

## **Crisis hídrica 2021 – Impacto en el nivel del canal de fuga y consecuente operación de las turbinas de ITAIPU**

**Ricci Eric Oviedo Sanabria, Diogo Rafael Marques Ramos da Luz, Rafael José de Andrade**

**ITAIPU Binacional**

**Paraguay/Brasil/Brasil**

### **RESUMEN**

Desde el mes de marzo de 2020, se viene registrando una condición de sequía severa y prolongada en la cuenca del río Paraná, aguas arriba de ITAIPU y en la cuenca del río Iguazú. Como consecuencia, se observaron caudales muy bajos en el río Paraná aguas arriba y abajo de ITAIPU, más intensivamente en el año 2021.

La capacidad de almacenamiento del embalse de ITAIPU es pequeña en comparación a la capacidad máxima de caudal turbinado (es considerada una central de pasada) y la producción de energía es directamente proporcional al caudal afluente a la usina. De este modo, la producción de la central ha acompañado la tendencia de reducción de caudales afluentes, siendo observada también una disminución gradual de su descarga total, que han alcanzado valores mínimos históricos.

La operación durante la crisis hídrica del año 2021 ha llevado a que se registren valores del nivel del canal de fuga muy por debajo de los mínimos históricos. Durante la realización de simulaciones de distintos escenarios posibles de caudal afluente a la usina se han observado valores por debajo de 92 metros en el nivel del canal de fuga, faja operativa que, de acuerdo con la curva colina operacional [1], es prohibitiva para las turbinas de ITAIPU debido a la presencia de cavitación.

A medida que la cota del canal de fuga era reducida por las bajas descargas, fue observado que a cotas inferiores a los 97 metros los valores registrados se encontraban muy por encima de los valores simulados en la etapa de programación, con desvíos próximos a un metro inclusive. Esta situación ha llevado a cuestionar los resultados entregados por la ecuación original utilizada para el cálculo del nivel del canal de fuga, siendo necesaria la revisión de los datos con que fue modelada en el año 2005.

Finalmente, este artículo tiene por objetivo presentar el nuevo ajuste realizado para el modelo de simulación del nivel del canal de fuga mediante regresión lineal múltiple, a fin de mejorar el desempeño en las simulaciones para su utilización en la etapa de programación y supervisión en tiempo real, debido a la criticidad del control de este límite, a fin de evitar daños a las turbinas de ITAIPU.

### **PALABRAS CLAVE**

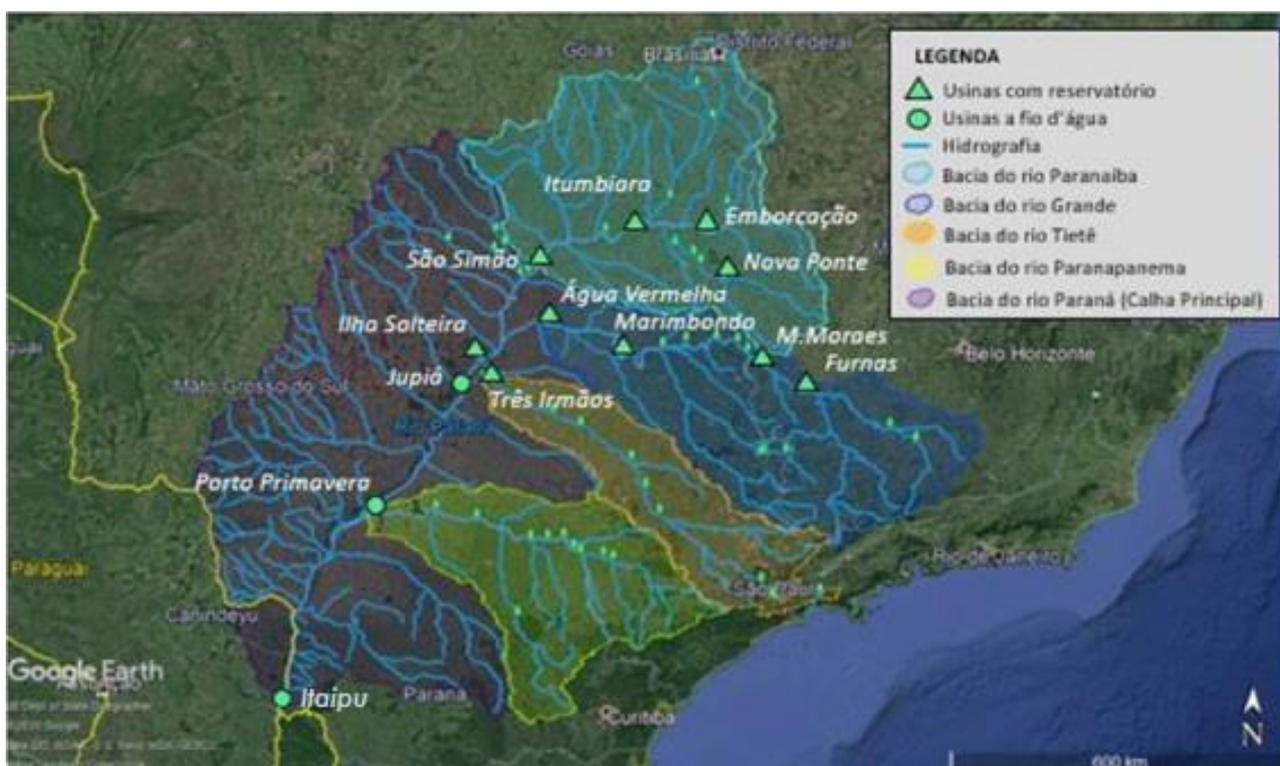
ITAIPU Binacional, cuenca hidrográfica, crisis hídrica, turbinas hidráulicas, curva colina, canal de fuga.

