



Nuevo Modelaje de la Curva Colina de las Turbinas de Itaipu Binacional, para el Sistema de Control de la Operación

Ricci Eric Oviedo Sanabria, Reinaldo Andrés González Fernández
División de Programación y Estadística – OPSP.DT
Itaipu Binacional
(061) 599-2677 / 599-2733
oricci@itaipu.gov.py / gonzarei@itaipu.gov.py

RESUMEN

El rendimiento de una turbina hidráulica puede ser ecuacionado como una función no lineal dependiente del caudal turbinado y del salto bruto. Esta relación es representada a través de una superficie conocida comúnmente como curva colina. En el caso de Itaipu, un inconveniente del modelo matemático actual para el caudal turbinado es la no posibilidad de su aplicación directa (analítica) en las herramientas computacionales actuales, debido a que las ecuaciones presentan discontinuidades en la zona normal de operación de las turbinas, llevando a soluciones que no pueden ser manejadas por los compiladores utilizados durante el desarrollo de los sistemas de control de la usina. Por este motivo, el Sistema de Control de la Operación - SCO realiza actualmente este cálculo por medio de diversas interpolaciones lineales, considerando valores de potencia en el generador y salto bruto almacenados en forma de tablas. Este trabajo tiene como objetivo la presentación de un nuevo modelo matemático para las ecuaciones de las magnitudes hidroenergéticas relacionadas a la curva colina operacional de las turbinas de Itaipu. El trabajo representa una evolución en relación a modelados ya realizados anteriormente para magnitudes como el caudal turbinado, potencia en el generador, etc., en función del salto bruto. Los nuevos modelos presentan mayor precisión y mayor facilidad de implementación computacional. Particularmente para fines de simulación, para el caudal turbinado es necesario que el cálculo tenga la mayor precisión posible en relación a la curva colina, siendo cualquier error en el cálculo del caudal en una turbina, representa un error multiplicado por el número de máquinas sincronizadas. En este trabajo, los nuevos modelos matemáticos son obtenidos a partir de ajustes polinomiales de hasta 5° grado, dependiendo de la precisión deseada, siendo todos realizados a través de análisis de regresión múltiple. Los parámetros a ser presentados relacionan las siguientes variables: Potencia en la Turbina ($P_T [MW]$), Potencia a la salida del Generador ($P_G [MW]$), Rendimiento de la Turbina ($\eta_T [\%]$) e Apertura del Distribuidor ($A_D [\%]$), en función al Caudal Turbinado ($Q_T [m^3/s]$) y el Salto Bruto ($h_b [m]$). El trabajo propone también nuevas ecuaciones para el Q_T en función de la P_G y h_b disponible. Además, es modelada una curva de rendimiento del conjunto turbina-generador de orden cuadrático para ser utilizada en funciones de optimización, debido a su facilidad de indicar un punto de máximo relativo a la derivada de la ecuación.

PALABRAS CLAVES: Itaipu Binacional, Turbinas Hidráulicas, Curva Colina, Análisis de Regresión Múltiple, Rendimiento.

1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento de una turbina hidráulica se puede resolver como una función no lineal dependiente del caudal turbinado y del salto neto. Esta relación se describe mediante una curva conocida como la curva colina como se muestra en la Figura 1 [1].

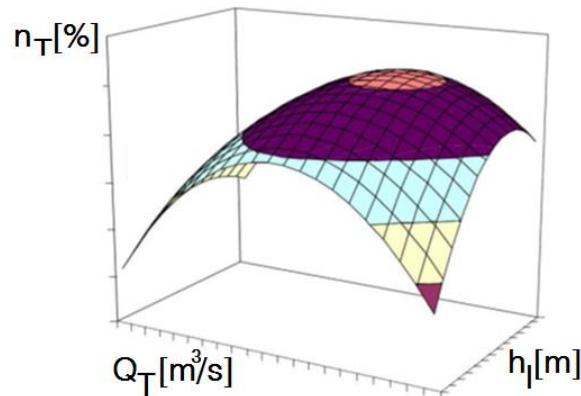


Figura 1: Curva colina de una turbina hidráulica.

Actualmente, en Itaipu el cálculo Q_T se realiza por interpolación lineal entre los valores conocidos de $Q_T = f(P_G, h_b)$ relacionadas con los puntos de la curva colina original mostrada en la NT-DMA. T-024 [2]. La NT-OPSP.DT-01C/2002 [3] propone un modelo matemático que predice P_G en función del Q_T y h_b mediante el ajuste a una ecuación de 3^{er} grado, pero en dos fajas independientes en la curva colina. Este modelo presenta dificultades en la obtención de Q_T , ya que se obtiene mediante el cálculo de las raíces de la ecuación de grado 3^o que, cuando se insertan en el sistema SCO-SCADA [4], generan problemas numéricos en ciertos rangos de operación, lo cual impide su uso. Por otra parte, los modelos presentados en [3] y [2] no relacionan A_D y η_T con las demás magnitudes hidroenergéticas.

