

Índice de Producción de Energía Optimizada de ITAIPU

Pablo Daniel Cabrera Salina, Ricci Eric Oviedo Sanabria, Rafael José de Andrade

ITAIPU Binacional

Paraguay – Paraguay – Brasil

RESUMEN

En los últimos tres años se produjeron valores de afluencia muy bajos en ITAIPU, siendo los peores años desde que entró en funcionamiento la central hidroeléctrica binacional. Debido a esto, fue necesario operar ITAIPU con la mayor eficiencia posible con relación a los recursos hidroenergéticos. Esto se logró mediante la supervisión de la curva de productividad en la etapa de programación a corto plazo y durante la operación en tiempo real. Como resultado, en 2020 se alcanzó el mayor valor de productividad anual en la operación histórica de la central hasta ese entonces, equivalente a 1,087 MW/m³/s [1]. Como referencia, la productividad media histórica es de 1,035 MW/m³/s. La diferencia entre estos dos valores es de unos 0,052 MW/m³/s, lo que representa aproximadamente 3,7 TWh de producción de energía adicional considerando el mismo volumen de descarga de las turbinas del año 2020.

Sin embargo, para comparar la eficiencia en la producción de energía de la central de diferentes años, el factor de productividad puede no ser la mejor opción. Esto se debe a que los valores de productividad no son tan diferentes entre los distintos años, incluso entre un año muy eficiente y uno poco eficiente. Otro problema es que el factor de productividad es demasiado sensible al salto bruto, que no tiene relación directa con la eficiencia de la operación. En otras palabras, un año puede tener una productividad alta debido al salto bruto promedio alto, y no porque las unidades generadoras hayan operado en un rango de alta eficiencia. Otros índices han sido propuestos en el contexto de operación de Itaipu [2], pero ninguno considera la eficiencia en la operación de la central.

En este trabajo, se presenta el Índice de Producción Optimizado – IPO, el cual fue desarrollado por ITAIPU para medir el grado de optimización de la producción de energía, con baja complejidad y de fácil comprensión. El índice cuantifica la cantidad de tiempo que las unidades generadoras operan en rangos especificados de pérdidas en la curva de productividad, representados desde el 100% en el punto de operación óptima, hasta el 94% en los niveles de potencia mínima y máxima, siendo estos los puntos de operación menos eficientes. A un año (o mes) determinado se lo califica entonces con una nota de 0 a 5 según su respectiva eficiencia durante la operación en tiempo real.

Como se esperaba para periodos en donde el objetivo de la operación es la de minimizar el uso del volumen de agua almacenado en el embalse, el IPO promedio para los últimos tres años ha alcanzado una nota de 4,91 en esta escala; mientras que para el 2016, un año caracterizado por altas afluencias y en donde el objetivo era la maximización de la generación, se obtuvo una calificación de 4,04.

Los cálculos han sido implementados mediante la utilización de la herramienta OSIsoft PI-Asset Framework, que se encarga de recoger los datos de producción de energía de cada unidad generadora; además de magnitudes hidrológicas como el nivel del embalse, nivel del canal de fuga, el caudal turbinado por cada unidad, etc. Una vez realizados los cálculos, estos son procesados y enviados a una base de datos que permite su visualización en tiempo real a través de las herramientas PI-Process Book y Tableau.

PALABRAS CLAVE

Índice de operación, ITAIPU Binacional, Centrales hidroeléctricas, curva colina, optimización.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1. INTRODUCCION

La idea del Índice de Producción Optimizada - IPO y de los cálculos involucrados en el proceso se basan en los modelos desarrollados para la curva de colina de las turbinas de ITAIPU, y en los conceptos de productividad máxima y rangos de operación. En [3] y [4], respectivamente, se presentaron detalles de la teoría, la metodología adoptada y los resultados obtenidos. A continuación, se discuten brevemente algunos conceptos importantes detallados en [3] y [4].

2. CURVA COLINA Y DE PRODUCTIVIDAD

2.1 Curva Colina

El rendimiento de la turbina es una medida de la relación entre la energía mecánica producida y la energía potencial del agua descargada. El rendimiento de la turbina suele representarse en función del salto líquido y el caudal turbinado, lo que suele conocerse como "curva de la colina" [5], tal como se representa en la Figura 1: **Curva colina de las turbinas de ITAIPU** [3].

