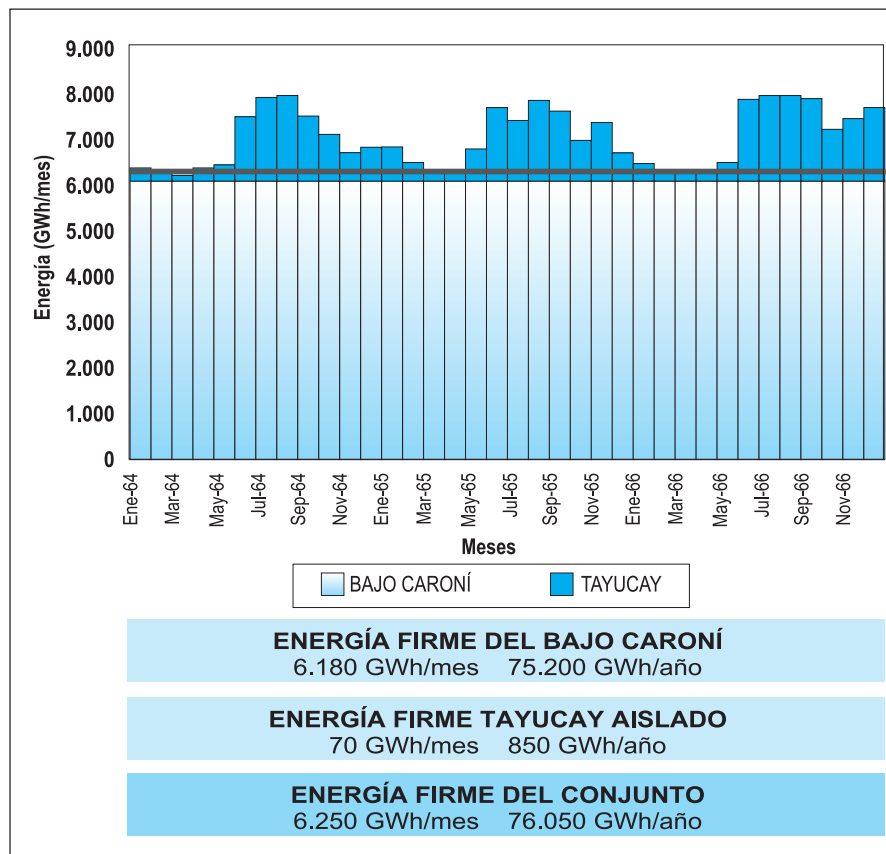


Figura 12.- Energía Firme Conjunto Bajo Caroní-Tayucay. Operación Aislada. (Período 1964 – 1966)

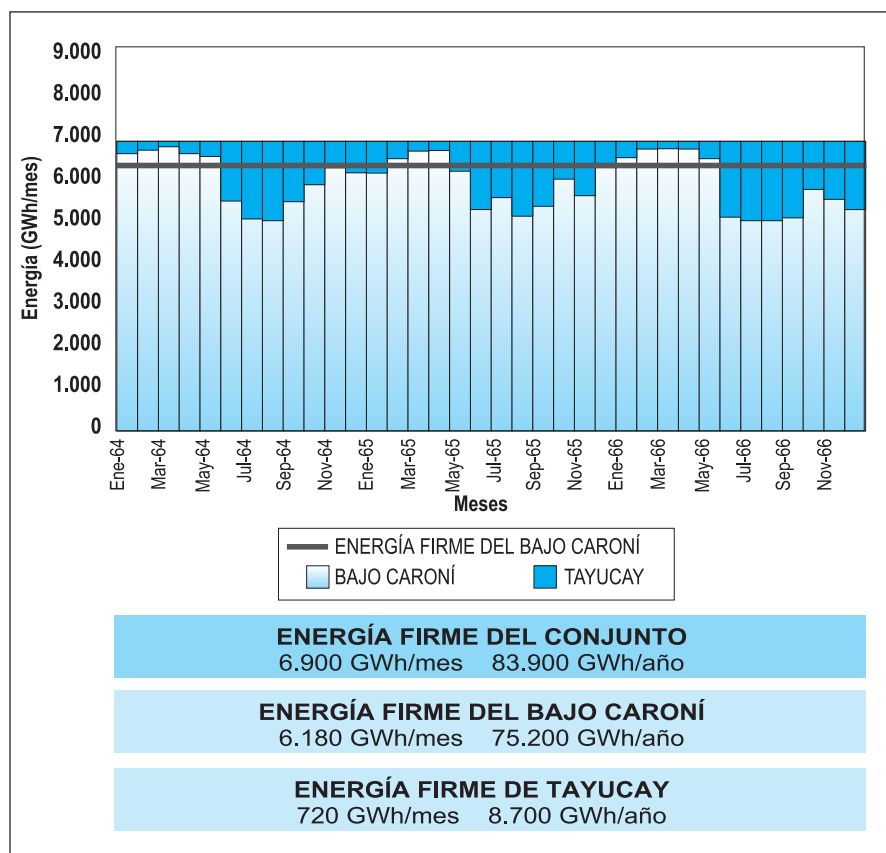


Figura 13.- Energía Firme Conjunto Bajo Caroní-Tayucay. Operación Conjunta. Período 1964 – 1966

Al operar a Tayucay en conjunto con el Bajo Caroní se obtiene una Energía Firme del sistema de 83.900 GWh/año, equivalente a una producción mensual de 6.900 GWh y una energía media de 99.160 GWh/año.

