

Optimización de la Operación de las unidades de la Central Mazar en Función de la Cabeza Neta

V. A. Llivichuzhca

J. V. Gallardo

Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P., Unidad de Negocio HIDROPAUTE

Resumen— Para optimizar la operación de la central hidroeléctrica Mazar en el corto plazo, en este artículo se desarrolla un modelo no lineal basado en los puntos de máxima eficiencia técnica en la operación de una turbina Francis, que dependen de la cabeza neta y la descarga de agua y la potencia generada.

La curva de colina entregada por el fabricante de la turbina es el diagrama de partida para el desarrollo de esta investigación, y mediante una regresión no lineal bi-variable se encuentra la representación de la eficiencia técnica de la turbina Francis como una función cuadrática de la cabeza neta y la descarga de agua.

Para el modelo, se evalúa tres escenarios hidrológicos seco, medio y húmedo con resolución horaria a través de un análisis determinístico. De los resultados se obtuvo una potencia no suministrada por Mazar de acuerdo a la demanda programada, debido que el análisis utiliza el criterio de optimización de máxima eficiencia técnica, sin la inclusión de la restricción de satisfacer la demanda; esto se realizó con la intención de comprender los efectos que causa en el nivel del embalse al operar las unidades de generación de la central Mazar a máxima eficiencia.

Palabras clave— Cabeza neta, curva de colina, eficiencia técnica, punto de diseño, máxima eficiencia.

Abstract— In order to optimize operation of the Mazar hydroelectric power plant, in the short term, this paper develops a non-linear model based on maximum technical efficiency points for operation of a Francis turbine generator, which depend on net head, water discharge and generated power.

The hill curve given by the turbine manufacturer is a diagram to be used as a starting point for the development of this research, and though a non-linear bi-variable regression, the technical efficiency representation of the Francis turbine is

found, as a quadratic function of the net head and the water discharge.

For this model three hydrological scenarios are used: Dry, medium and humid, with hourly solving through a deterministic analysis. The results obtained a non-supplied power for Mazar according to scheduled demand, given that the analysis uses the optimization criteria of the maximum technical efficiency, without including restrictions for satisfying demand. This is done in order to understand the effects of the reservoir level on operations of the generating units of the Mazar power plant at maximum efficiency.

Index Terms— Net Head, Hill Curve, Technical Efficiency, Design Point, Maximum Efficiency

1. INTRODUCCION

A mediados del año 2010 la central Mazar que pertenece al complejo hidroeléctrico Paute inició su proceso de operación con las dos unidades que la conforman. En este periodo se ha registrado información de diferentes parámetros operativos que nos ha permitido observar el comportamiento de la producción de la planta más aún en las diferentes temporadas del año hidrológico (lluvioso y seco) en donde el comportamiento del nivel del embalse influye marcadamente en la eficiencia de la operación de las unidades de generación.

Con este antecedente y debido que uno de los aspectos que resulta prioritario en la operación de un sistema eléctrico de potencia es el uso eficiente de los recursos energéticos, es importante modelar sus particularidades para aprovechar de manera adecuada sus características operativas, más aún, las compañías de generación que tienen a su cargo centrales hidroeléctricas; la gestión de estos recursos hídricos es un eje fundamental para las mismas, ya que recae en las propias empresas buscar herramientas adecuadas y adaptarlas a sus necesidades particulares para optimizar sus recursos.

Esta investigación busca establecer un modelo de las unidades de generación, para que en función de la cabeza neta, se obtenga un uso eficiente del recurso hídrico almacenado en su embalse. Bajo la consideración de que la potencia de salida de las unidades de generación hidroeléctrica, depende básicamente de tres variables: la cabeza neta, el caudal de turbinamiento y la eficiencia técnica del conjunto turbina-generator. Por lo tanto al considerar la variación de la cabeza neta, la no linealidad de la descarga dentro de la función de producción de potencia generada en la central hidroeléctrica puede tener un efecto significativo.

En este documento, es preciso mencionar, que se trata de presentar un avance de la investigación que se está desarrollando para la optimización de los recursos hídricos en el complejo hidroeléctrico Paute, por lo que los resultados mostrados en este documento son preliminares enfocados únicamente en el modelo de la central Mazar. Este estudio por lo tanto es el inicio de esa “búsqueda” del uso eficiente de los recursos energéticos del complejo hidroeléctrico Paute.

