

# CUANTIFICACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE EXCESO Y DÉFICIT EN CURVAS GUÍA PARA DETERMINAR POLÍTICAS DE OPERACIÓN EN UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO EN MÉXICO

Rosalva Mendoza Ramírez, Ramón Domínguez Mora, Maritza L. Arganis Juárez  
y Eliseo Carrizosa Elizondo

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

E-mail: rmr@pumas.iingen.unam.mx; rdm@pumas.iingen.unam.mx; MArganisJ@iingen.unam.mx; ecae@pumas.iingen.unam.mx

## Introducción

La operación de un sistema hidroeléctrico (SH) debe cumplir con hacer máximo el aprovechamiento del recurso almacenado y garantizar al mismo tiempo la seguridad en el manejo del embalse. Para ello, se diseñan reglas que tratan de tomar en cuenta todos los factores que influyen en el proceso, sin embargo, esto es complejo dada la naturaleza aleatoria de las variables de entrada y su cada vez más evidente alteración de patrones climatológicos. Así que, cada mejora que se haga a un modelo matemático que permita obtener y evaluar el desempeño de un sistema sea de un solo embalse o de múltiples embalses funcionando en paralelo o en serie, será una herramienta útil.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se ha trabajado, desde hace ya tiempo, en conjunto con las dependencias oficiales encargadas del manejo de los sistemas hidráulicos en México, a saber: la comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el diseño de políticas de operación de algunos de los sistemas de aprovechamiento hídrico más importantes de México, tratando de incluir los diversos factores que influyen en la operación del sistema y que las reglas de operación que se obtengan sean factibles de implementar y seguir por los operadores.

El SH que se estudia en este caso es el tercero en importancia, tanto por sus dimensiones como por su capacidad de generación de energía eléctrica y se localiza entre los límites de los estados de Michoacán y Guerrero, en la parte centro sur de México (figura 1).

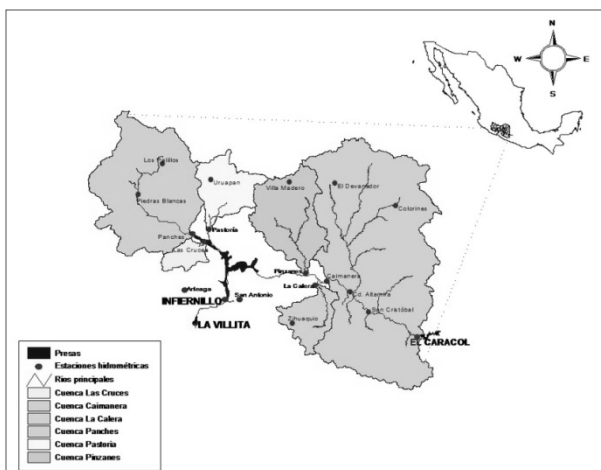


Figura 1.- Ubicación de la presa “El Infiernillo”, sobre el río Balsas, México (Fuente: Domínguez et al., 2014).

La metodología con la que se ha trabajado es la programación dinámica en su versión estocástica (PDE) tomando en cuenta las curvas guía definidas por la CONAGUA para penalizar eventos por exceder o por quedar abajo de sus límites. En estudios anteriores, solo se penalizaba el evento restando un cierto valor definido para los coeficientes de castigo en la función objetivo, en este nuevo estudio, se cuantifica la diferencia entre el límite de la curva guía y el volumen de almacenamiento alcanzado, multiplicando este por el valor de penalización asignado y

restándolo a la función objetivo. Se realizaron varios ensayos para probar diversos valores para los coeficientes de castigo. Los resultados totales se presentarán en el trabajo en extenso.