2. MODELO MATEMÁTICO.

Para la definición del modelo matemático fue utilizada la curva colina original de las turbinas de las unidades generadoras U01 a U09 del sector 50Hz y U10 a U18 del sector 60Hz. Esta curva se presenta en la Figura 2. Fue considerado un salto líquido (h_l [m]) mínimo de 82,9m y máximo de 126,7m y la potencia en la turbina variando de 0 a 800MW, donde la obtención de los puntos de las curvas de potencia en la turbina, apertura de las paletas del distribuidor A_{PD} y rendimiento en la turbina fueron obtenidos con la ayuda de un software computacional capaz de capturar dichos puntos y ajustarlos a un plano cartesiano, obteniéndose así las relaciones entre las magnitudes en función al Q_T y h_l , siendo $P_T = f(Q_T, h_l)$ [MW] y $A_{PD} = f(Q_T, h_l)$ [mm]. Para relacionar P_T y P_G fue utilizada la relación simplificada dada por (1) conforme presentado en [5], que considera la pérdida en el acoplamiento turbina-generator con valores estimados de temperatura ambiente y demás magnitudes eléctricas/mecánicas, donde α_1 y β_1 son constantes. Los puntos de P_G son presentados en la Figura 3.

$$P_G = P_T - \alpha_1 \times P_T^2 - \beta_1 \text{ [MW]} \quad (1)$$

La pérdida hidráulica (Δh) se refiere a la reducción de energía potencial por la fricción del agua al recorrer el interior del conducto forzado y la caja espiral. Esta pérdida se calcula considerando el largo, diámetro, curvas y rugosidad de las paredes, y es normalmente representada como función $\Delta h = k \times Q_T^2$ [m], siendo k la constante característica del sistema de aducción, lo que permite calcular todos los valores en función al salto bruto $h_b = h_l + \Delta h$ [m].

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

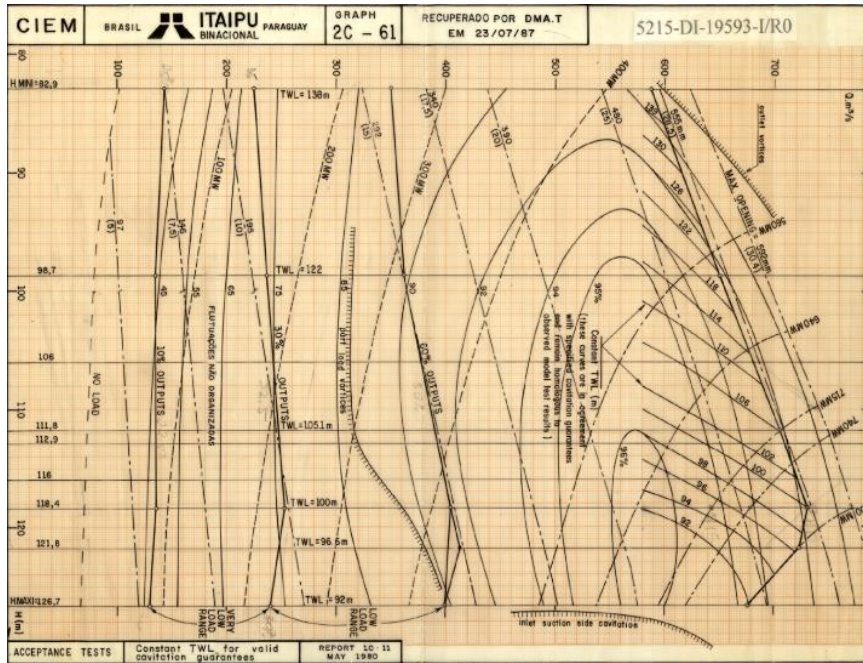


Figura 2: Curva colina de las turbinas de las unidades generadoras U01 a U09 y U10 a U18.

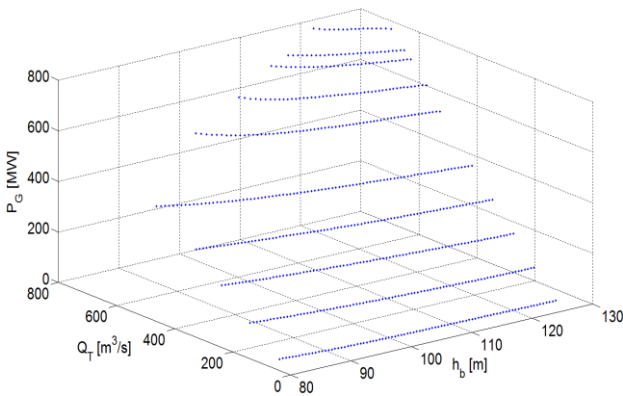


Figura 3: Puntos de P_G en función del Q_T y de h_b .