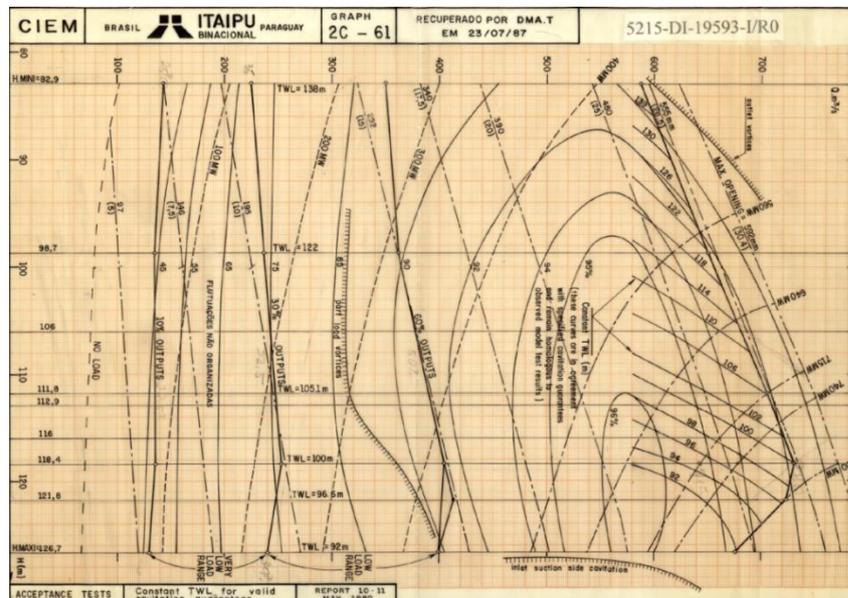


Figura 1: Curva colina de las turbinas de ITAIPU

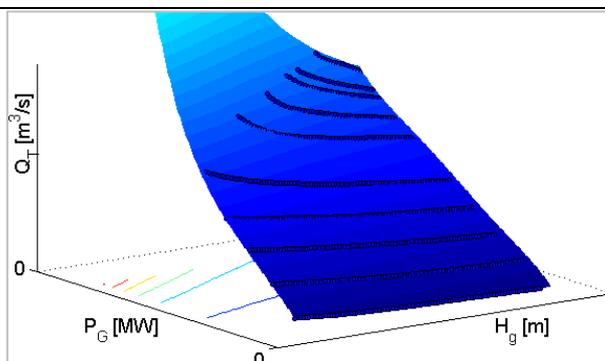
En el Programación Diaria de la Operación [6], los valores obtenidos de las simulaciones corresponden al caudal turbinado Q_T , teniendo como datos de entrada la potencia por unidad generadora, los niveles del canal de fuga h_f y del embalse h_e (para calcular el salto bruto H_b), según la Ecuación 1.

$$H_b = h_f - h_e \quad (1)$$

En [3] se presentó un nuevo modelo matemático para calcular el caudal turbinado. Esta función depende del salto bruto y la potencia de salida del generador, como indica la Ecuación 2.

$$Q_T = f(P_G, H_b) \quad (2)$$

Esta ecuación resultó ser más precisa, más fácil de aplicar y más eficiente en términos de tiempo de cálculo. Por lo tanto, se utilizó como base para crear la curva de productividad. La **Figura 2** muestra la superficie ajustada según la Ecuación 2.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
 23 y 24 de Junio 2022

 Figura 2: Superficie ajustada para $Q_T = f(P_G, H_b)$.

2.2 Curva de Productividad

La productividad es la relación que se establece entre la potencia en el generador y la descarga de agua de la turbina en un respectivo punto de operación, siendo un buen indicador del uso del agua; pues cuanto mayor sea su valor, mayor será la potencia producida con el mismo caudal turbinado [4]. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, estos valores son muy sensibles al salto bruto, por lo que no es un buen parámetro para indicar la eficiencia del funcionamiento de la central.

Teniendo en cuenta esto, se presentó una transformación de la curva de colina en [4], donde se introduce el concepto de productividad máxima, equivalente al punto óptimo de operación, además del concepto de rangos operativos. Estos rangos se determinaron en función de las pérdidas porcentuales, dadas en función de la productividad máxima.

En el caso de ITAIPU, se definieron los siguientes rangos de operación: óptimo, para el punto óptimo ($P_G = OP_G$) 0% a 1,0%; intermedio, con un intervalo entre 1,0% y 3,0%; y bajo, entre 3,0% y 6,0%. Estos rangos se muestran en la Figura 3: **Puntos de operación de una unidad generadora de ITAIPU, dado un salto bruto** en verde, amarillo y rojo, respectivamente. Como ejemplo, se presentan dos puntos de operación diferentes para el mismo salto bruto. En el *Punto 1* la potencia producida por el generador es la máxima ($P_G = P_{Gmax}$) y la pérdida con relación al punto óptimo es equivalente al 6%; de la misma manera, en el *Punto 2* la potencia producida es la mínima ($P_G = P_{Gmin}$), con la misma pérdida del 6% con relación al óptimo, indicando una simetría en cuanto a las pérdidas.

Para implementarlo en la programación diaria y en la operación en tiempo real, fue posible crear un gráfico de dispersión con los puntos de operación de las unidades generadoras para cada sector, 50Hz y 60Hz, respectivamente, ajustándolos a los mismos ejes indicados en la curva de productividad. Esto contribuye a la toma de decisiones en busca de la maximización de la productividad y, en consecuencia, a la optimización del uso del agua [4].