Tomando como punto partida la información del fabricante y la estadística registrada hasta el momento y basados en la literatura sobre el tema principalmente en la tesis doctoral¹ del MSc. Francisco Javier Díaz [1]; se busca establecer un modelo que nos permita determinar a través del punto de diseño los puntos máximos de la eficiencia técnica de las unidades para diferentes valores de cabeza neta dentro de la curva colinar de la turbina; permitiendo tener una generación eficiente en la central y un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, que se verá reflejado en el almacenamiento del embalse que a su vez se manifiesta en un ahorro de energía hidroeléctrica.

Logrando finalmente determinar una función de producción de la generación basados en la eficiencia técnica de las unidades, por lo que se utilizará como criterio de optimización, la máxima eficiencia técnica en la operación de las unidades en la central Mazar.

2. MARCO TEORICO

En las unidades de generación hidroeléctrica, la producción de electricidad se presenta, en forma simplificada, como la transformación de la energía potencial gravitacional del agua almacenada en el embalse en energía eléctrica por medio de las unidades generadoras (conjunto turbina-generator). El agua que se capta a una cota determinada, después de pasar

por las turbinas, se descarga a una cola inferior. Las turbinas convierten la energía potencial gravitacional en energía mecánica accionando sus ejes conectados a los generadores, los cuales suministran energía eléctrica en sus terminales [2].

2.1. Función de producción de potencia

La función de la producción de potencia en una unidad de generación hidroeléctrica depende del producto del caudal de turbinamiento o descarga de agua por la turbina, la cabeza neta y la eficiencia del grupo turbina-generator [1], [3], [4]. Por lo tanto es necesario que los parámetros y/o las características de la central hidroeléctrica sean expresados adecuadamente más aún cuando los efectos que causa la variación de la cabeza neta y la descarga en las plantas hidroeléctricas son significativos. La potencia hidráulica total de una unidad de generación hidroeléctrica se puede expresar como:

$$P_j = 9.81 * 10^{-3} * \eta_j * h_j * q_j \quad (1)$$

Donde η_j representa la eficiencia del grupo turbina-generator, q_j el caudal de turbinamiento, h_j la cabeza neta.

2.2. La caída bruta

La caída o cabeza bruta, en la operación de una planta de generación hidroeléctrica, se define como la caída topográfica, es decir, la diferencia de cotas entre el nivel del embalse aguas arriba, en la captación de agua, y el nivel aguas abajo en el canal de descarga. La citada cota aguas arriba es una función del volumen almacenado en el embalse [1], [5]. A su vez, la cota aguas abajo es una función de la descarga defluente, d , conformada por la descarga total turbinada en la planta, Q , más el vertimiento, qv , (según el diseño de la planta), y más el aporte lateral del río Mazar tal que, $d=(Q+qv+ql)$ durante un período de tiempo de duración Δt , puede definirse mediante la expresión (2).

$$h_{bj} = N_{supj} (v_j) - N_{infj} (Q + qv + ql) \quad (2)$$

Donde $N_{supj} (v_j)$ es una función de la cota aguas arriba del embalse de la planta, y $N_{infj} (Q+qv+ql)$ es una función de la cota aguas abajo del canal de descarga de la planta que relaciona el valor de esta cota, la descarga defluente, el vertimiento y el aporte lateral del río Mazar.

¹ “Optimización de la operación y evaluación de la eficiencia técnica de una empresa de generación hidroeléctrica en mercados de corto plazo”. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, 2011, Francisco Javier Díaz.

2.2.1 Las pérdidas hidráulicas

No todo el potencial energético referente a la altura de la caída bruta es aprovechado por la turbina. Durante la conducción del agua se presentan pérdidas de energía hidráulica por fricción, referentes al efecto de piezas y dispositivos intercalados en los conductos, tales como rejas, portones, válvulas y codos.

