

REGLAS DE OPERACIÓN PARA INTERVALOS DE TIEMPO MENSUAL Y QUINCENAL EN UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO EN MÉXICO

Rosalva Mendoza Ramírez, Ramón Domínguez Mora y Maritza Liliana Arganis Juárez

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

Introducción

El presente estudio consistió en la determinación de reglas de operación para un embalse con propósitos de generación de energía eléctrica, tomando intervalos de tiempo de quince y de treinta días, y con ellas hacer el funcionamiento del sistema usando los registros históricos correspondientes al intervalo de tiempo seleccionado de los volúmenes de ingreso. En general estas reglas buscan optimizar el uso del agua evitando en lo posible vertimientos y alcanzar niveles de almacenamiento que no permitan satisfacer los usos del recurso. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), son las dependencias federales encargadas del manejo de los sistemas de almacenamiento de agua en México y establecen límites para operarlos en forma segura y garantizar los niveles de almacenamiento para los diversos usos que tenga el embalse. Sin embargo, estos límites no son en realidad una regla de operación en el sentido estricto de la definición y es por ello que en el Instituto de Ingeniería desde hace varios años se estudia, en conjunto con las dependencias federales, el manejo de los sistemas diseñando reglas de operación que sean factibles de implementar. La técnica usada ha sido la programación dinámica estocástica y la función objetivo diseñada incluye cada vez más factores tratando con ello de evitar derrames, déficits y rebase de los límites establecidos. En este estudio se tomó el registro histórico de ingresos mensuales y quincenales para el periodo 1965-2013 del sistema hidroeléctrico de El Infiernillo, el tercero más importante en México tanto por sus dimensiones físicas como por la cantidad de energía eléctrica que genera y aporta al Sistema Nacional de Energía. Lo primero que se hizo fue un análisis estadístico para obtener las funciones de densidad de probabilidad asociadas a los ingresos para los datos en forma quincenal pues las mensuales ya se tienen de estudios anteriores. Se determinó la regla de operación y se simuló el funcionamiento del sistema evaluando cuatro variables principales: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo y energía eléctrica promedio. Un primer resultado mostró que el sistema controla mejor el evento de derrame con reglas de operación obtenidas en forma quincenal, pero tiene varios años con déficit, no afectando esto notablemente el promedio de energía generada, sin embargo, esta condición no es deseable que se presente, por ello, se diseñaron varios ensayos más con el propósito de lograr equilibrio entre derrame y déficit. Los resultados finales se presentarán en el trabajo final.

El trabajo está organizado en cuatro apartados, a saber: en el primero se describe el objetivo del estudio, el segundo presenta en forma amplia y general la metodología utilizada, en el tercero se describe la aplicación al sistema hidroeléctrico de El Infiernillo así como los resultados obtenidos, y finalmente en el cuarto se dan las conclusiones del estudio.

Objetivo

El objetivo general del estudio fue obtener reglas de operación óptima para dos intervalos de tiempo y simular con ellas el funcionamiento del sistema hidroeléctrico (SH) de El Infiernillo.

Materiales y métodos

a) Sitio de estudio

La presa Adolfo López Mateos, mejor conocida como *El Infiernillo* (fig. 1), se ubica en los municipios de Arteaga, La Huacana y Churumuco del estado de Michoacán y en el municipio de Coahuayutla del estado de Guerrero. 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. La región presenta 4 tipos de clima, pero predomina en ella el semiárido-cálido, con temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C; con un promedio de precipitación anual de 800 mm y con lluvias en verano del 5% al 10.2% de la anual (CONABIO, 2016).

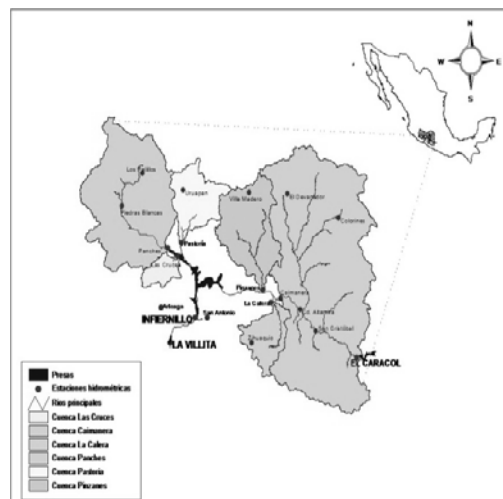


Figura 1.- Ubicación de la presa "El Infiernillo", sobre el río Balsas, México (Fuente: Domínguez et al., 2014).

El embalse fue construido entre el período de agosto de 1960 a diciembre de 1963 y puesto en operación a mediados de 1964. Sus principales usos son: captar agua para la generación de energía eléctrica, el aprovechamiento para el riego y el control de avenidas. Consta de una cortina de enrocamiento con corazón impermeable. Tiene 149 m de altura y 350 m de longitud de la corona. La casa de máquinas es subterránea, con 21 m de ancho, 128 m de largo y 40 m de altura. En la margen izquierda se encuentra la obra de toma, distribuida en tres tuberías a presión con camisa de acero y 8.90 m de diámetro, con capacidad para conducir 194 m³/s por tubería. La obra de excedencia se compone de tres vertedores de 13 m de diámetro, para descargar 13,800 m³/s. Esta central hidroeléctrica se localiza en la zona de mayor riesgo sísmico del país y por tal motivo se evalúa continuamente el comportamiento dinámico de sus estructuras (SEMAR, 2016). El sistema hidroeléctrico aprovecha las aguas del río Balsas, el tercero más largo de México (771 km) que nace tras la confluencia de los ríos San Martín y Zahuapán, en el estado de Puebla, y desemboca en el océano Pacífico. El vaso de El Infiernillo tiene 120 km de largo y cubre un área de 400 km². Su capacidad es de 12 mil millones de m³. Es la tercera presa más grande del país y también la tercera en cuanto a generación de electricidad.