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

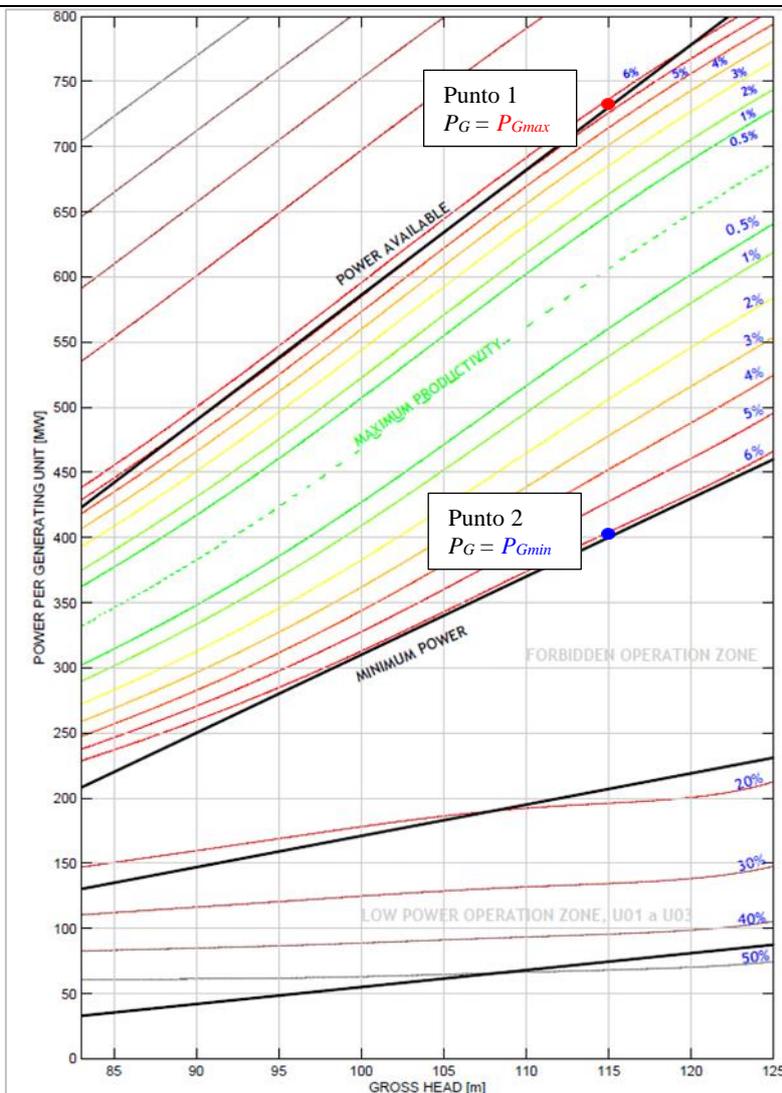


Figura 3: Puntos de operación de una unidad generadora de ITAIPU, dado un salto bruto

En la Figura 4 se muestra otro uso del rango óptimo. Las líneas de puntos azules resultan de la multiplicación de las pérdidas de 1% con respecto al punto óptimo, por el número de unidades generadoras sincronizadas en cada sector, delimitando el funcionamiento óptimo en un momento determinado. Además, el programa de suministro [6] se representa en color morado, y lo que se está ejecutando en tiempo real se ilustra en verde. Esta representación muestra la región en la que debe mantenerse la generación (en la medida de lo posible) para obtener la optimización del uso del agua. También es posible evaluar las pérdidas por unidad generadora, como se muestra en la Figura 5.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