De acuerdo a las especificaciones del fabricante en las unidades de la central Mazar, las pérdidas de carga en el circuito hidráulico de aducción, desde la sección de la entrada del túnel de carga (toma de agua) hasta la sección de la salida del túnel de descarga son calculadas por las expresiones.

$$Per_j = c_{1j} \cdot q_j^2 \quad 1 \text{ turbina} \quad (3)$$

$$Per_j = c_{2j} \cdot Q_j^2 \quad 2 \text{ turbinas} \quad (4)$$

2.2.2 La cabeza neta

La altura de la cabeza neta a la que está sometida una turbina se define como la diferencia de cotas entre el nivel del embalse y el nivel en el canal de descarga y menos las pérdidas hidráulicas [1], [6].

$$h_{nj} = N_{supj} - N_{infj} - (Q + s + ql) - Per_j(Q_j, q_j) \quad (5)$$

Donde $Per_j(Q_j, q_j)$ representa las pérdidas de energía hidráulica por fricción.

2.3. La eficiencia técnica del grupo turbina - generador

La eficiencia o rendimiento hidráulico de la turbina, η_t se define como el cociente entre el salto útil, o energía por unidad de masa transmitida al generador, y el salto neto, o energía por unidad de masa disponible a la entrada del rodete. El porcentaje de la energía mecánica transmitida al rotor de la máquina que se transforma en energía eléctrica se conoce como la eficiencia del generador η_g . Esta eficiencia del generador suele englobarse dentro del término de eficiencia $\eta_j = \eta_t \cdot \eta_g$, considerada como la eficiencia global del grupo turbina-generador [1], [2], [7]. La eficiencia η_j para este estudio, se consideró una constante.

“La cuantificación de la eficiencia técnica de una unidad de generación hidroeléctrica es función de su punto de operación. Cuando la turbina opera en las condiciones de diseño, ésta gira con el número de rotaciones especificado y desarrolla su potencia

nominal con la descarga de agua turbinada, según sus propias especificaciones de diseño, logrando su máxima eficiencia. En los estudios de medio y de largo plazo, por lo general, la eficiencia se considera constante e igual al valor promedio de todos los grupos turbina - generador de la central hidroeléctrica. Sin embargo, en horizontes de más corto plazo, como es el caso de la programación de la operación hidroeléctrica, será conveniente una representación más detallada y precisa del comportamiento de la turbina, ya que de esta manera se posibilitaría la realización de un despacho óptimo más exacto y podría ayudar a evitar la presencia de comportamientos operativos indeseables” [1], [5], [8].

Las condiciones de operación de una turbina hidráulica suelen representarse mediante gráficas a través de *curvas características*, cuya obtención debe hacerse experimentalmente, “*in situ*” o mediante ensayos de laboratorio en modelos reducidos [1].

Para una adecuada representación del comportamiento físico de la eficiencia de una turbina se debe tener en cuenta, básicamente, dos variables: la altura de la caída o cabeza neta y la descarga de agua. Esta interrelación es bastante compleja y generalmente se expresa mediante curvas que representan la eficiencia de la turbina a diferentes niveles, dependiendo de las citadas dos variables. Estas curvas colinarias o “hill diagrams”, generalmente son entregadas por los fabricantes de las turbinas y tienen la forma que se ilustra en la Fig. 1. A continuación, se analiza el comportamiento de la turbina de reacción tipo Francis de la central Mazar.

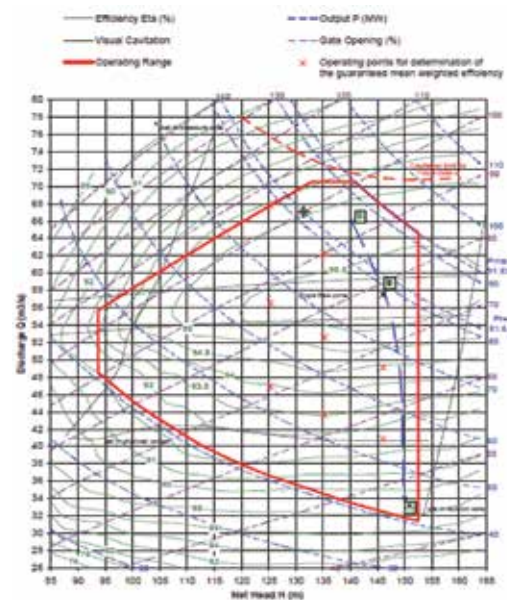


Figura 1: Diagrama Colinar de las unidades de la central Mazar.