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

## 1. INTRODUCCIÓN

La usina hidroeléctrica ITAIPU Binacional está ubicada en la cuenca del río Paraná, en el tramo de frontera entre Brasil y Paraguay, 14 km al norte del Puente de la Amistad, entre los municipios de Foz do Iguazu, en Brasil y Hernandarias, en Paraguay.

La cuenca del río Paraná (**Figura 1**), tiene un área de drenaje de precipitaciones de 820.000 km<sup>2</sup>, abarcando las subcuencas de los ríos Paranaíba, Grande, Tietê y Paranapanema, donde se encuentran los principales embalses de regularización del Sistema Eléctrico Brasileño – SIN-BR y han experimentado la peor serie hidrológica jamás registrada en 91 años de datos. Las centrales de esta cuenca y sus respectivos embalses son sumamente importantes para el suministro de energía eléctrica tanto del Paraguay como del Brasil, ya que los recursos almacenados en ellos son capaces de garantizar el suministro de energía en los periodos secos, cuando no hay una contribución significativa de las centrales instaladas en la región Norte del Brasil, que contribuyen en atender a la demanda del Brasil durante el periodo húmedo. El conjunto de embalses de las centrales ubicadas en la cuenca del río Paraná corresponde a cerca del 76% de la capacidad máxima de almacenamiento del Subsistema Sudeste/Centro Oeste del SIN-BR y un poco más de la mitad (53%) de la capacidad de almacenamiento de energía del Brasil [2].



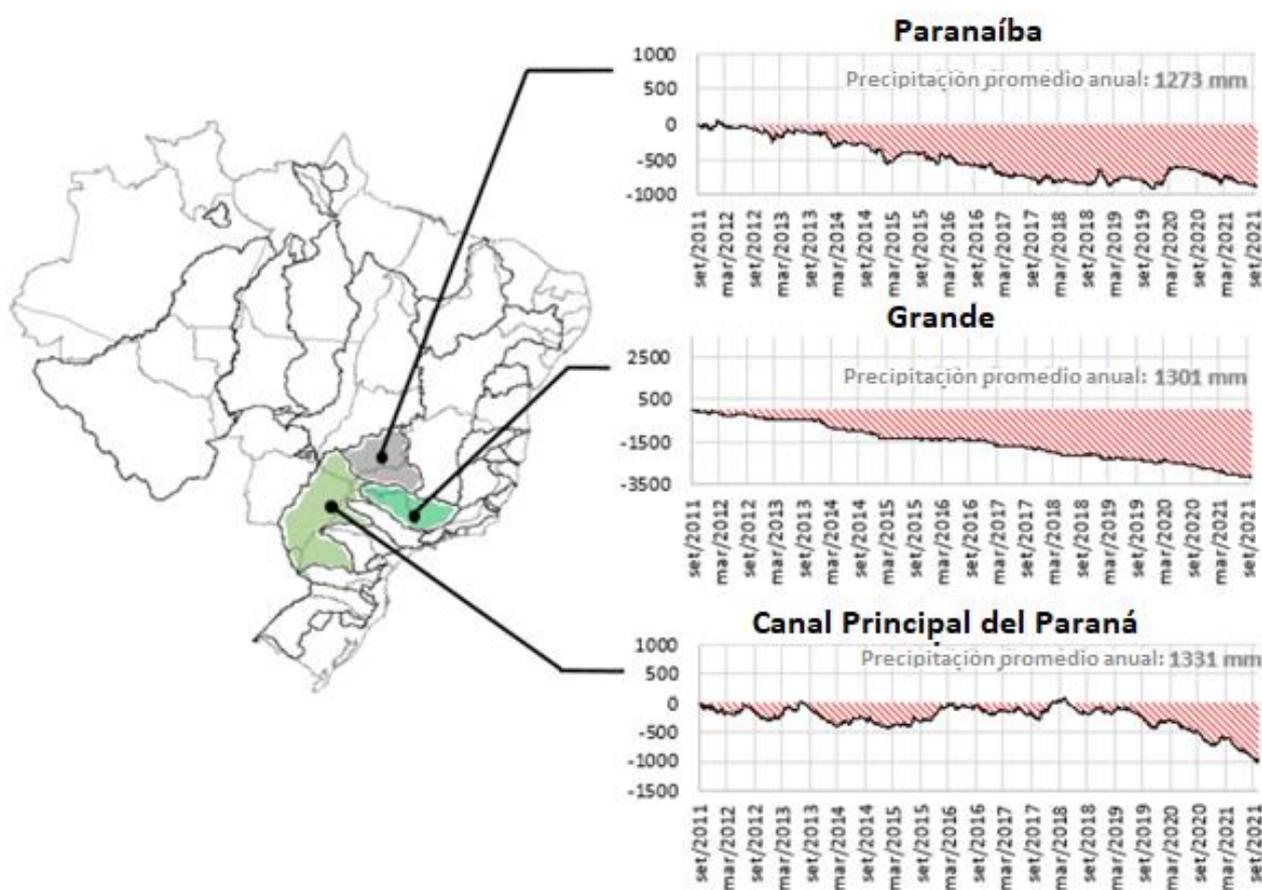
**Figura 1: Cuenca del río Paraná, delimitada a partir de la CH ITAIPU, con indicación de las centrales importantes para la gestión hidráulica**

En los ríos que componen a la cuenca del río Paraná, se encuentran dispersas 56 usinas hidroeléctricas controladas centralizadamente por el Operador Nacional del Sistema Brasileño – ONS, y de acuerdo con las políticas operativas aplicadas a estas usinas, sus descargas compondrán la porción de caudal regularizado a la ITAIPU.