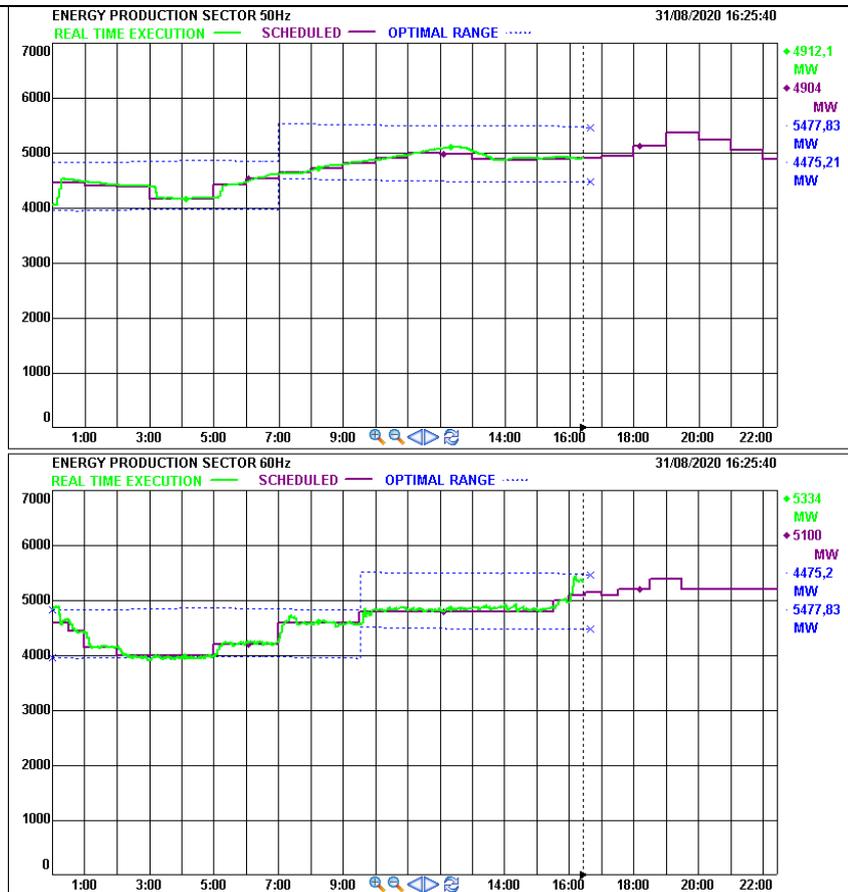


Figura 4: Representación del rango óptimo de operación por sector

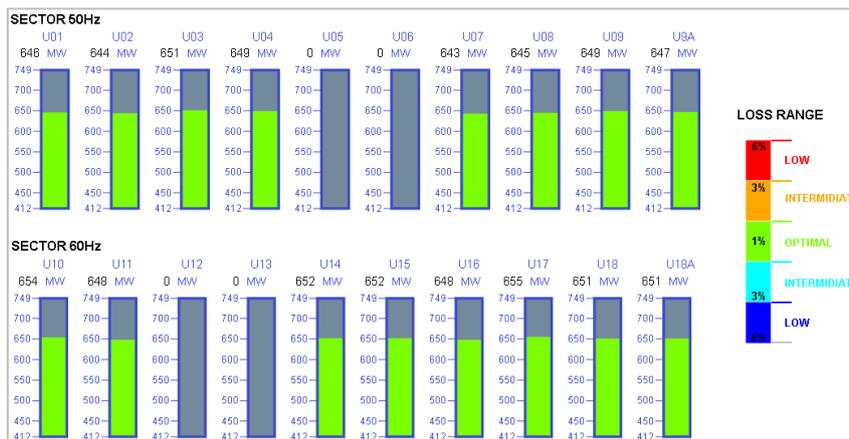


Figura 5: Representación de los rangos de operación por unidad generadora

La curva de productividad propuesta en [4] muestra el rango de potencia en el que debe operar una unidad generadora para obtener la mayor productividad posible, para cualquier salto bruto disponible en un momento dado, para todo el rango de operación. Con esto, el efecto introducido por el salto bruto se anula. Sin embargo, el gráfico de productividad sólo muestra las pérdidas instantáneas; por lo tanto, seguía siendo

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

necesaria una herramienta para cuantificar la eficiencia de la operación considerando un determinado intervalo de tiempo.

3. INDICE DE PRODUCCION DE ENERGIA OPTIMIZADA

El Índice de Producción Optimizada (IPO) resume en un valor numérico la eficiencia en el uso de los recursos hidroenergéticos de ITAIPU, como el caudal afluente y el volumen almacenado en el embalse. El control de la eficiencia en la producción de energía es útil durante los períodos de bajas afluencias o cuando hay una restricción para el uso del volumen de agua almacenado. Para desarrollar el IPO, se han utilizado los mismos cálculos y conceptos utilizados para obtener la curva de productividad.

El IPO cuantifica la cantidad de tiempo que las unidades generadoras operan en rangos específicos de pérdidas en la curva de productividad, representados desde el 100% en el punto óptimo de operación, hasta el 94% en los puntos de potencia mínima y máxima. Dado un año (o mes) determinado se califica de 0 a 5 según su respectiva eficiencia de operación (ecuación 6). El grado 5 se indica si el índice es igual o superior al 99%, y el grado 0 si es del 94%. Entre el 94% y el 99%, se asigna una calificación proporcional.