Toda turbina está proyectada para operar con sus parámetros nominales o de diseño: cabeza neta, hd , y descarga de agua, qd . Que por lo general la pareja (hd, qd) es llamado "punto de diseño". En el diagrama colinar de la Fig. 1, estos parámetros se encuentran dentro de una zona que no se especifica un punto de diseño máximo, pero para fines demostrativos se puede tomar uno de los puntos que garantizan la eficiencia media ponderada que toma valores de 146 m y 57,8 m³/s, aproximadamente, donde la turbina obtiene su "máxima eficiencia" (punto B) o su rendimiento óptimo, al 95,5%. Además, para cualquier punto de operación de la región factible asociado con la pareja (h, q) , donde h representa la cabeza neta y q la descarga de agua, es posible leer la eficiencia de la turbina [1], [6].

La interdependencia entre las tres citadas variables, la cabeza neta, la descarga de agua y la eficiencia técnica se describe a continuación, y se ilustra en la Fig. 1. Suponiendo que la turbina está operando en el punto A con una cabeza neta de 150 m y una descarga de 34 m³/s, en la curva colinar se lee una eficiencia de 88% y una potencia de salida en la turbina de 44 MW. Al aumentar la descarga desde el punto A al punto C; la potencia de salida de la turbina es creciente desde 44 MW en A, hasta aproximadamente 85 MW en C con una cabeza neta de 140 m y una descarga de 66 m³/s. En la Fig. 1 se puede observar que en la trayectoria operativa ABC ilustra la interdependencia entre la cabeza neta, la descarga de agua y la potencia generada.

Mediante estas consideraciones puede verificarse que el funcionamiento de la unidad en condiciones operativas diferentes a su "punto de diseño" (cercano al punto B, en este caso) causa ineficiencias en el proceso de producción de energía eléctrica.

2.4. La eficiencia como una función cuadrática de la cabeza neta y la descarga de agua

Con el objetivo de facilitar el análisis del sistema y su aplicación en la toma de decisiones, se realiza un trabajo estadístico a partir del diagrama de "Curvas de Colina" para representar la eficiencia de la turbina como una función, no lineal, de dos variables: la cabeza neta y la descarga de agua [1], [5], [8], [9]. El procedimiento estadístico desarrollado en este trabajo consiste en la formulación de una regresión no lineal múltiple de la forma de (6).

$$\eta_j = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 q + \beta_3 h^2 + \beta_4 q^2 + \beta_5 hq \quad (6)$$

El procedimiento estadístico desarrollado consistió en tomar una muestra conformada por los puntos disponibles de la curva de colina entregada por el fabricante y con el uso de una herramienta de cálculo matemático, se encontraron los coeficientes β_j de la ecuación de regresión ajustada, de (6).

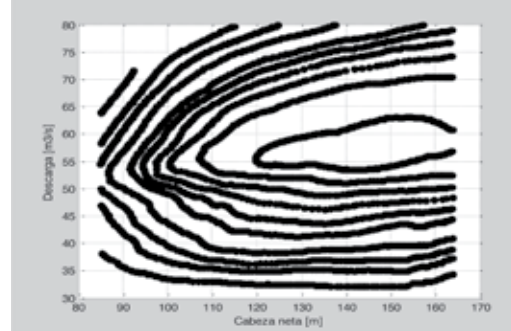


Figura 2: Puntos de muestreo de la curva de colina de las unidades de la central Mazar.

En la Fig. 2 se encuentra graficados los puntos de muestreo y en la Fig. 3 se muestra el modelo ajustado.

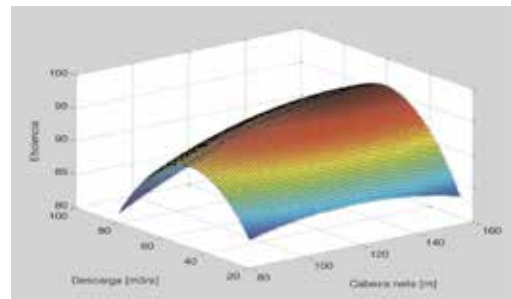


Figura 3: Curva de Colina ajustada para las unidades de la central Mazar.