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

Al caudal regularizado se agrega la porción del caudal proveniente de los ríos que desembocan en el río Paraná desde el punto de descarga de las últimas usinas hidroeléctricas aguas arriba de ITAIPU, denominado caudal incremental. De este modo, el caudal afluente a la usina está compuesto por el caudal regularizado y por el caudal incremental, siendo estos en proporción promedio de 80% y 20% para el histórico, respectivamente.

A lo largo de los últimos años, y más acentuado desde marzo de 2020, se viene registrando una condición de sequía severa y prolongada en toda la cuenca del río Paraná. El déficit de precipitación acumulado en los últimos 10 años en algunas subcuencas llega a alcanzar un valor mayor al total de lluvia que ocurre en un año en promedio como ilustrado en la **Figura 2** [2].



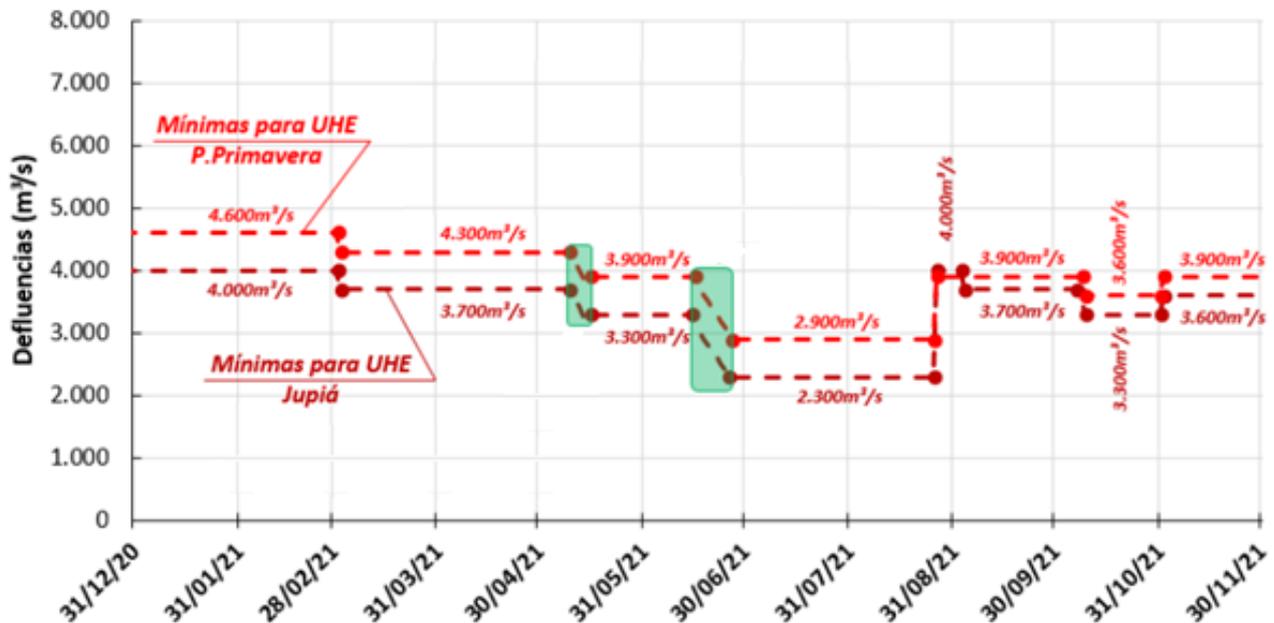
**Figura 2: Anomalía de precipitación acumulada de los últimos 10 años**

En este contexto, los caudales descargados por las usinas ubicadas en esta cuenca también acompañaron la reducción en las precipitaciones, así como de sus volúmenes almacenados. Esto resultó con que los almacenamientos de los embalses aguas arriba hayan iniciado con niveles muy bajos al año 2021, debido a las escasas precipitaciones en toda la cuenca del río Paraná durante el periodo húmedo, que abarca los meses de diciembre de 2020 a abril de 2021.

Delante de esta situación crítica el ONS ha iniciado el proceso de minimizar la generación hidroeléctrica en las usinas aguas arriba de ITAIPU de modo a preservar sus niveles de almacenamiento. Como reflejo de esta decisión operativa, se puede observar la evolución de las

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

descargas mínimas designadas a la última usina sobre la cuenca del rio Paraná aguas arriba de ITAIPU, Porto Primavera (**Figura 3**).