Considerando todo lo anterior, es posible calcular el IPO, como se indica a continuación:

$$U_i(T) = \frac{P_{G_i}(T)/Q_{T_i}(T)}{OP_G(H_b(T))/OQ_T(H_b(T))} \quad (3)$$

$$Total_U(T) = \sum_{i=1}^{20} U_i(T) \quad (4)$$

$$IPO(T) = 100 \times \frac{Total_U(T)}{NGU_Sinc(T)} [\%] \quad (5)$$

$$NOTA = \min [\max [IPO - 94\% ; 0] ; 5] \quad (6)$$

Sujeto a:

$$U_i(T) = \begin{cases} 0, & \text{si } i \neq \{1,2,3\} \\ U_i(T), & \text{si } i = \{1,2,3\} \\ U_i(T), & \text{si} \end{cases} \quad \begin{matrix} y \\ y \\ \end{matrix} \quad \begin{cases} P_{G_i}(T) < P_{Gmin}(H_b(T)) \\ P_{GminBC}(H_b(T)) \leq P_{G_i}(T) \leq P_{GmaxBC}(H_b(T)) \\ P_{Gmin}(H_b(T)) \leq P_{G_i}(T) \leq P_{Gmax}(H_b(T)) \end{cases}$$

Donde:

i	Unidad Generadora $i \rightarrow i = 1, 2, 3, \dots, 20$.
T	Periodo de tiempo, ej. 15 minutos.
$H_b(T)$	Salto bruto promedio en el periodo T .
$P_{Gmin}(H_b(T))$	Potencia mínima para cada H_b en el periodo T .
$P_{Gmax}(H_b(T))$	Potencia máxima para cada H_b en el periodo T .
$P_{GminBC}(H_b(T))$	Potencia mínima en rango de baja carga para las unidades U01, U02 y U03 ¹ .
$P_{GmaxBC}(H_b(T))$	Potencia máxima en rango de baja carga para las unidades U01, U02 y U03 ¹ .
$P_{G_i}(T)$	Potencia promedio de la unidad generadora i en el periodo T .
$Q_{T_i}(T)$	Caudal turbinado promedio de la unidad generadora i en el periodo T .
$U_i(T)$	Aprovechamiento en la operación de la unidad i en el periodo T .
$OP_G(H_b(T))$	Potencia óptima para el salto bruto H_b en el periodo T .
$OQ_T(H_b(T))$	Caudal turbinado óptimo para el salto bruto H_b en el periodo T .

¹ Las unidades generadoras U01, U02 y U03 fueron construidas para ser capaces de operar en un rango de baja carga, por un número limitado de horas al año.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

$Total_U(T)$	Aprovechamiento total en el periodo T .
$NGU_Sinc(T)$	Número de unidades generadoras sincronizadas.
$IPO(T)$	Índice de producción optimizada en el periodo T .

En la Figura 6, se muestra la aplicación del IPO para ITAIPU y para cada uno de los sectores en tiempo real. En este día en particular, la eficiencia en la producción de energía se mantiene dentro del rango de pérdidas menores al 1%, resultando en un índice IPO con nota 5.

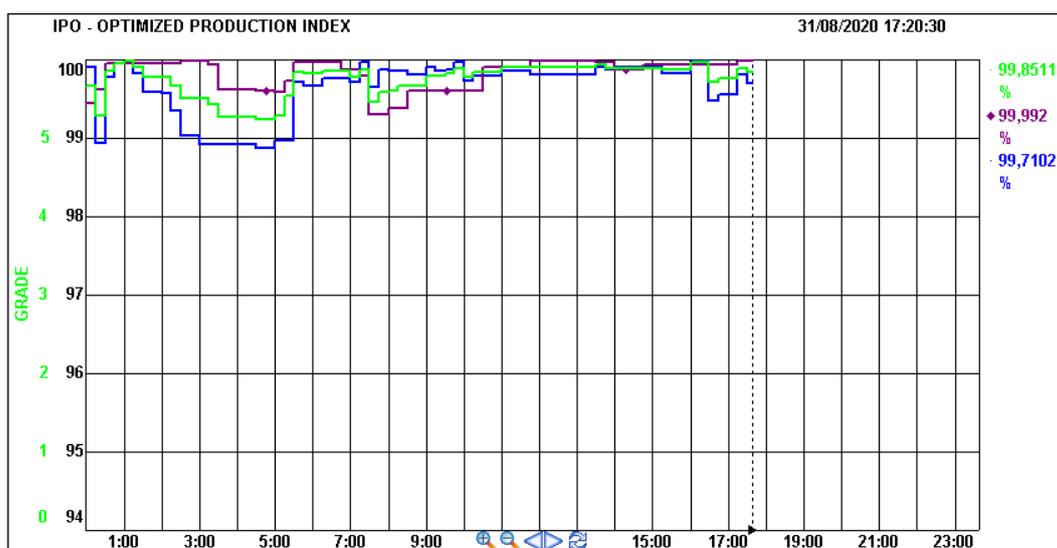


Figura 6: Uso del IPO en tiempo real

4. RESULTADOS

En esta sección, se presenta un ejemplo del IPO y su cálculo en tiempo real. Se utilizaron como base de comparación los años 2016 y 2020, siendo 2016 el año de mayor producción en ITAIPU [4], y 2020 el de mayor productividad hasta ese entonces. Para comparar estos dos años, los cálculos del IPO fueron realizados para intervalos de 15 minutos, agregados a una base diaria, considerando el caudal afluente al embalse y el vertido. A lo largo de cada año, de acuerdo con el régimen hidrológico del río Paraná, el periodo comprendido entre diciembre y abril se caracteriza por una mayor pluviosidad, denominado período húmedo, observándose una menor pluviosidad en los demás meses, denominándose este como período seco [7].