## Sitio de estudio

El embalse elegido para el estudio es la presa Lic. Adolfo López Mateos, conocida popularmente con el nombre de “El Infiernillo” (figura 1). Controla las aguas del río Balsas, uno de los más caudalosos del país. Nace en la región centro sur recorriendo aproximadamente 800 km hasta su salida en el océano Pacífico. Su cuenca se divide en tres subregiones: Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas. Según datos del 2007 tiene una disponibilidad total anual de aguas superficiales estimada en  $24484 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> de escurrimientos vírgenes y retornos. El embalse geográficamente se localiza entre las coordenadas: 18° 21' 26" a 18° 56' 04" de Latitud norte y 101° 28' 16" a 101° 59' 49" de Longitud oeste, en los límites de los estados mexicanos de Guerrero y Michoacán. La precipitación anual promedio es de 622 mm, el período más seco se registra en invierno cuando la cantidad de lluvia es 5% menor que la anual. La temperatura ambiental promedio anual es de 28.2 °C. La evaporación media anual es de 2848 mm (CONABIO, 2017).

La presa fue construida por la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) entre el período de agosto de 1960 a diciembre de 1963 y puesta en operación el 15 de junio de 1964. El vaso tiene 120 km de largo y cubre un área de 400 km<sup>2</sup>. Tiene una capacidad total de  $12000 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> y 3 túneles vertedores que fueron diseñados para conducir un gasto máximo de 3500 m<sup>3</sup>/s cada uno (Sánchez, A., 2011).

## Metodología

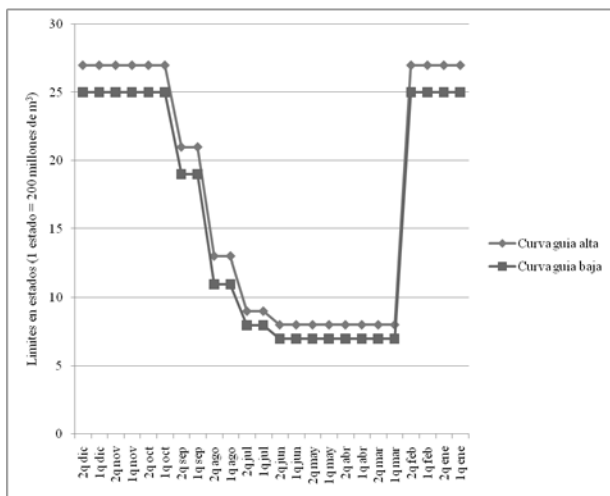
Las políticas de operación del SH de “El Infiernillo” se determinan usando la metodología de la programación dinámica en su versión estocástica (PDE), los detalles del algoritmo se pueden consultar en Bellman (1957). Se inició tomando los valores de penalización (tabla 1) usados para los eventos de derrame, de déficit, de superar la curva guía alta (CG<sub>A</sub>) y de quedar abajo de los límites de la curva guía baja (CG<sub>B</sub>), definidos en el estudio del 2017 (Mendoza et al., 2017).

Se observó que en el estudio de referencia solo se penalizaba el exceder los límites de la CG<sub>A</sub> y al buscar la explicación se vio que prácticamente no hay distinción en los valores de los límites de ambas curvas (figura 2), sin embargo, se optó aquí por definir valores para penalizar el quedar abajo de los límites de la CG<sub>B</sub> y hacer las corridas de los programas que tienen codificado el algoritmo de la PDE cuantificando ahora la diferencia entre el volumen correspondiente al límite de la curva guía (sea la CG<sub>A</sub> o la CG<sub>B</sub>) y el nivel alcanzado en el vaso y obtener las nuevas reglas de operación para hacer el funcionamiento histórico del SH usando el mismo intervalo de tiempo ( $\Delta t = 15$  días) del estudio del 2017. Se definió así un primer ensayo y con la política obtenida se analizó el comportamiento de cuatro variables principales, a saber: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo registrado en el vaso y cantidad promedio de energía generada.