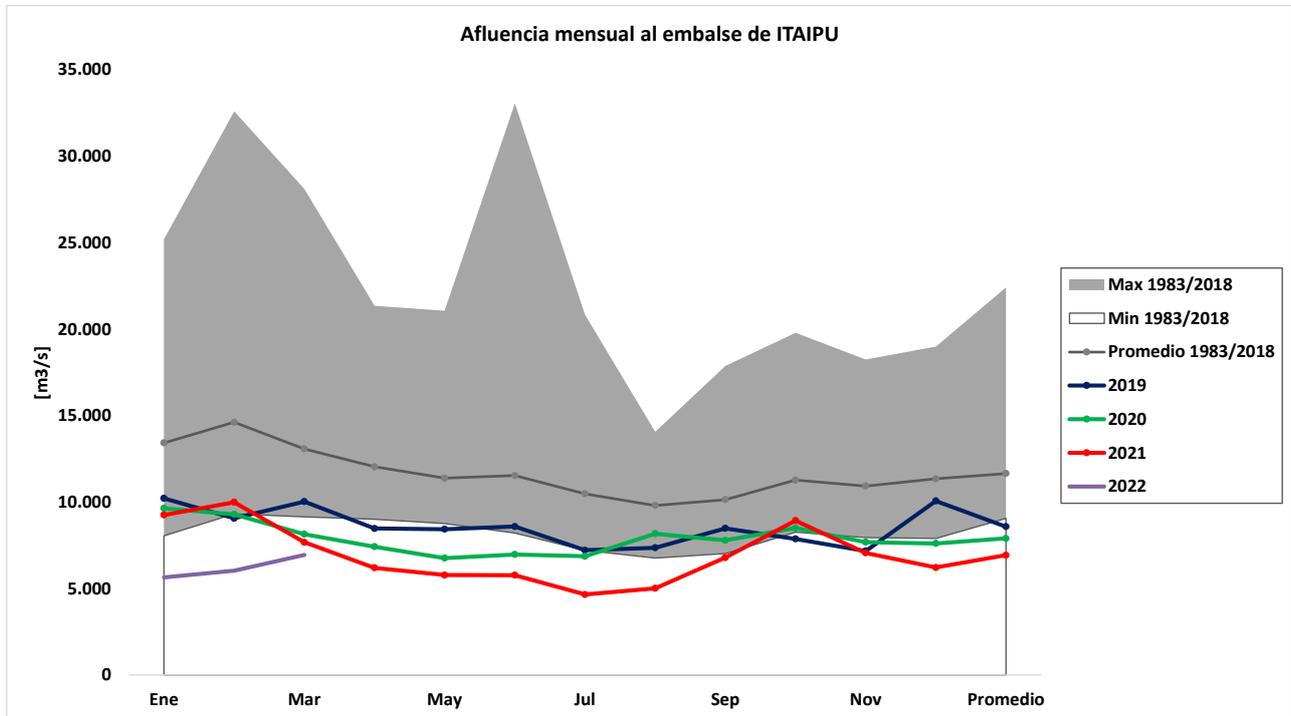
**Figura 3: Evolución de las reducciones de defluencias mínimas de las UHE Jupia y Porto Primavera**

Esta operativa también fue implementada en la descarga de ITAIPU de modo a preservar el volumen almacenado en su embalse para el periodo más crítico de la sequía esperado entre los meses de agosto a noviembre de 2021, teniendo como el objetivo principal evitar cortes de energía en el corto y medio plazo.

Además de todo esto, se hizo necesario el despacho de todo el parque de generación térmico disponible en el Brasil e importación de energía de otros países (Argentina y Uruguay) para compensar la reducción de generación hidroeléctrica, a fin de subsistir a la crisis hídrica.

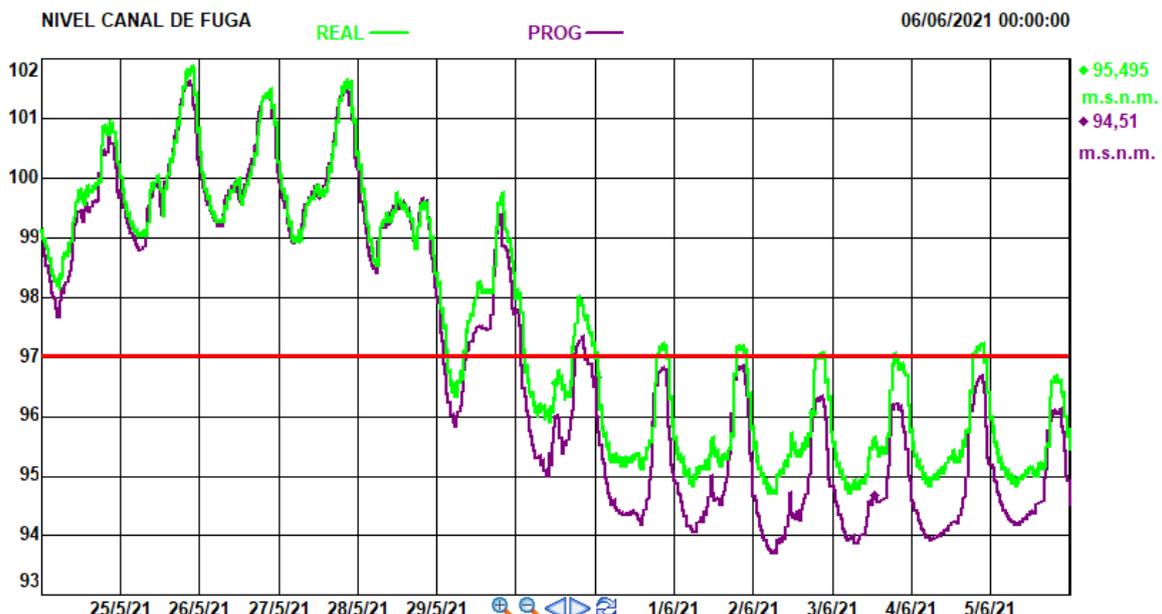
Un leve aumento del caudal al embalse de ITAIPU se produjo en los meses de enero y febrero de 2021 (**Figura 4**) durante precipitaciones registradas en la región incremental y área del embalse, indicando al parecer una posible mejoría. Pero, a lo largo de los siguientes meses se han observado significativas reducciones del caudal afluente, motivadas por la ausencia abrupta de precipitaciones además de la política operativa adoptada por el ONS en las usinas de la región SE/CO del Brasil. La crisis hídrica ha resultado en valores mínimos históricos que llegaron a su menor promedio mensual al mes de julio de 2021, donde se ha registrado un promedio de afluencia de  $4.661 \text{ m}^3/\text{s}$  y un mínimo diario de  $4.297 \text{ m}^3/\text{s}$  al día 28/07. A título comparativo, el promedio anual para el año de 2021 del caudal afluente a la usina ha sido de solamente  $6.932 \text{ m}^3/\text{s}$ , que representa 60% del promedio histórico (1983-2020) de  $11.479 \text{ m}^3/\text{s}$ .