En la Figura 7.a, se presenta el caudal afluente al embalse, el vertido y el IPO para el año 2016. Ese año se caracterizó por una gran afluencia, especialmente en el periodo seco; un periodo en el que la afluencia suele ser menor. En este tipo de escenarios, el objetivo de la operación es maximizar la generación para minimizar el caudal vertido y aprovechar la disponibilidad de los recursos hidroenergéticos. Es posible observar el resultado de esta política de operación en el IPO, que presenta valores más bajos. La Figura 7.b presenta el IPO y el salto bruto en ITAIPU durante 2016.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

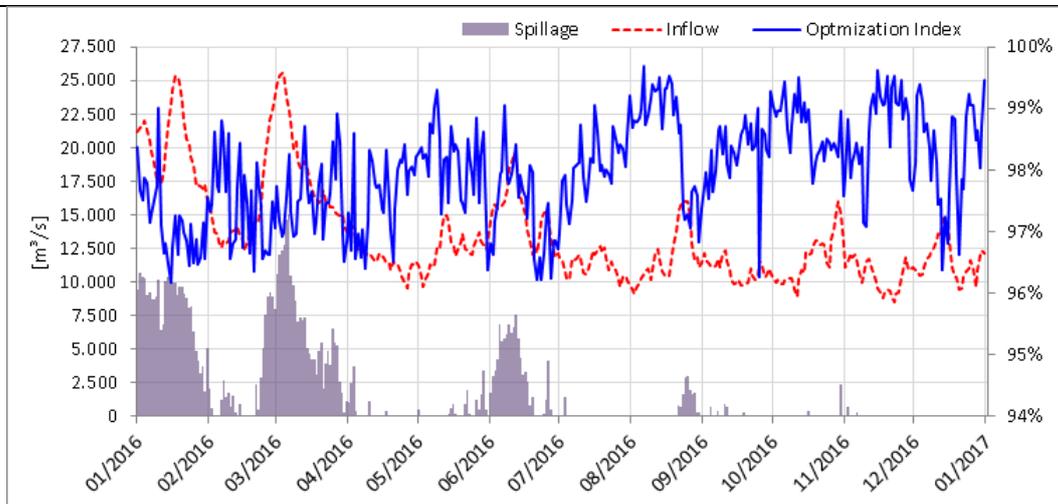


Figure 7.a – Caudal afluyente a ITAIPU, vertido e IPO en el 2016.

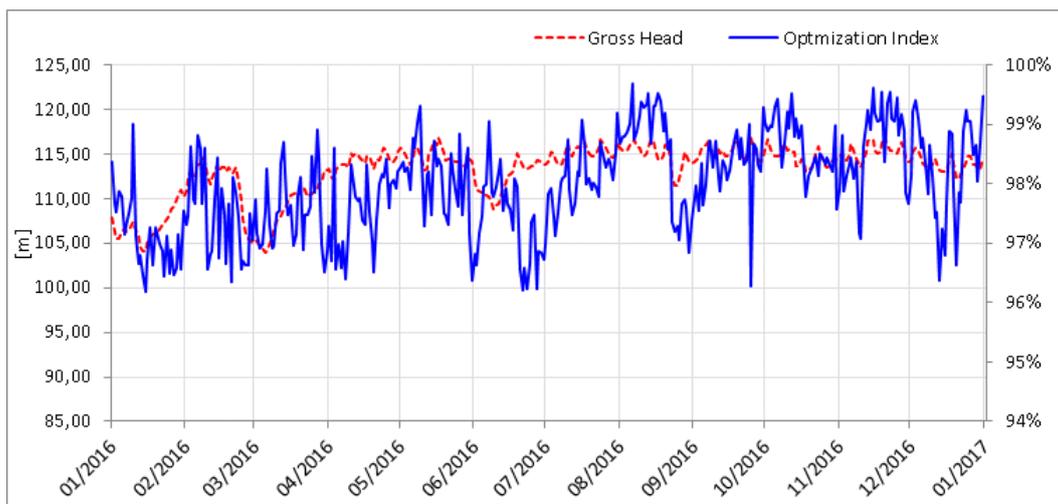


Figure 7.b – Salto bruto en ITAIPU e IPO en el 2016.