Ahora bien, la descarga óptima, para una cabeza neta dada, puede hallarse, mediante optimización, al igualar a cero la derivada parcial de la función de eficiencia con respecto a la descarga, $\partial\eta/\partial q=0$ (para lo cual, h se toma como una constante), y resolviendo la ecuación resultante, para la descarga, q , como una función de la cabeza neta, h . En el caso de (6), se tiene (7) de la cual puede expresarse q como una función lineal de h , como se hace en (8).

$$\frac{\partial\eta}{\partial h} = \beta_1 + 2\beta_3 h + \beta_5 q \quad (7)$$

$$q = -\frac{\beta_2}{2\beta_4} - \frac{\beta_5}{2\beta_4} h \quad (8)$$

La eficiencia técnica de una turbina Francis, ha sido aproximada mediante un modelo cuadrático bi-variable, como se especifica en (6), a partir del cual y mediante análisis matemático, se ha llegado a una función lineal que permite hallar la descarga

de máxima eficiencia relativa asociada a una determinada cabeza neta. Para esta pareja (cabeza neta, descarga de agua) es posible calcular tanto la eficiencia de la turbina como la potencia de salida y la energía generada, es decir, puede estimarse el nivel de potencia a máxima eficiencia relativa. Esta descarga de máxima eficiencia relativa ofrece información útil a una empresa de generación hidroeléctrica como ayuda para la toma de decisiones relacionadas con la asignación de sus unidades de generación o auto-despacho de sus unidades una vez que se ha realizado el despacho por el operador del sistema [5], [8].

Continuando el análisis matemático, mediante un procedimiento similar al utilizado para hallar la descarga de máxima eficiencia relativa para una determinada cabeza neta; igualando a cero la derivada parcial de la eficiencia, esta vez con respecto a la cabeza neta, $\partial\eta/\partial h=0$ (tomando la descarga q como una constante), se obtiene:

$$\frac{\partial\eta}{\partial q} = \beta_2 + 2\beta_4q + \beta_5h \quad (9)$$

De los anteriores análisis, se tiene el sistema de dos ecuaciones lineales simultáneas, con dos variables, formado por (7) y (9), cuya solución debe reproducir el punto de diseño del “diagrama colinar”, que para el caso de Mazar este punto toma los valores de 145,5m y 60 m³/s.

La ventaja de disponer de una función analítica de este tipo consiste en la posibilidad de desarrollar un procedimiento matemático para su optimización y para la toma de decisiones relacionadas, por ejemplo, con la descarga óptima a realizar en los procesos operativos diarios u horarios donde puede conocerse, con una buena aproximación, la cabeza neta, la cual podría irse actualizando, para cada uno de los períodos de tiempo, mediante un proceso iterativo, de tal manera que permita la programación de la operación diaria u horaria a máxima eficiencia de las unidades de generación [1], [5], [9].

3. ANALISIS DEL MODELO DE LA CENTRAL MAZAR

El objetivo de este análisis es mostrar el comportamiento del modelo para la central Mazar con la consideración de la variabilidad de la cabeza neta a máxima eficiencia, logrando obtener curvas de algunos parámetros que permitan dilucidar las ventajas de una función no lineal de la eficiencia técnica en periodos de muy corto plazo [2]. En primera instancia se muestra de manera general la trayectoria de potencia de la unidad en comparación

con la potencia en función de la máxima eficiencia de las unidades. Posteriormente se indica un ejemplo de aplicación en un contexto determinístico para fines ilustrativos.

3.1. Potencia de las unidades de la Central Mazar con el criterio de máxima eficiencia técnica

La eficiencia técnica de las unidades de la central Mazar se ha aproximado de acuerdo a (6) es decir a un modelo cuadrático bi - variable, que a partir de este, permite encontrar el turbinamiento o descarga de máxima eficiencia relativa asociada a una determinada cabeza neta. Logrando posteriormente estimar el nivel de potencia de salida de la turbina a máxima eficiencia; en la Fig. 4 se muestra los resultados de este análisis donde se aprecia la curva resultante de potencia a máxima eficiencia, la curva a máxima potencia de la turbina, y la limitación por inflexibilidad declarada de las unidades de generación de la central Mazar.