La diferencia entre la energía firme del conjunto Bajo Caroní + Tayucay y la generada del Bajo Caroní es de 8700 GWh/año, ésta corresponde al incremento de energía firme como resultado de la entrada de Tayucay al sistema, por lo tanto representa el aporte de energía firme de Tayucay. La figura 12 ilustra la generación de Tayucay aislado y la figura 13 la operación conjunta.

De igual forma se tiene que la energía promedio correspondiente a Tayucay es la diferencia entre la energía promedio del conjunto Bajo Caroní + Tayucay menos la del Bajo Caroní, de lo cual resulta una energía media de 12.330 GWh/año (figura 14).

El efecto de la integración de Tayucay al Bajo Caroní se refleja en la modificación del nivel del embalse de Guri acorde a la mayor o menor generación de energía. Con la finalidad de ilustrar la influencia de la operación conjunta sobre el embalse se realizó una comparación de los niveles alcanzados en el reservorio a lo largo de la simulación de los 54 años del período histórico. De ésta se han extraído los correspondientes al período crítico 1964-1966, los cuales se presentan en la figura 15.

Se observa que en ambos casos se alcanza la cota máxima en septiembre del 63, luego comienza el descenso del volumen del embalse para compensar los caudales de verano, llegando a un nivel inferior en el caso de la operación con Tayucay. En la época de invierno los niveles alcanzados son superiores, producto de una disminución en la generación del Bajo Caroní por la presencia de Tayucay. Finalmente en mayo del 66 se llega a la cota mínima del embalse, cumpliendo cada grupo con la energía firme establecida.

Otro punto de comparación ha sido la ocupación de las centrales aguas abajo. En la figura 16 se muestran los Factores de Planta mensual, en el ciclo 58 – 66, para la central hidroeléctrica de Guri, que es la que rige el comportamiento aguas abajo.

5. Conclusiones

- El control del nivel del embalse por razones ambientales restringe el uso del aprovechamiento hidroeléctrico Tayucay como central aislada.
- Con miras a mantener la viabilidad económica y ambiental del aprovechamiento se reformuló su participación dentro del sistema eléctrico nacional integrándolo a la generación del Bajo Caroní.
- La operación conjunta de las centrales, haciendo uso de la energía garantizada en un patrón mensual en Tayucay y apoyándose en el efecto regulador del embalse de Guri, ha permitido aumentar la Energía firme del conjunto.
- La modificación de la operación de las centrales del Bajo Caroní permite aprovechar la generación en Tayucay y maximizar la Energía Firme del conjunto. De esta forma la generación en Tayucay se eleva de 850 GWh/año (central sin regulación con operación aislada) a 8700 GWh/año (central sin regulación con operación integrada)
- La operación integrada no afecta significativamente los niveles y volúmenes del embalse de Guri y modifica la ocupación de la central con poca variación del Factor de Planta promedio.

6. Lecciones Aprendidas

En el caso estudiado, aún cuando restricciones ambientales limitaron las condiciones hidráulicas, y el tamaño de las obras, se pudo lograr un balance entre el ambiente y la generación hidroeléctrica, aprovechando la existencia de otros desarrollos aguas abajo sobre el mismo río Caroní.

El ajuste en la operación de las centrales existentes, en conjunto con el aprovechamiento hidroeléctrico Tayucay, permitió mantener su viabilidad técnica y económica.

7. Recomendaciones

Los estudios de generación de energía de la central hidroeléctrica Tayucay, permiten recomendar que se mantenga vigente este aprovechamiento, dentro de los planes de desarrollo hidroeléctrico de la cuenca del río Caroní.