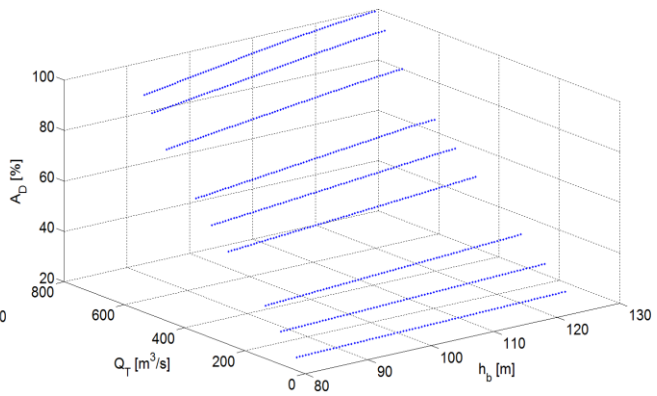


Figura 4: Puntos de A_D en función del Q_T y de h_b .

Con base en los ensayos realizados en la U18A, conforme [6], fue realizado un ajuste polinomial para obtener el valor correspondiente de la A_D en términos de desplazamiento del curso del servomotor $A_{PD}[mm]$. Esta relación fue escrita en términos porcentuales en relación a la apertura máxima del distribuidor, obteniendo se la siguiente relación, donde α_2 y β_2 son constantes:

$$A_D = \alpha_2 \times A_{PD}(Q_T, h_l) + \beta_2 \quad [\%] \quad (2)$$

Así, fue posible relacionar la A_D con el Q_T y el h_b como mostrado en la Figura 4. En el caso de los puntos de η_T , fue considerado el grafico referente a los tests realizados en los ensayos de modelo de las U9A y U18A, que son equivalentes a las demás unidades, obtenidas en [7], siendo los datos corroborados con la transposición del modelo al prototipo [8]. Los puntos obtenidos reflejan la relación entre η_T y Q_T y el h_l , pero como es de uso frecuente el uso del rendimiento del conjunto turbina generador η_{TG} , que resulta del producto $\eta_{TG} = \eta_T \times \eta_G \quad [\%]$, se presenta la relación $\eta_{TG} = f(Q_T, h_b)$, siendo los valores de η_G obtenidos de (1) y mostrados en la Figura 5. La Figura 6 muestra el η_{TG} en función a Q_T y h_b .

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

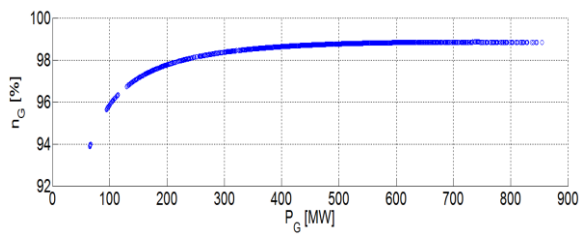


Figura 5: Puntos de η_G .

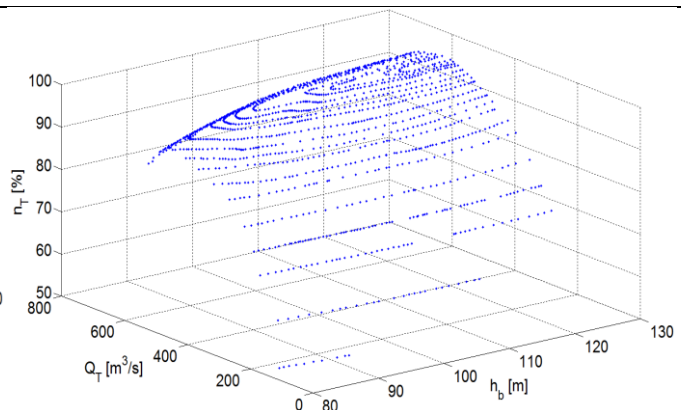


Figura 6: Puntos de η_{TG} en función del Q_T y de h_b .

En seguida los datos en tabla fueron introducidos al software computacional Matlab2013a. Fue desarrollado un algoritmo con base al modelo definido en este trabajo (que serán presentados en la Sección 3). Fue ajustada una expresión de 3^{er} grado para P_G . En el caso del Q_T , A_D y del η_{TG} fueron ajustadas expresiones de 5^o grado. En posesión del modelo ajustado fueron obtenidos los coeficientes de la ecuación matemática, utilizando el análisis de regresión múltiple [9].