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



**Figura 4: Serie de caudales afluentes mensuales a la ITAIPU**

A medida que se actualizaban las previsiones de afluencias del horizonte de planeamiento de corto plazo, el modelo de simulación ha dado indicio de valores en el nivel del canal de fuga inferiores a los 92 metros, valor mínimo operativo del nivel del canal de fuga de ITAIPU. A medida que el nivel del canal de fuga se reducía en tiempo real, por debajo de los 97 metros (**Figura 5**), se ha verificado que el desempeño en tiempo real del modelo de simulación se mostraba insatisfactorio, con evidencia de errores significativos.



**Figura 5: Comparativo Nivel del Canal de Fuga programado vs realizado**

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

En vista de esta situación se hizo necesario investigar con que datos fueron ajustados los coeficientes de la ecuación ajustada en el año 2005.

Al investigar sobre los datos utilizados para el modelado de la ecuación del canal de fuga, es observado que este punto de operación, por debajo de los 97 metros, no fue considerado directamente en el actual modelo utilizado para la programación y simulación en tiempo real. Este modelo fue resultado del estudio “Cálculo do Nível Jusante para efeito de Programação e Simulação da Operação” [3], que ha utilizado registros diarios del periodo de 1991 a 2004.

Con los datos observados de los últimos meses y con vistas a mejorar el modelado del estudio [3], principalmente en la faja de bajas descargas sin vertido, fue propuesto por la OPSH.DT, en la NT-OPSH.DT-2/2021 [4], un nuevo ajuste matemático para el cálculo del nivel del canal de fuga. Este ajuste divide el cálculo en tres fajas dependientes del caudal en R-11 [5], sin vertido, como sigue:

- Tramo 1A: Si el caudal en R-11 es inferior 6.200 m<sup>3</sup>/s: la ecuación es función del caudal turbinado en ITAIPU solamente.
- Tramo 1B: Si el caudal en R-11 es superior a 6.200 m<sup>3</sup>/s e inferior a 7.800 m<sup>3</sup>/s: la ecuación es una transición matemática entre la franja anterior y posterior.
- Tramo 1C: Si el caudal en R-11 es superior a 7.800 m<sup>3</sup>/s: la ecuación es la misma presentada en el estudio de 2005 [3].

La solución presentada en [4] ha obtenido resultados satisfactorios, en cambio, la transición del Tramo 1A al Tramo 1C introducía discontinuidades que podrían representar inconvenientes en su aplicación para la simulación hidroenergética de la operación de ITAIPU. Además, cuando evaluado el desempeño de la solución presentada con datos realizados, se ha observado que en rampas abruptas de descarga en ITAIPU, los resultados presentaron desvíos superiores a la tolerancia adoptada.

Visando eliminar las discontinuidades de las ecuaciones utilizadas en [4], en este trabajo fueron recalculados los coeficientes de la ecuación del estudio de 2005 [3], para el tramo sin vertido.

## 2. METODOLOGIAS

### 2.1. CÁLCULO ACTUAL 2005

El modelo actual, presentado en el estudio de 2005 [3], lleva en cuenta el histórico de mediciones en ITAIPU en el periodo de 01/01/1991 a 31/12/2004, registradas diariamente. Este fue calculado mediante análisis de regresión, considerando la observación de las variables envueltas en el periodo mencionado, llegando a los siguientes coeficientes:

$$Cota = A + B \times QV + C \times QT + D \times QR11 + E \times QV^2 + F \times \sqrt{QT} + G \times \sqrt{QR11} + H \times \left(\frac{QR11}{QT}\right) \quad (01)$$

Tramo 1: Para  $QV = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

$A = 6,9224463 \times 10^1$	$E = 0$
$B = 0$	$F = 3,5219790 \times 10^{-1}$
$C = -1,0635195 \times 10^{-3}$	$G = -1,1808503 \times 10^{-2}$
$D = 5,7690026 \times 10^{-4}$	$H = 2,7668043$

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

Tramo 2: Para  $0 \text{ m}^3/\text{s} < QV \leq 3000 \text{ m}^3/\text{s}$

$A = 6,9251781 \times 10^1$	$E = -3,9320513 \times 10^{-8}$
$B = 3,1654108 \times 10^{-4}$	$F = 3,0752732 \times 10^{-1}$
$C = -9,3723035 \times 10^{-4}$	$G = 4,5767902 \times 10^{-2}$
$D = 3,7235965 \times 10^{-4}$	$H = 2,2124227$