Por el contrario, en 2020 se produjeron valores de afluencia muy bajos en ITAIPU, convirtiéndose en el peor año desde que entró en funcionamiento la central hasta ese entonces. Debido a esto, fue necesario operar ITAIPU con la mayor eficiencia posible con relación a los recursos hidroenergéticos. En la Figura 8.a, es posible observar que, en este escenario, se hizo el máximo esfuerzo para optimizar la producción de energía con los recursos disponibles. Así, el IPO presentó valores más altos, indicando que este objetivo fue alcanzado. Cabe destacar los valles del IPO en los meses de abril y julio, donde en ambos casos fue necesario operar una unidad generadora en régimen de baja carga; en abril la carga se vio severamente reducida debido a la pandemia del COVID-19, resultando en la imposibilidad de operar en puntos más eficientes por el número mínimo, definido por instrucción, de unidades generadoras sincronizadas en el sector 50Hz; mientras que en julio, fue necesario la operación en baja carga de una unidad generadora por configuración de la GIS 50Hz, debido al mantenimiento de una barra 500kV. La Figura 8.b muestra el IPO y el salto bruto en ITAIPU durante el año 2020.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

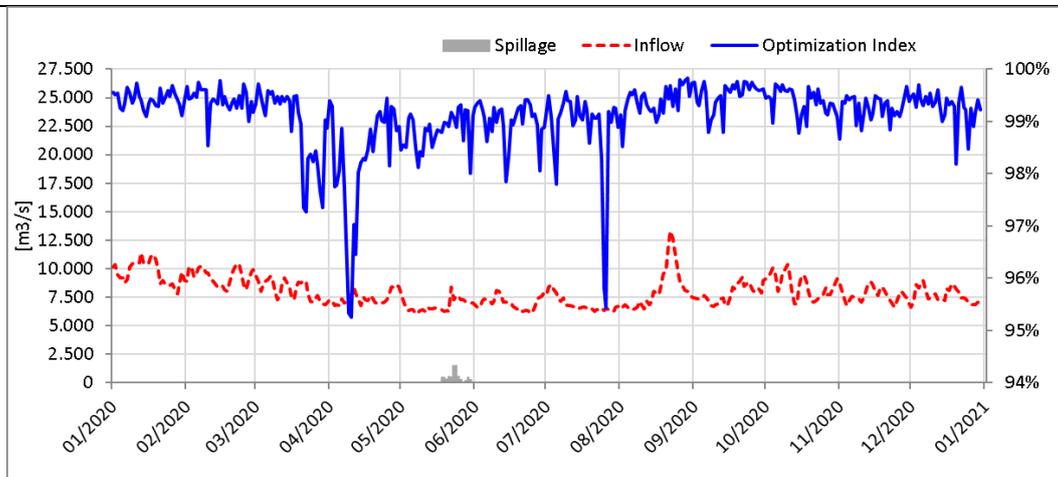


Figure 8.a – Caudal afluyente a ITAIPU, vertido e IPO en el 2020.

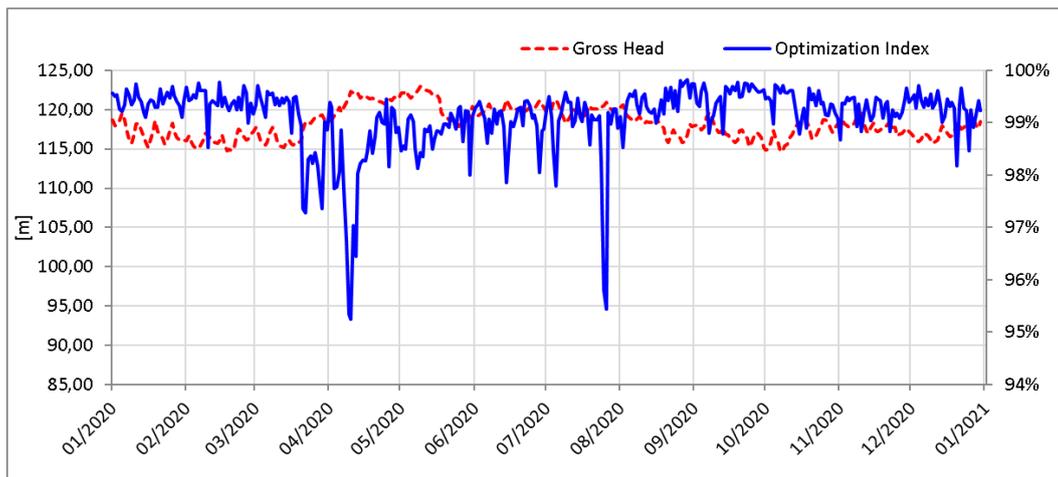


Figure 8.b – Salto bruto en ITAIPU e IPO en el 2020.

Esto se logró mediante el control de la curva de productividad en la etapa de programación a corto plazo y durante la operación en tiempo real. Como resultado, en 2020 se alcanzaron los valores más altos de productividad anual hasta entonces y el mayor valor de IPO desde su implementación, iguales a 1,087 MW/m³/s [1] y 99,12% (nota 5), respectivamente. Como referencia, la productividad media histórica es de 1,035MW/m³/s. La diferencia entre estos dos valores es de unos 0,052 MW/m³/s, lo que representa aproximadamente 3,7 TWh de producción de energía adicional considerando el mismo volumen de agua.