3. RESULTADOS

3.1 Potencia en el Generador

En relación a los coeficientes obtenidos en [3] para la ecuación de P_G , fueron obtenidos nuevos coeficientes para una sola ecuación que cubre toda la faja operativa, siendo los datos gráficos mostrados en la Figura 7.

$$P_G = a_0 + a_1 \cdot h_b + a_2 \cdot Q_T + a_3 \cdot Q_T^2 + a_4 \cdot Q_T^3 + a_5 \cdot \frac{Q_T}{h_b} + a_6 \cdot \frac{Q_T^2}{h_b} + a_7 \cdot \frac{Q_T^3}{h_b} \quad [MW] \quad (3)$$

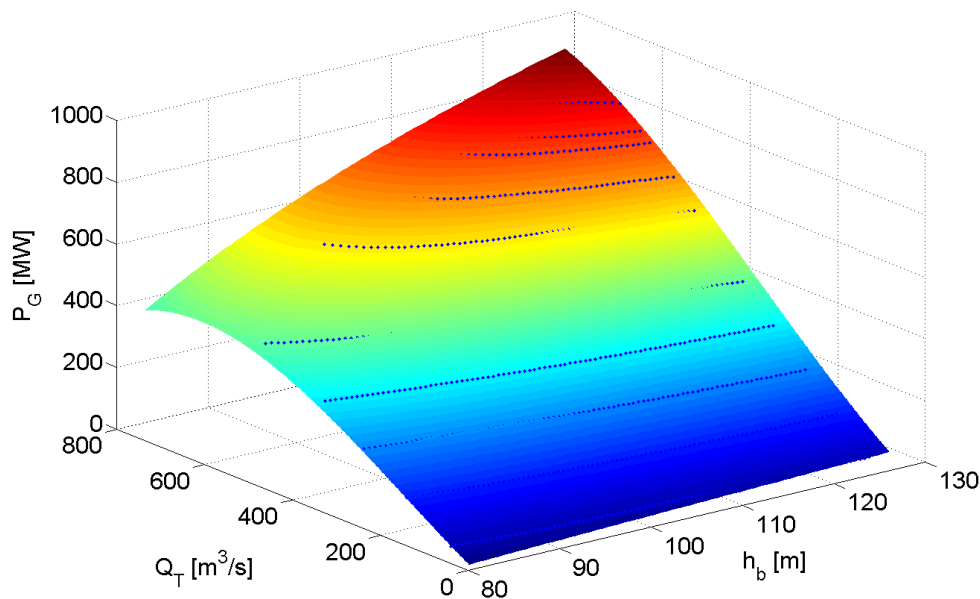


Figura 7: Ajuste matemático para P_G .

3.2 Caudal Turbinado

La propuesta en [3] para el Q_T se obtiene utilizando los coeficientes obtenidos en (3), calculando la raíz adecuada de la ecuación de 3^{er} grado, transformándola en una ecuación cubica incompleta por la transformación de Tschirnhaus [10], de la forma $A \cdot Q_T^3 + B \cdot Q_T^2 + C \cdot Q_T + D = 0$, donde A , B , C y D son coeficientes de dicha ecuación. Como resultado final se obtiene (4) que permite calcular el Q_T en función de los mismos coeficientes identificados en el cálculo de P_G . El inconveniente de esta aproximación es la introducción de funciones trigonométricas para este cálculo, por ser raíz de una ecuación de 3^{er} grado, consecuentemente generan raíces imaginarias, no pudiendo ser tratadas o utilizadas en el SCO-SCADA [4].

$$Q_T = -2 \cdot \text{COS}[\theta + 4\pi/3] \cdot \sqrt{(-X) - B/(3 \cdot A)} \quad [m^3/s] \quad (4)$$

En cambio fue realizado un abordaje diferente al analizado anteriormente, donde el modelo propuesto calcula el Q_T en función a P_G y h_b directamente, y no como raíz de una ecuación incompleta de 3^{er} grado (Figura 8). También son calculados los parámetros de la ecuación de Q_T en función a A_D y h_b (Figura 9).

$$Q_T = a_0 + a_1 \cdot h_b + a_2 \cdot P_G + a_3 \cdot h_b^2 + a_4 \cdot h_b \cdot P_G + a_5 \cdot P_G^2 + a_6 \cdot h_b^3 + a_7 \cdot h_b^2 \cdot P_G + a_8 \cdot h_b \cdot P_G^2 + a_9 \cdot P_G^3 + a_{10} \cdot h_b^4 + a_{11} \cdot h_b^3 \cdot P_G + a_{12} \cdot h_b^2 \cdot P_G^2 + a_{13} \cdot h_b \cdot P_G^3 + a_{14} \cdot P_G^4 + a_{15} \cdot h_b^5 + a_{16} \cdot h_b^4 \cdot P_G + a_{17} \cdot h_b^3 \cdot P_G^2 + a_{18} \cdot h_b^2 \cdot P_G^3 + a_{19} \cdot h_b \cdot P_G^4 + a_{20} \cdot P_G^5 \quad [m^3/s] \quad (5)$$