Tramo 3: Para  $QV > 3000 \text{ m}^3/\text{s}$

$A = 7,4207439 \times 10^1$	$E = -3,9710621 \times 10^{-9}$
$B = 1,0152555 \times 10^{-4}$	$F = 1,3871845 \times 10^{-1}$
$C = -3,6604660 \times 10^{-4}$	$G = 1,5170593 \times 10^{-1}$
$D = 1,1509472 \times 10^{-4}$	$H = 5,3318887 \times 10^{-1}$

Dónde:

Cota	=	Nivel del Canal de Fuga (msnm)	
QT	=	Caudal Turbinado	( $\text{m}^3/\text{s}$ )
QV	=	Caudal Vertido	( $\text{m}^3/\text{s}$ )
QR11	=	Caudal en R-11	( $\text{m}^3/\text{s}$ )

## 2.2. CÁLCULO PROPUESTO

El cálculo del nivel del canal de fuga, como presentado en la ecuación del ítem anterior, depende de tres variables, siendo ellas, el Caudal Vertido, Caudal Turbinado y del Caudal en R-11.

Para el estudio en cuestión, fue considerado el periodo de 01/04/2014 a 11/07/2021, pues además de contener la mayor crecida del río Iguazú registrada en 2014, que influencia en el Caudal en R-11, posee una significativa variedad de combinaciones de las variables citadas anteriormente.

En conocimiento de esto, en la modelación propuesta, fueron adoptados los siguientes criterios:

- Para el canal de fuga, fueron tomadas las mediciones históricas horarias del nivel del canal de fuga de ITAIPU;
- Para el Caudal en R-11, fueron tomadas las mediciones históricas horarias de la cota en R-11 y recalculado el Caudal en R-11 a través de la ecuación presentada en el “Manual de Grandezas Hidroenergéticas” [6]. No fueron utilizados directamente los registros de Caudal en R-11 debido a que la curva llave de este punto de medición ha sufrido un cambio dentro del periodo de estudio, motivo por el cual fue necesario recalcularlo todo el histórico;
- Para el Caudal Turbinado, fueron tomadas las mediciones históricas horarias de la potencia por unidad generadora en ITAIPU y de salto bruto, siendo recalculado el Caudal Turbinado con el polinomio presentado en el “Manual de Grandezas Hidroenergéticas” [6]. Del mismo modo que el Caudal en R-11, el cálculo del Caudal Turbinado por unidad generadora ha sido mejorado durante el periodo analizado, motivo por el cual también tuvo que ser recalculado.

Con todo esto, el modelo propuesto fue calculado, para el tramo de Caudal Vertido nulo, mediante análisis de regresión considerando la observación de las variables envueltas en el periodo mencionado, llegando a los siguientes coeficientes:

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

Para  $QV = 0 \text{ m}^3/\text{s}$

$A = 7,91238101279585 \times 10^1$	$E = 0$
$B = 0$	$F = 2,49543568165922 \times 10^{-1}$
$C = -6,49811632513283 \times 10^{-4}$	$G = -7,79799551990159 \times 10^{-2}$
$D = 9,4656705966666 \times 10^{-4}$	$H = 1,84565201404209$

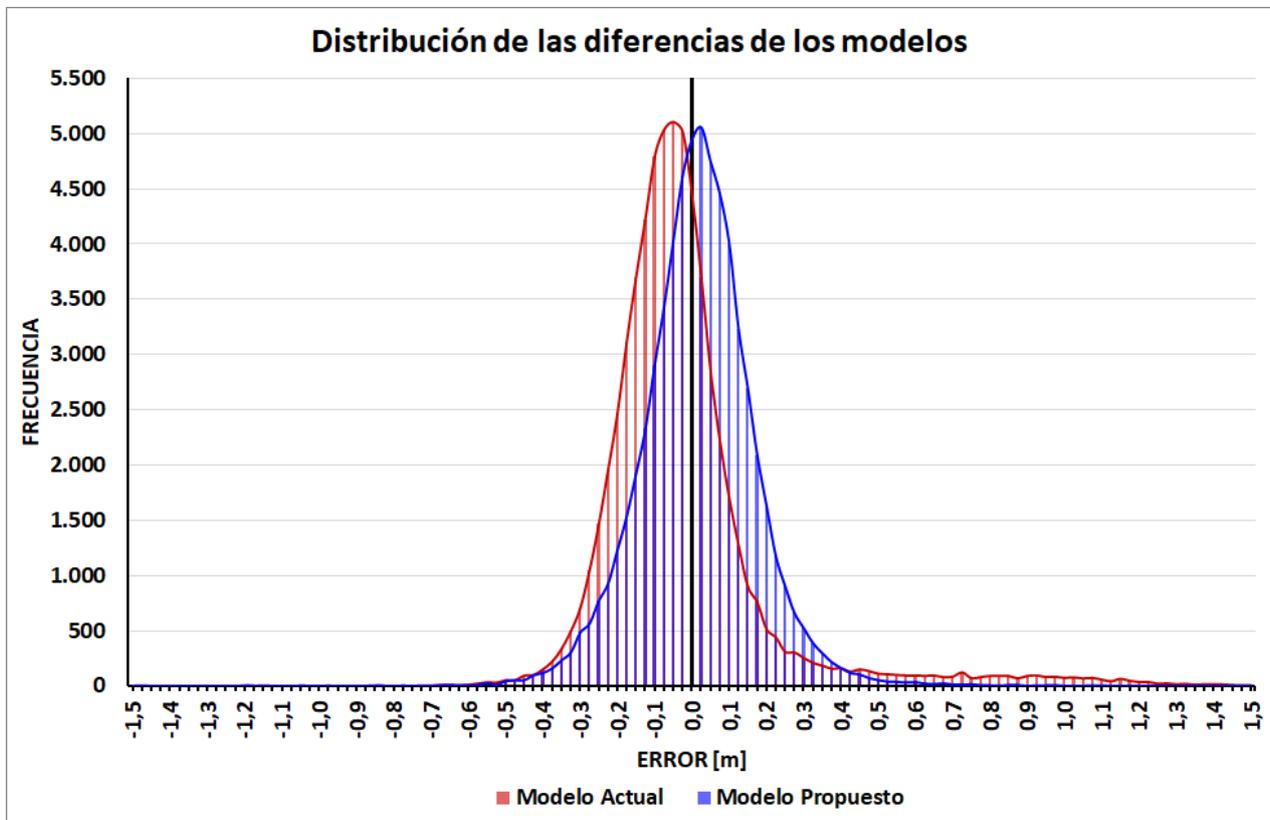
Para los tramos 2 y 3, donde hay presencia de Caudal Vertido, los coeficientes de la ecuación permanecen inalterados, conforme presentado en el ítem anterior.