b) Técnica de optimización

Las políticas de operación del SH de El Infiernillo se determinan usando la metodología de la Programación Dinámica (PD) (Bellman, 1957) en su versión estocástica (PDE) (Nandalal y Bogardi, 2007). El inconveniente de la PD es el alto costo en recursos computacionales que demanda, para salvar esto en el II-UNAM la técnica se trabaja separando el algoritmo de solución en dos partes; en la primera sólo se calcula el beneficio esperado por cada etapa, que se repite de un año a otro, en términos de la función objetivo (FO) que tiene como fin en este caso maximizar la generación de energía eléctrica y disminuir la presencia de eventos no deseados (Mendoza et al, 2012). En la segunda parte se determina el beneficio acumulado hasta la etapa considerada y su valor óptimo, para ello se propone un número de años muy grande; en la etapa inicial se asignan valores de cero a los beneficios óptimos, se comienza el recorrido de las etapas en sentido contrario al tiempo y se resuelven las ecuaciones iterando hasta que las diferencias entre dos años consecutivos cumplen una tolerancia establecida que garantiza convergencia y estabilidad de la solución. Logrado esto, se guarda la extracción óptima (k_i^*) para la presa con su respectivo beneficio (B^*) (Mendoza et al, 2012).

Aplicación y resultados

De estudios anteriores (Mendoza et al., 2016; Mendoza et al., 2017) se tomó un intervalo de discretización de la capacidad útil del embalse de 200 hm³, el número de etapas definidas y extracciones máximas y mínimas para cada una, límites de curvas guía alta y baja, ecuaciones de ajuste y datos generales del embalse. Se usaron los registros de ingresos históricos para el periodo en forma mensual y quincenal para hacer primero un análisis estadístico y determinar las probabilidades asociadas a ellos. Una vez hecho esto, las políticas de operación del SH se determinan usando la metodología de la PDE.

Con la política obtenida se simula el funcionamiento del sistema. Se tomó el registro histórico de ingresos mensuales y quincenales para el periodo 1965-2013. Se hizo un análisis estadístico para obtener las funciones de densidad de probabilidad asociadas a los ingresos para los datos en forma quincenal, pues las mensuales ya se tienen de estudios anteriores. Se determinó la regla de operación y se simuló el funcionamiento del sistema evaluando cuatro variables principales: derrame y déficit total, almacenamiento mínimo y energía eléctrica promedio. Un primer resultado (tabla 1) mostró que el sistema controla mejor el evento de derrame con reglas de operación obtenidas en forma quincenal pero tiene varios años con déficit, no afectando esto notablemente el promedio de energía generada, sin embargo esta condición no es deseable que se presente, por ello, se diseñaron varios ensayos más con el propósito de lograr equilibrio entre derrame y déficit. Los resultados para la totalidad de ensayos realizados se reportarán en el trabajo final.

Tabla 1.- Comparación de resultados de la simulación políticas de operación. Presa El Infiernillo, Mich.

	Derrame (hm ³)	Déficit (hm ³)	Almacenamiento mínimo (hm ³)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
Mendoza et al., 2016	11320.2	0.0	271.0	144
Mendoza et al., 2017	10675.2	470.1	0.0	144
Ensayo 1	6902.6	4237.1	0.0	141

Conclusiones

Los primeros resultados mostraron que obtener políticas de operación usando intervalos de tiempo de 15 días conduce a un mejor desempeño del sistema que al simular su funcionamiento con reglas de operación obtenidas para un ~~mt~~ de 30 días. El reducir el intervalo de tiempo de 30 días a 15 días y no hacer agrupamiento de meses tratando de que una de las medidas de dispersión (la media en este caso) sea similar en los grupos, permite establecer diferencias de comportamiento en los volúmenes de ingreso de un mismo mes y considerar probabilidades que se pierden al hacer el agrupamiento.

En todos los casos que se han analizado, la variable menos sensible a los cambios hechos ha sido la energía generada, tal parece que a pesar de los meses con déficit los niveles de almacenamiento que se mantienen en el vaso durante la simulación compensan esto.

Referencias

- Bellman, R. E.** (1957). *Dynamic Programming*. Princeton. NJ. Princeton University Press.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).** (2016). Regiones terrestres prioritarias de México. Infiernillo. Disponible en: 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., Domínguez, R. y Arganis, M.** (2012). "Influencia de curvas guía en las políticas de operación para el manejo de un sistema hidroeléctrico". *Memorias del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 9-12 Septiembre, San José, Costa Rica.
- Mendoza, R., Arganis, M. y Domínguez, R.** (2016). "Efecto de la variación por etapa en los coeficientes de castigo para obtener reglas de operación: presa El Infiernillo, Mich., México". *Memorias del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 28-30 Septiembre, Lima, Perú.
- Mendoza, R., Arganis, M. y Domínguez, R.** (2017). "Análisis de la inclusión de la variabilidad temporal del coeficiente de autocorrelación en la simulación de un sistema hidroeléctrico en México". *Memorias del XIII Congreso Internacional de Hidráulica*, 21-25 Marzo, La Habana, Cuba.
- Nandalal, K.D.W. y Bogardi, J.** (2007). *Dynamic Programming based operation of reservoirs. Applicability and Limits*, Cambridge University Press.
- Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR).** (2016). Presa de El Infiernillo. Disponible en <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioInfiernillo.pdf>