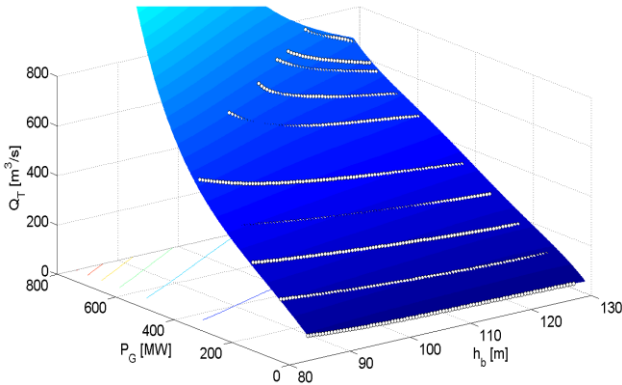


Figura 8: Ajuste del $Q_T = f(P_G, h_b)$.

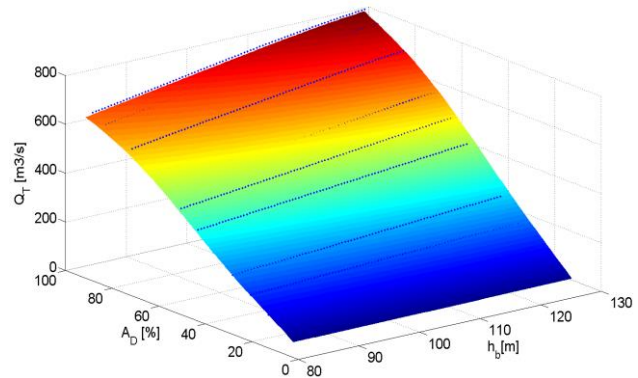


Figura 9: Ajuste del $Q_T = f(A_D, h_b)$.

$$Q_T = a_0 + a_1 \cdot h_b + a_2 \cdot A_D + a_3 \cdot h_b^2 + a_4 \cdot h_b \cdot A_D + a_5 \cdot A_D^2 + a_6 \cdot h_b^3 + a_7 \cdot h_b^2 \cdot A_D + a_8 \cdot h_b \cdot A_D^2 + a_9 \cdot A_D^3 + a_{10} \cdot h_b^4 + a_{11} \cdot h_b^3 \cdot A_D + a_{12} \cdot h_b^2 \cdot A_D^2 + a_{13} \cdot h_b \cdot A_D^3 + a_{14} \cdot A_D^4 + a_{15} \cdot A_D^5 + a_{16} \cdot h_b^4 \cdot A_D + a_{17} \cdot h_b^3 \cdot A_D^2 + a_{18} \cdot h_b^2 \cdot A_D^3 + a_{19} \cdot h_b \cdot A_D^4 + a_{20} \cdot h_b^5 \quad (6)$$

3.3 Rendimiento del Conjunto Turbina Generador

El mismo procedimiento fue realizado para η_{TG} y puede observarse el resultado en la Figura 10. Una vez obtenidos los coeficientes de la ecuación fue posible determinar η_{TG} máximo para cada h_b , como ejemplo mostrado en la Figura 11, siendo esta línea de η_{TG} máximo correspondiente a P_G óptima.

$$\eta_{TG} = a_0 + a_1 \cdot h_b + a_2 \cdot Q_T + a_3 \cdot h_b^2 + a_4 \cdot h_b \cdot Q_T + a_5 \cdot Q_T^2 + a_6 \cdot h_b^3 + a_7 \cdot h_b^2 \cdot Q_T + a_8 \cdot h_b \cdot Q_T^2 + a_9 \cdot Q_T^3 + a_{10} \cdot h_b^4 + a_{11} \cdot h_b^3 \cdot Q_T + a_{12} \cdot h_b^2 \cdot Q_T^2 + a_{13} \cdot h_b \cdot Q_T^3 + a_{14} \cdot Q_T^4 + a_{15} \cdot h_b^5 + a_{16} \cdot h_b^4 \cdot Q_T + a_{17} \cdot h_b^3 \cdot Q_T^2 + a_{18} \cdot h_b^2 \cdot Q_T^3 + a_{19} \cdot h_b \cdot Q_T^4 + a_{20} \cdot Q_T^5 \quad (7)$$

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

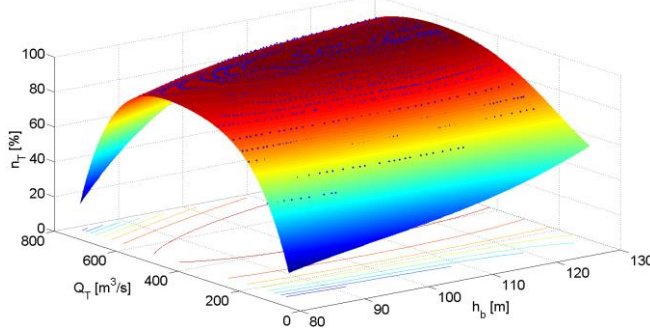


Figura 10: Ajuste η_{TG} .