Debido a que la densidad de puntos amostrados en el periodo de la crecida del río Iguazú es pequeña, inferior a 0,5% del total de muestras, y con el objetivo de obtener una mayor relevancia matemática de los mismos, fue necesario aumentar su densidad mediante repetición, obteniendo por consecuencia un mejor ajuste en la modelación.

### 2.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este ítem serán presentadas las comparaciones entre el modelo propuesto y el modelo actual analizando el error con relación al valor registrado para el periodo de análisis.

Los resultados obtenidos son presentados en la **Figura 6** y **Figura 7**. En la primera figura se presenta la distribución del error, mientras que, en la segunda se presenta la curva de permanencia del error de los modelos.



**Figura 6: Distribución de las diferencias de los modelos**

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

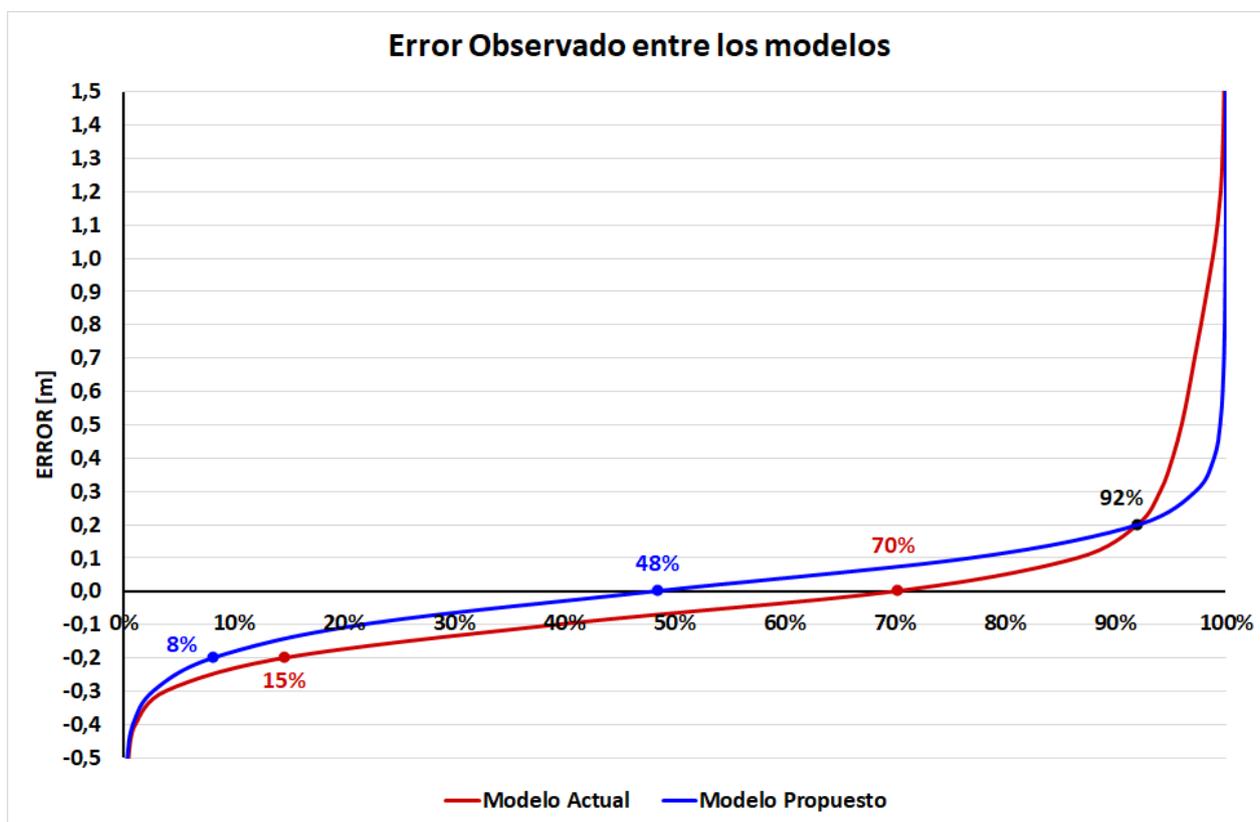
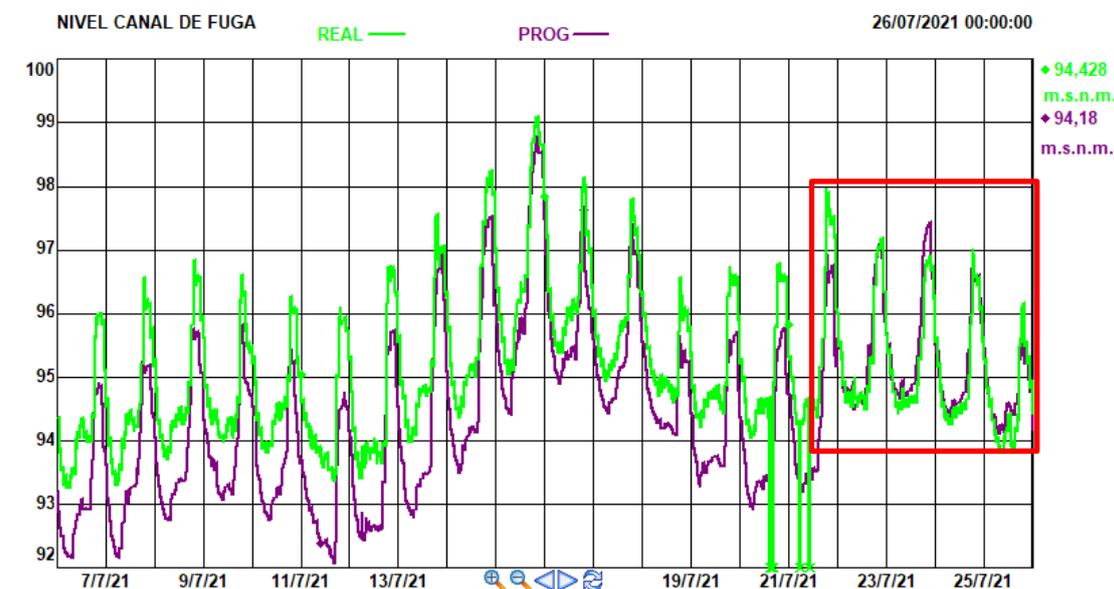