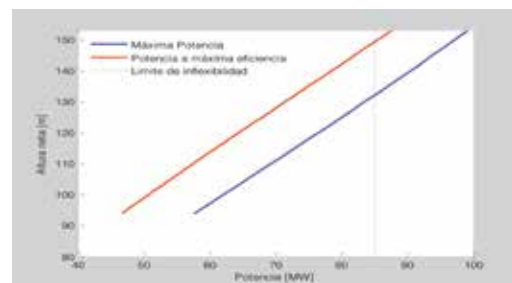


Figura 4: Curva de potencia a máxima eficiencia y curva a máxima potencia de la turbina

3.2. Análisis del modelo en un contexto determinístico

En este apartado se realiza un análisis determinístico en un periodo de una semana, utilizando los registros horarios históricos de caudales de ingreso y producción de la planta, para un escenario de hidrología seca, en la Fig. 5 se presenta el esquema utilizado para él ejemplo.

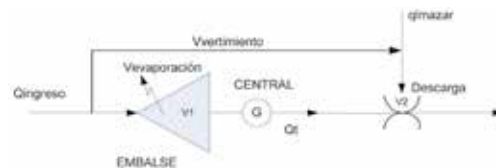


Figura 5: Esquema de la central Mazar

Para mostrar la funcionalidad del modelo se analiza comparativamente los valores de potencia del registro histórico con los resultados del modelo con la consideración única que se debe suministrar la demanda programada por la planta; los resultados que se indican en la Fig. 6 muestran que el modelo tiene

una buena aproximación en relación a los valores reales registrados, por lo que se puede establecer que el modelo se encuentra brindando resultados valaderos para el caso de suministrar únicamente la demanda sin considerar ningún criterio de optimización.

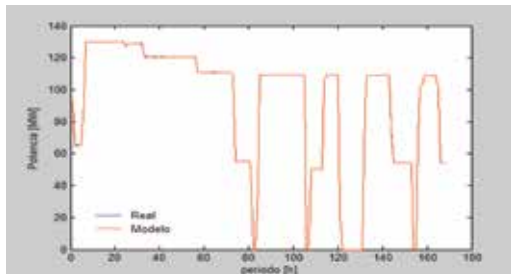


Figura 6 : Curvas de potencias real vs modelo.

3.2.1 Análisis con el criterio de máxima eficiencia

Los efectos que trae al utilizar el criterio de descarga a máxima eficiencia en las unidades de Mazar en el periodo de operación analizado se presentan en la Fig. 7 y Fig. 8; de la Fig. 7 se extrae que las unidades de la central Mazar en ciertos periodos no alcanzan a cubrir la demanda total requerida, esto es debido que al aplicar el criterio de descarga a máxima eficiencia el modelo trata de ajustarse a la programación de demanda pero está limitado al valor de máxima eficiencia de la descarga en función de la cabeza neta en el periodo estudiado, por lo tanto no está sujeto al cubrimiento total de la misma, esta particularidad ayuda a comprender los efectos que causa en el nivel del embalse al operar las unidades de generación de la central Mazar a máxima eficiencia, esto se mostrará más adelante.

Si se considera que la potencia no suministrada por Mazar al sistema la podría absorber la central Molino en lugar del parque generador térmico es un planteamiento de la investigación que se está desarrollando actualmente para validar el criterio a máxima eficiencia.

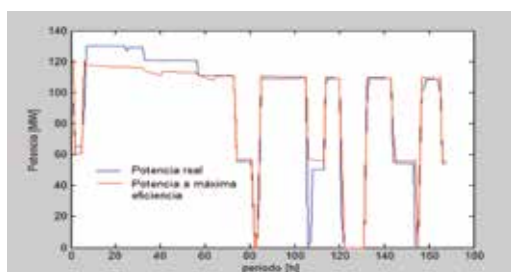


Figura 7 : Curvas de potencia real vs el modelo con el criterio de máxima eficiencia.

Las curvas de eficiencia para el caso en estudio se presentan en la Fig. 8.