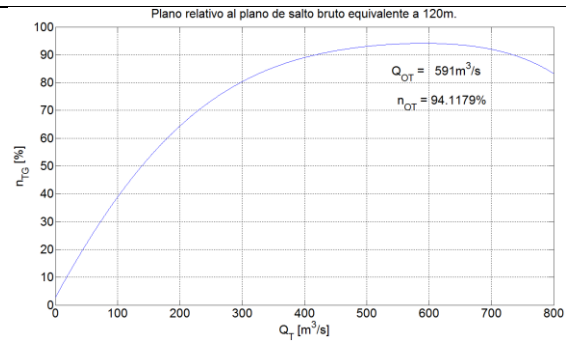


Figura 11: Ajuste η_{TG} máx.

Ya en la Figura 12 es modelada una curva η_{TG}^2 de orden cuadrático para ser utilizada en funciones de optimización, debido a su facilidad de indicar un punto de máximo relativo a la derivada de la ecuación mostrada en (8).

$$\eta_{TG}^2 = a_0 + a_1 \cdot h_b + a_2 \cdot h_b^2 + a_3 \cdot h_b \cdot Q_T + a_4 \cdot Q_T + a_5 \cdot Q_T^2 \quad (8)$$

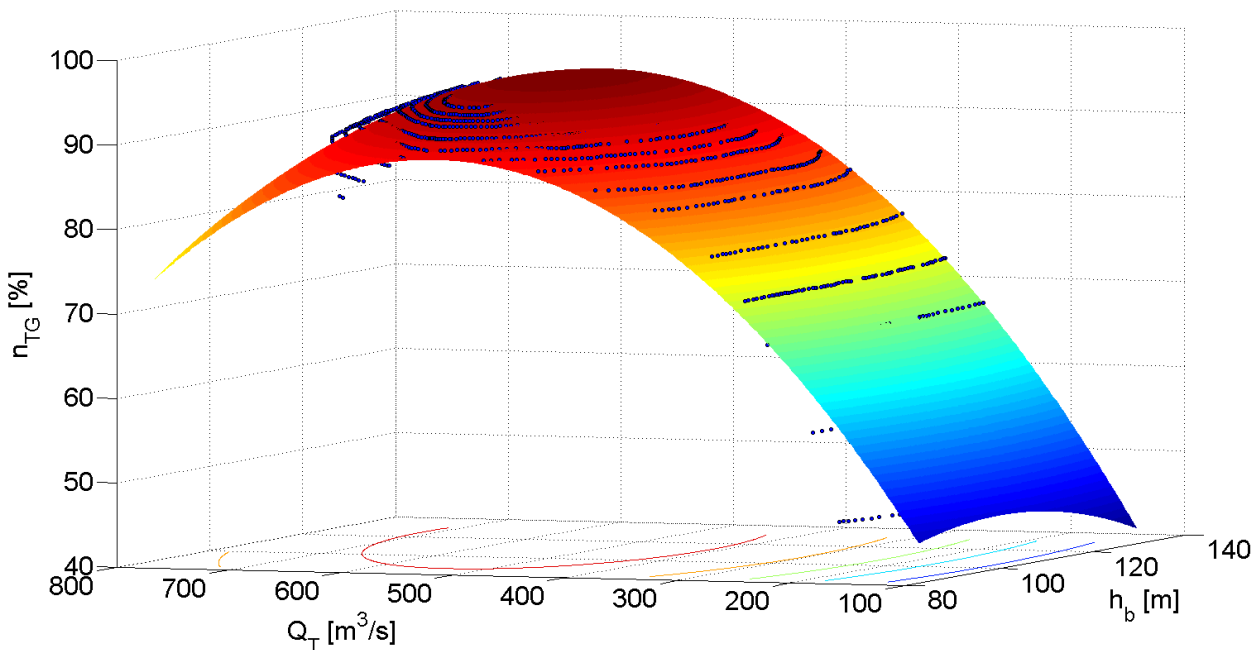


Figura 12: Ajuste η_{TG} .

4. COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ACTUAL Y EL PROPUESTO

4.1. Potencia en el Generador

Es observado en la Figura 13 que el modelo propuesto presenta errores porcentuales inferiores con comparación con el modelo actualmente utilizado en [3], tanto en los puntos en que normalmente las unidades generadoras de Itaipu son operadas (por arriba de los 420MW), como en la faja de baja carga de las unidades U01, U02 y U03 del sector 50Hz. Además el modelo propuesto como indicado anteriormente unifica las ecuaciones para el cálculo de P_G .