Figura 7: Error observado entre los modelos

Al analizar los resultados es posible observar lo siguiente:

- A pesar de que el modelo actual presenta un buen ajuste conforme presentado en la **Figura 6**, es denotado que, debido a que no se consideraron durante el proceso de ajuste valores muy bajos en el nivel del canal de fuga (debajo de 97 m), se presentan errores sistemáticos superiores a 0,5 m;
- Es posible notar una mejoría considerable del modelo propuesto para valores de error superiores a 0,5 m, resultante de la utilización de una mayor cantidad de muestras por debajo de 97 m (**Figura 8**) durante el proceso de ajuste;
- Considerando los mismos criterios del estudio de 2005[3], la curva de permanencia para el error esperado de  $\pm 20$  cm, error admisible para este tipo de control, para el modelo propuesto es alrededor de 84% del tiempo, mientras que para el modelo actual es de 77%, siendo la mejoría perceptible principalmente en la faja inferiores a 97 m en el nivel del canal de fuga;
- Para el modelo propuesto, se percibe en ambas figuras que los errores están centrados alrededor de cero, siendo prácticamente distribuidos igualmente entre valores positivos y negativos, con relación al pequeño sesgo negativo del modelo actual.

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



**Figura 8: Error observado entre los modelos**

### 3. CONCLUSIONES

Debido a la condición operativa del año 2021 de bajas descargas en ITAIPU, la aproximación a valores mínimos operativos del nivel canal de fuga, que posiblemente lleven a valores máximos operativos de salto bruto, y por los resultados presentados, se incorporan los nuevos coeficientes en los modelos de simulación hidroenergética utilizados en ITAIPU.

Al contar con una mejor aproximación del cálculo del nivel del canal de fuga es posible mejorar el control de este límite operativo referente a las turbinas de ITAIPU con mayor precisión, sin necesidad de adoptar un gran margen de error para asegurar su correcta operación.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Curva Colina Operacional de las Turbinas de ITAIPU. **ITAIPU Binacional**, CHI Hernandarias, 1980.
- [2] Avaliação das condições de atendimento eletroenergético do Sistema Interligado Nacional Brasileiro. **Operador Nacional do Sistema Interligado Brasileiro – ONS**, Brasil - Rio de Janeiro, 2021/2022.
- [3] Cálculo do Nível de Jusante para efeito de Programação e Simulação da Operação. NT OPSP.DT 11, **ITAIPU Binacional**, CHI Hernandarias, 2005.
- [4] Equação Canal de Fuga - NT OPSH.DT 2, **ITAIPU Binacional**, CHI Hernandarias, 2021.
- [5] Acuerdo Tripartito entre los aprovechamientos de ITAIPU y Corpus. Paraguay/Brasil/Argentina, 1979.
- [6] Referencias das Grandezas Hidroenergéticas - OP.DT/OPS.DT, **ITAIPU Binacional**, CHI Hernandarias, 2021.