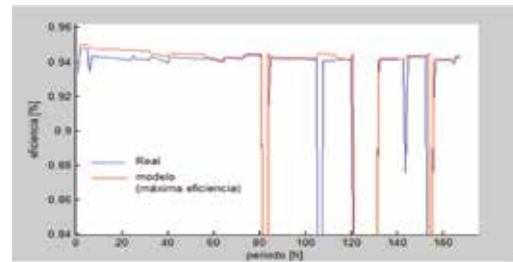


Figura 8: Curvas de eficiencia real vs el modelo con el criterio de máxima eficiencia.

Continuando con el análisis en la Fig. 9 se muestra el efecto representativo al trabajar las unidades de la central Mazar a máxima eficiencia misma que produce un incremento en el almacenamiento de agua en el embalse al final del periodo analizado, por lo tanto al trabajar con la unidades de Mazar con este criterio produciría un “ahorro de energía hidroeléctrica” visto como almacenamiento de agua en el embalse.

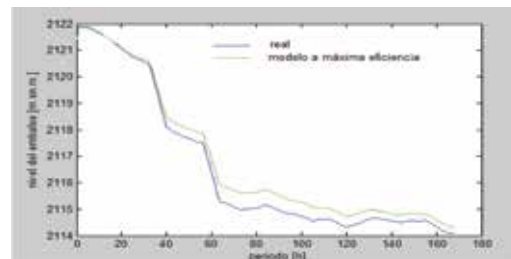


Figura 9: : Curvas de nivel del embalse real vs el modelo con el suministro de demanda programada y con el criterio de máxima eficiencia.

Adicional al análisis presentado anteriormente, se evaluó para esta presentación el modelo con dos escenarios hidrológicos adicionales, un escenario medio y otro de alta hidrología para la misma demanda, para estos escenarios en la Fig. 10 se muestran los resultados obtenidos.

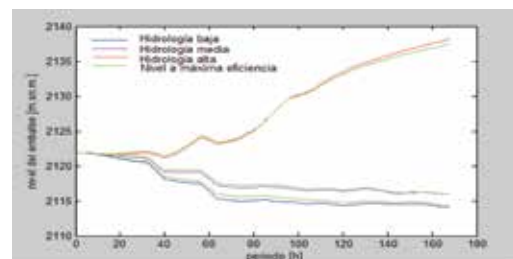


Figura 10: Curvas del nivel del embalse con escenario húmedo, medio y seco con el criterio de optimización a máxima eficiencia.

Del ejemplo para el escenario de hidrología alta existe una estimación de generación a la semana mayor que la demanda base del estudio, esto es un indicativo que ayudaría a establecer en un rango más ajustado la potencia efectiva a máxima eficiencia que podría alcanzar las unidades en temporada seca, es pertinente señalar en la actualidad por las características técnicas de la planta la potencia efectiva de las unidades va disminuyendo cuando los niveles del embalse se encuentran en cotas bajas. En la Fig. 11 se muestra de manera gráfica el resultado de potencia del escenario de hidrología alta.

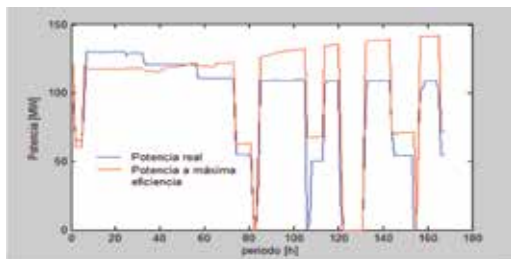


Figura 11: Potencia de las unidades de la central para el ejemplo de hidrología alta con el criterio de optimización a máxima eficiencia.

Es propicio recalcar que este documento presenta los resultados de la fase inicial de la investigación que actualmente se está desarrollando para el complejo hidroeléctrico Paute que básicamente es desarrollar un modelo que involucre la optimización de las centrales y embalses en cascada. Es decir con la optimización se tratará de encontrar un punto adecuado entre satisfacer la demanda y a la vez ser eficientes. Con los resultados del estudio global se podría validar el criterio de optimización a máxima eficiencia para el complejo hidroeléctrico Paute.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Representar la eficiencia técnica con un modelo analítico de las unidades de generación de la central Mazar como una función cuadrática de la cabeza neta y la representación de la no linealidad del nivel de la descarga de agua en el modelo facilita un tratamiento matemático para encontrar una operación óptima en la generación hidroeléctrica de las unidades en el muy corto plazo.
- De los resultados preliminares al utilizar el criterio de máxima eficiencia en un escenario de sequía al modelo puede significar un ahorro de los recursos hidráulicos de la cuenca, y por lo tanto en energía hidroeléctrica que es acumulada como agua en los embalses.
- En el escenario de corto plazo un adecuado manejo de la producción ayudaría a evitar

la presencia de comportamientos operativos indeseables tales como pulsaciones, vibraciones en la turbina, etc., y permitiría definir de una mejor manera los límites de inflexibilidad de las unidades en función de la cabeza neta.