**Tabla 1.-** Valores para penalizar eventos no deseados (Mendoza et al., 2017).

Ensayo 1				
Etap	Derrame	Déficit	Superar CG <sub>A</sub>	Abajo CG <sub>B</sub>
1q* ene	4500	10000	4	0
2q** ene	4500	10000	4	0
1q feb	4500	15000	4	0
2q feb	4500	15000	4	0
1q mar	4500	17000	4	0
2q mar	4500	17000	4	0
1q abr	4500	18000	4	0
2q abr	4500	18000	4	0
1q may	4500	20000	4	0
2q may	4500	20000	4	0
1q jun	4500	20000	4	0
2q jun	4500	20000	4	0
1q jul	9500	3000	5	0
2q jul	9500	3000	5	0
1q ago	11500	3000	5	0
2q ago	11500	3000	5	0
1q sep	11500	3000	5	0
2q sep	11500	3000	5	0
1q oct	6500	5000	5	0
2q oct	6500	5000	5	0
1q nov	6500	5000	4	0
2q nov	6500	5000	4	0
1q dic	6500	5000	4	0
2q dic	6500	5000	4	0

\*Primer quincena; \*\*Segunda quincena

**Figura 2.-** Límites de almacenamiento definidos para la CG<sub>A</sub> y la CG<sub>B</sub>.

## Resultados

Los resultados del primer ensayo se muestran en la tabla 2, se puede observar que al cuantificar el volumen que se excede o que no se alcanza a mantener en el vaso y penalizar el evento en la función objetivo, la política de operación logra reducir el déficit que tuvo el sistema en el estudio del 2017 casi un 80%, sin embargo se tiene un derrame mayor. Los niveles de almacenamiento que se alcanzan en el vaso logran un aumento del 2% en la variable de generación promedio de energía eléctrica.

De las cuatro variables de interés, tres de ellas tienen mejor desempeño que en el estudio de referencia, lo cual motivó a diseñar dos ensayos más para buscar un mejor control en la variable derrame. Los resultados de ellos se mostrarán en el trabajo final.

**Tabla 2.-** Comparación de resultados.

	Derrame (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Déficit (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Almacenamiento Mínimo (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Energía promedio (GWh/quincena)
Mendoza et al., 2017	7206	2242	0.0	139.6
Ensayo 1	7765	429	0.0	142.4

## Conclusiones

Los resultados del primer ensayo mostraron que al cuantificar el volumen de almacenamiento que se excede o que no se alcanza a mantener en el vaso, usando los niveles definidos por las curvas guía, se logra mejorar el desempeño de tres de las cuatro variables que se evalúan en el funcionamiento del sistema.

## Referencias

**Bellman, R.** (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press. Princeton, NJ. USA.

**Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).** (2017). Regiones terrestres prioritarias de México. Infiernillo. Disponible en: [www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp\\_116.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_116.pdf)

**Domínguez, M. R., Arganis, J. M.L., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. O., Mendoza, R. R., Esquivel, G. G., De Luna, C. F., Cruz, G. J. A., y Gómez, G. F.** (2014). Estudio hidrológico y determinación de las políticas de operación de los vasos de almacenamiento de las presas en cascada sobre el Río Balsas: El Caracol (C. H. Carlos Ramírez Ulloa), Adolfo López Mateos (C. H. Infiernillo) y José Ma. Morelos y Pavón (C.H. La Villita). Informe final. Elaborado para La comisión Federal de Electricidad (CFE). México, D.F.

**Mendoza, R. R., Domínguez, M. R. y Arganis, J. M. L.** (2017). Análisis del funcionamiento de un sistema hidroeléctrico en México con reglas de operación obtenidas para intervalos de tiempo mensual y quincenal. *Memorias V Jornadas de Ingeniería del Agua*, La Coruña, España.

**Sánchez Mora, A. M.** (2011). De Anzaldúas a El Infiernillo (1950-1964). Breves apuntes sobre la contribución de José Luis Sánchez Bribiesca a la ingeniería de grandes presas. *Revista Digital Universitaria* [en línea]. Vol. 12, No.2 Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art12/index.html>. ISSN: 1607-6079.