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

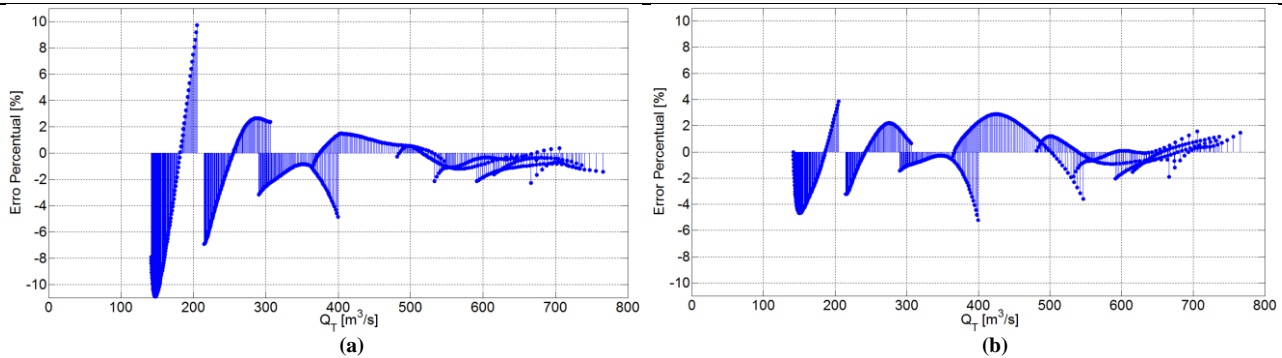


Figura 13: (a) Error % del modelo actual; (b) Error % del modelo propuesto.

4.1. Caudal Turbinado

Para el Q_T es observado un ganano significativo en toda la faja operativa en comparación con el modelo propuesto en [3], como puede ser observado en las Figuras 14 y 15.

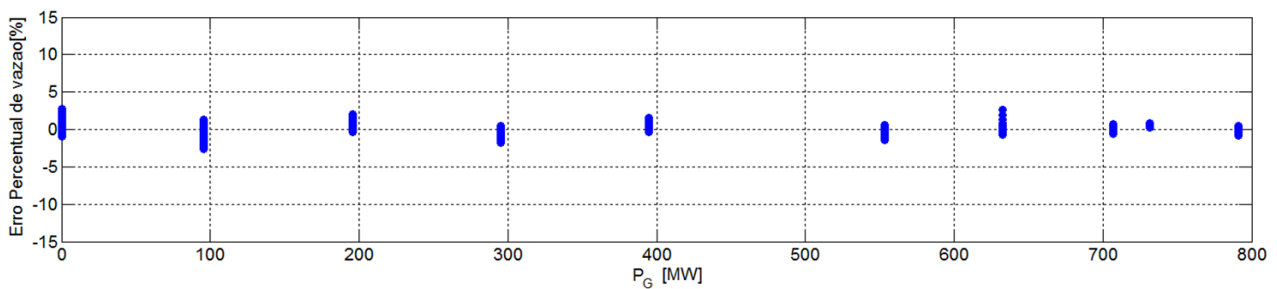


Figura 14: Error % del modelo propuesto.

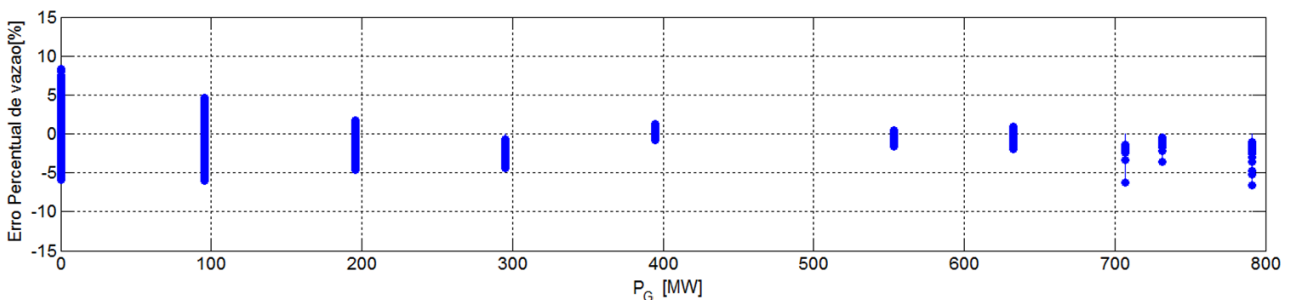


Figura 15: Error % del modelo actual.