- Cuando la turbina Francis opera para una determinada cabeza neta en un punto menos eficiente en comparación que a una descarga a máxima eficiencia, esta pérdida de eficiencia, en la turbina significa un mayor uso del recurso hídrico que es necesario para generar la potencia determinada
- El operar una unidad de Mazar, o en general, el operar una turbina Francis con el criterio de máxima eficiencia para una determinada cabeza neta es un indicador que debe ser analizado en detalle para contestar la pregunta ¿Será necesario en la actualidad ó a futuro que las unidades de la central Mazar o algunas otras del país generen a una potencia máxima o a una potencia de máxima eficiencia?
- Debido a la particularidad de la descarga de Mazar se debe buscar un mejor ajuste de la curva no lineal, para representar ciertas variaciones que se producen en la altura de la descarga cuando se producen vertimientos o incrementos del caudal del río Mazar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Díaz Francisco J., “Optimización de la operación y evaluación de la eficiencia técnica de una empresa de generación hidroeléctrica en mercados de corto plazo”. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [2] Vukosavić, D. Divac, Z. Stojanović, B. Stojanović, D. Vučković “Several Hydropower Production Management Algorithms” Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics Vol, 3 No. 1, 182-209, 2009.
- [3] Catalão, J., S. Mariano, V. Mendes y L. Ferreira, “Scheduling of Head-Sensitive Cascaded Hydro Systems: A Nonlinear Approach”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24 N° 1, pp. 337-345, Febrero 2009.
- [4] Mendes V., L. Ferreira y S. Mariano, "Short-Term Hydro Schedule with Head-Dependent Approach by a Nonlinear Model", 8th Portuguese-Spanish Congress on Electrical Engineering, 257-263, Vilamoura, Portugal, Jul. 3-5, 2003.

- [5] Díaz Javier, "La eficiencia técnica como un nuevo criterio de optimización para la generación hidroeléctrica a corto plazo," DYNA, vol. 76, no. 157, pp. 91-100, 2009
- [6] Finardi, E. C. and Da Silva, D. A. "Solving the unit commitment problem of hydropower plants via Lagrangian Relaxation and Sequential Quadratic Programming". Computational & Applied Mathematics, vol. 24, pp. 317-341, 2005.
- [7] Ni, E., X. Guan y R. Li, "Scheduling Hydrothermal Power Systems with Cascaded and Head-Dependent Reservoirs", IEEE Transactions on Power Systems, 14(3), 1127-1132(1999).
- [8] Díaz Francisco J., Lévano Federico, "Modelo No Lineal para la Óptima Generación Hidroeléctrica a Máxima Eficiencia. Un enfoque a Corto Plazo"
- [9] Perez J, Wilhelmi J. "Nolinear Self-Scheduling of a Single Unit Small Hydro Plant in the Day-Ahead Electricity Market", Departamento de Ingeniería Civil: Hidraulic y Energetic, University of Madrid.



Vicente Alejandro Llivichuzhca P.- Nació en Cuenca en 1980. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2006. Realizó sus estudios de Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad

Cuenca, y sus áreas de interés e investigación se encuentran relacionadas con la Operación económica, planificación con procesos de optimización, operación de centrales hidroeléctricas. Actualmente labora en la Unidad de Negocio Hidropaute de CELEC EP.



José Vicente Gallardo T.- Nació en Machala en 1980. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Cuenca en 2007. Actualmente se encuentra egresado de la Maestría en Administración de Empresas en la Universidad del Azuay, y sus

áreas de interés se encuentran relacionadas con la Gestión de Proyectos y la Operación de centrales Hidroeléctricas. Actualmente labora en la Unidad de Negocio Hidropaute de CELEC EP.