En la Figura 9, se muestran los valores de IPO mensuales y anuales de 2015 a 2020. Se puede observar que el IPO de 2020 es el más alto de los últimos 6 años.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

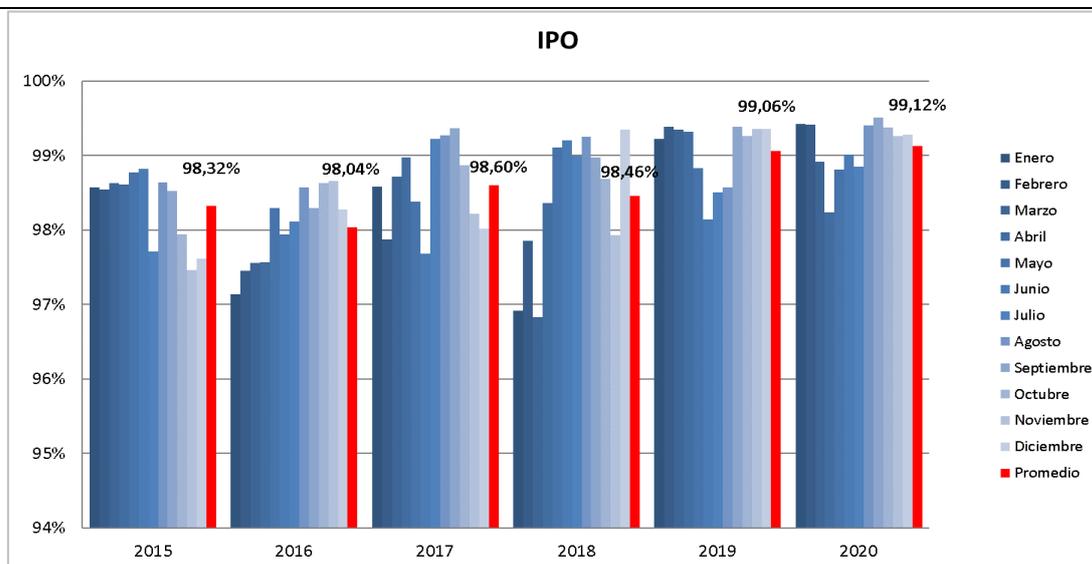


Figure 9 – Comparación de los años en el periodo de 2015 a 2020.

5. CONCLUSIÓN

Este trabajo presentó el Índice de Producción Optimizada - IPO, que fue desarrollado para medir el grado de optimización de la producción de energía, con baja complejidad y fácil comprensión. El índice IPO utiliza la curva de productividad, que representa las pérdidas de cada unidad generadora en un determinado punto de operación. En períodos de baja afluencia, como en 2020, cuando se requiere la optimización del uso de los recursos hidroenergéticos disponibles para ITAIPU, el IPO auxilia en el monitoreo dinámico de este objetivo en conjunto con el uso de la curva de productividad.

La curva de productividad auxilia en la observación del punto de operación de las unidades generadoras de cada sector, indicando visualmente las oportunidades de mejor aprovechamiento del caudal turbinado. La implementación del IPO permite explicar, cuando sea necesario, a todos los agentes del proceso de producción de energía la necesidad y la forma de optimizar el recurso hídrico de manera simplificada.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

BIBLIOGRAFIA

- [1] Memoria Anual 2020. ITAIPU Binacional, Paraguay, 2021, página 23.
- [2] J. Portela, P. Zanelli, S. Guerrero, F. Trevisan, H. Zarate, "Gestão da Segurança Operacional em Tempo Real Utilizando Ferramentas de Analytics: A Experiência da Itaipu Binacional", en XIX Simpósio de pesquisa operacional da marinha, Río de Janeiro, Noviembre de 2019.
- [3] R. Oviedo-Sanabria, R. González-Fernández, "Nuevo Modelaje de la curva colina de las turbinas de Itaipu Binacional, para el sistema de control de la operación" en XVII Encuentro Iberoamericano del CIGRÉ, Ciudad del Este, Mayo de 2017.
- [4] R. Oviedo-Sanabria, R. González-Fernández, R. J. de Andrade, "Uma nova abordagem da produtividade para utilização para utilização em tempo real" en XV Encontro para Debates de Assuntos da Operação - EDAO, Río de Janeiro, Noviembre de 2018.
- [5] "Optimal dispatch of generating units of Itaipu hydroelectric plant", IEEE Transactions on Power Systems Vol. 17, Agosto 2002, páginas 154-158.
- [6] R. González-Fernández, R. Oviedo-Sanabria, "Short-Term Operation Planning of the Itaipu Hydroelectric Plant considering Uncertainties", en XIX PSCC - Power Systems Computation Conference, Genova, Junio de 2016.
- [7] Resolução Normativa Nº 479, de 3 de abril de 2012. ANEEL, Brasil, 2012, página 2.