5. CONCLUSIÓN

La formulación matemática de la relación rendimiento x caudal turbinado x salto muestra e identifica de forma clara y objetiva la curva colina para la toda la faja operativa, permitiendo obtener otras magnitudes relacionadas al conjunto turbina generador, sin perder el vínculo que la originó y con perfeccionamiento en sus valores intermedios. El modelo propuesto presenta menores desvíos para el cálculo de las magnitudes hidroenergéticas, caso comparado al modelo vigente. Además de no presentar discontinuidades en la faja operativa lo que posibilita su rápida implementación computacional. De la misma manera el modelo propuesto podrá auxiliar al Sistema SCO-SCADA, con cierta fidelidad, en los cálculos de las potencias y de los caudales turbinados, de cada unidad generadora. Así, es posible calcular de forma directa los valores de caudal turbinado, sin artificios de interpolación lineal entre valores puntuales de una tabla, aun hoy utilizados

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

en razón de la discontinuidad de la ecuación propuesta en [3]. Es constatado el ganó en varios aspectos en relación al cálculo de la potencia del generador y del caudal turbinado, debido a que los nuevos parámetros de estas ecuaciones agilizan su implementación y utilización en los sistemas afines en la usina de Itaipu. Otro ganó seria en el área de estudios, debido al menor tiempo computacional requerido para el cálculo con el nuevo modelo. Otros beneficios son reflejados en la implementación de nuevas ecuaciones a magnitudes antes no vislumbradas como el cálculo del caudal turbinado en función a la apertura del distribuidor. Además de la inserción del rendimiento del conjunto turbina generador, lo que posibilitó evidenciar una ganancia en la faja operativa óptima en relación a la propuesto en [11] como se puede observar en la Figura 16.

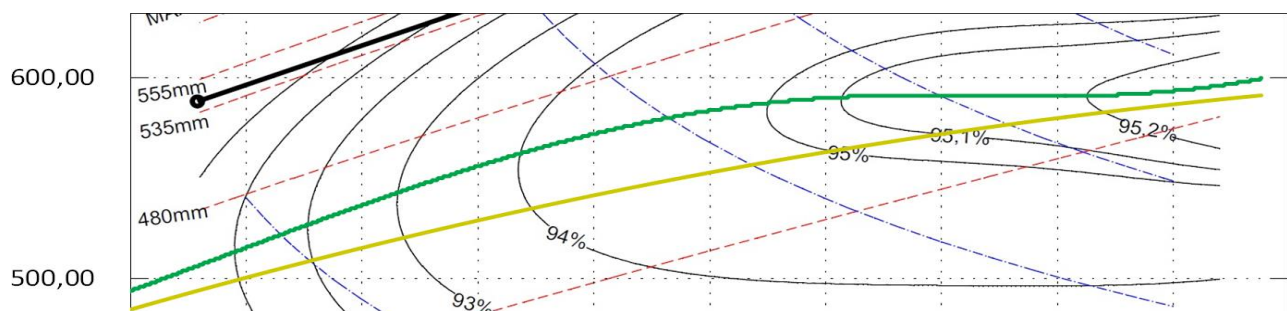


Figura 16: Comparación entre las curvas de caudal turbinado óptimo, en amarillo cálculo propuesto en [11], y en verde modelo propuesto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arce, A. - "Modelo de Otimização do Despacho de Máquinas em Usinas Hidrelétricas". Tesis de Doctorado. Campinas, SP-BR: UNICAMP, 2006.
- [2] Pereira, M. - NT-DAMT-24 "Vazão Turbinada em Função das variações da Potência Elétrica e da queda bruta".
- [3] Barbosa, C. - NT OPSP-DT 01C/2002. "Curva de Colina Operacional".
- [4] Oviedo, R e Andrade, R. OPSP.DT/2014 "Manual de Elaboração da Programação Energética".
- [5] DOC. N° 6210-83.15205 R3. "Determinação das perdas do Gerador pelo método Calorimétrico", Equação simplificada das perdas no gerador em função da Potência na Turbina determinada pela SMIM.DT.
- [6] DOC N° 5215-27-16731 "Protocolo de controle dimensional da relação de curso do servomotor e da abertura das pás".
- [7] DOC N° 5215-60-B3270-I R0 "Turbine Model Test Results, Transposition to prototype performances and validation of performance guarantees, V1, V2, V3".
- [8] DOC N° 5215-10-71611-I, 5215-10-71612-I e 5215-10-71573-I R0. "Turbine Model Test Results, Transposition to prototype performances and validation of performance guarantees".
- [9] Chapra, S. e Canale, R. "Métodos numéricos para ingenieros – 5a edición".
- [10] Garbi, G "O Romance das Equações Algébricas. São Paulo". Makron Books,1997. Método de Cardano - Tartaglia - Tschirnhaus para a resolução de Equações de 3ºGrau.
- [11] Pereira, M. - NT DOP.T 001/88 "Geração otimizada em função do rendimento das unidades geradoras".