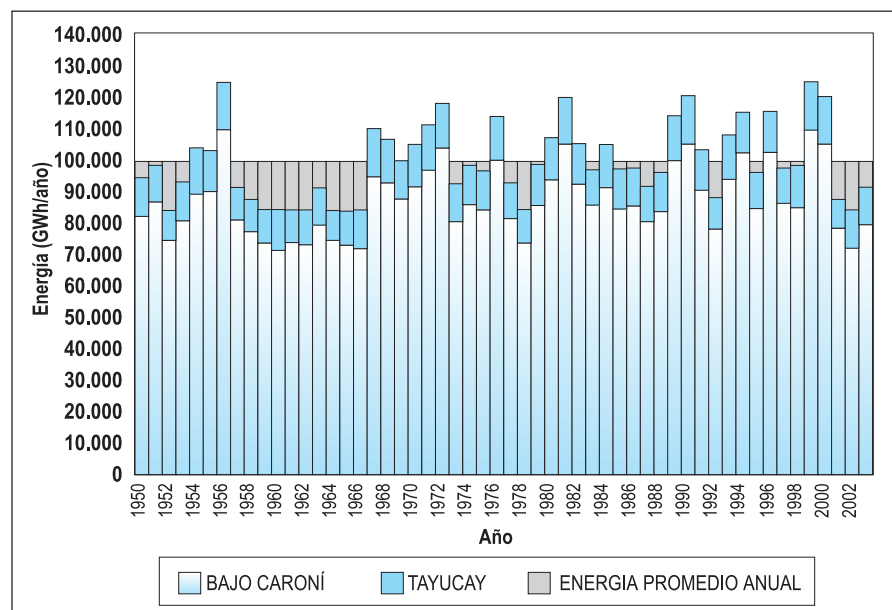


Figura 14.-Energía Media Conjunto Bajo Caroní-Tayucay. Operación Conjunta

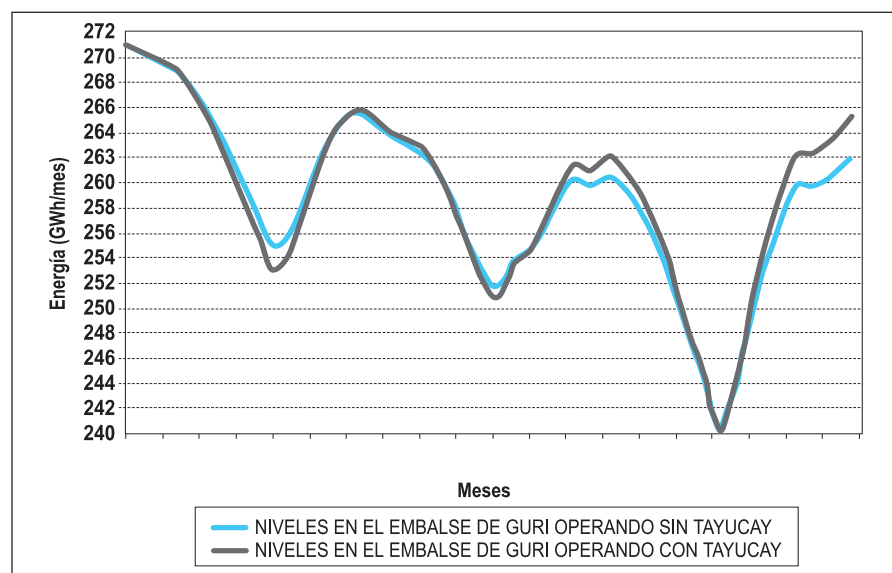


Figura 15.-Niveles en el embalse de Guri

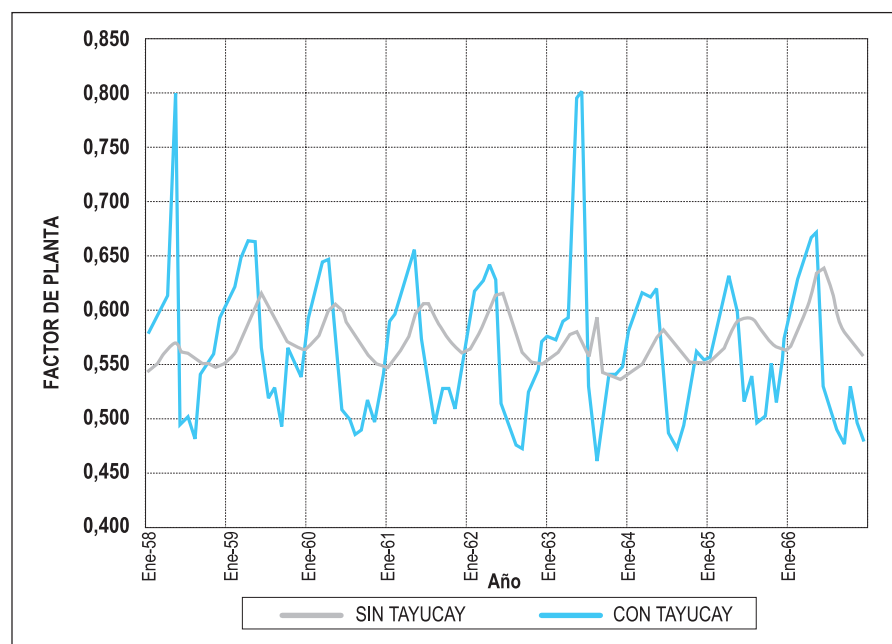


Figura 16.-Comparación del Factor de Planta en Guri - Período 1958 -1966