

Ribagua

Revista Iberoamericana del Agua

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: iahr.tandfonline.com/journals/trib20

Análisis del efecto de las incertidumbres sobre el sistema de regulación de velocidad de una central hidroeléctrica

José Alberto Cataldo Ottieri, Ignacio Rovira & Nicolás Alberto Rodríguez von Sanden

To cite this article: José Alberto Cataldo Ottieri, Ignacio Rovira & Nicolás Alberto Rodríguez von Sanden (2023) Análisis del efecto de las incertidumbres sobre el sistema de regulación de velocidad de una central hidroeléctrica, Ribagua, 10:2, 79-90, DOI: [10.1080/23863781.2023.2289672](https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2289672)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2289672>



© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 05 Dec 2023.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 187



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Análisis del efecto de las incertidumbres sobre el sistema de regulación de velocidad de una central hidroeléctrica

José Alberto Cataldo Ottieri, Ignacio Rovira and Nicolás Alberto Rodríguez von Sanden

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

RESUMEN

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos en modelo de las turbinas de Salto Grande, se observó que, debido a la incertidumbre con que se miden las diferentes magnitudes significativas en la operación de la central hidroeléctrica, el rendimiento de la turbina sería menor que el correspondiente a la combinatoria, es decir, al que resultaría de la combinación óptima de ángulo de pala y apertura del distribuidor. Se consideraron reducciones en la incertidumbre del salto neto de 50 cm a menos de 1 cm y en la medición del ángulo de pala de 0.4° a 0.11° . En virtud de estas reducciones de la incertidumbre de la medición, el rendimiento mínimo de cada turbina se incrementaría hasta en 0.78%, mientras que el rendimiento medio podría hacerlo hasta en 0.39%. Estos incrementos en el rendimiento podrían dar lugar a un aumento en el orden de los 3,5 millones de dólares en el ingreso anual de producción, siendo los principales aportes la reducción de la incertidumbre en la medición del salto neto y del ángulo de pala. Puesto que el error aleatorio en la medición del ángulo de pala del rotor podría ser elevado, incluso reduciendo la incertidumbre en el salto se podría tener rendimientos aún menores a los estimados previamente. En caso de reducir la incertidumbre en la fijación del ángulo de pala entre 1° y 0.1° se podría esperar un incremento en los ingresos, por venta al sistema de margen izquierda, de 1.4%.

Analysis of uncertainty effect on the velocity regulator system of a hydraulic power

ABSTRACT

After performing tests on the model turbines of Salto Grande, it was observed that, due to the uncertainty in measuring different significant magnitudes in the operation of the hydroelectric plant, the turbine performance would be lower than that corresponding to the combinatorial approach. This means it would be lower than the one resulting from the optimal combination of blade angle and distributor opening. Reductions in the uncertainty of the net head from 50 cm to less than 1 cm and in the measurement of the blade angle from 0.4° to 0.11° were considered. Due to these reductions in measurement uncertainty, the minimum performance of each turbine could increase by up to 0.78%, while the average performance could increase by up to 0.39%. These performance increases could lead to an annual production income increase on the order of 3.5 million dollars, with the main contributions coming from the reduction in the uncertainty of the net head and the blade angle measurement. Since random error in the measurement of the rotor blade angle could be high, even with a reduction in the uncertainty of the net head, performances could still be lower than previously estimated. In case of a reduction in the angle blade uncertainty from 1° to 0.1° and increase in the income of about 1.4% could be obtained.

ARTICLE HISTORY

Received 6 July 2022
Revised 17 November 2023
Accepted 24 November 2023

KEYWORDS

Hidráulica; operación;
hidráulicas; metrología;
condición

1. Introducción

Una central hidroeléctrica como Salto Grande, ubicada sobre el río Uruguay límite entre Argentina y Uruguay, además de generar energía eléctrica con un relativamente bajo efecto sobre el ambiente, presenta beneficios como es el control de crecidas [1] y la creación de oportunidades, tanto a nivel industrial, comercial

como recreativo. Si bien las centrales de gran porte pueden llegar a producir ciertos efectos ambientales negativos, permiten la producción de energía eléctrica sin aporte de gases efecto invernadero a la atmósfera, así como de otros contaminantes atmosféricos [2]. Atendiendo a estos aspectos se entiende relevante utilizar el recurso hídrico en la forma más eficiente posible, de

CONTACT José Alberto Cataldo Ottieri ✉ jcataldo@fing.edu.uy Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

manera de reservar la mayor cantidad de agua posible, produciendo la mayor cantidad de energía eléctrica y en la forma más eficiente. Sería deseable que las inversiones que se realicen para lograr un desempeño acorde a las condiciones antes mencionadas presenten una elevada rentabilidad caracterizada, por ejemplo, por un corto periodo de repago.

Una mejora en las precisiones y exactitudes de las mediciones, en conjunto con una mayor precisión de un nuevo sistema de regulación de velocidad (SRV), permitirían tener una menor incertidumbre en la determinación del punto de funcionamiento de la turbina y, en particular, del rendimiento con que operará la unidad. Estas acciones se orientarían a lograr los objetivos mencionados de reducir el volumen de agua utilizado, incrementar la energía producida e incrementar el rendimiento de las unidades de generación.

Un nuevo SRV más preciso permitiría contar con consignas y realizar movimientos de los órganos de control con mayor precisión. Ahora bien, en forma adicional sería necesario disponer de instrumentos de medición más precisos coherentes con las características de desempeño de un SRV más preciso. En caso contrario, podría no lograrse mejora alguna en la precisión de la operación de la central hidroeléctrica.

Esta mayor precisión del SRV y de los instrumentos utilizados para medir magnitudes significativas, como ser salto, potencia y ángulo de pala entre otros, permitiría concluir sobre la significación de cambios que se perciban en condiciones de operación actuales o bien en evaluar lo significativo que podría ser modificar las consignas de operación. A modo de ejemplo, sería deseable evaluar la significación de posibles cambios que se identifiquen en el valor del rendimiento de la máquina dada una combinatoria como la que se tiene actualmente. Además, interesaría conocer lo significativo que podrían ser cambios que se realicen en la combinatoria actual a los efectos de lograr mayores rendimientos para así justificar su eventual modificación.

En este trabajo se presenta un análisis del efecto que tendría la reducción de la incertidumbre en la medición de las diferentes magnitudes que se realiza para alimentar al nuevo SRV de una turbina Kaplan, sobre la incertidumbre que se tendría en la fijación de la condición de operación de la unidad y, por consiguiente, en el rendimiento medio en el cual operaría y en el beneficio energético y económico que se lograría.

En la sección 2 de este trabajo se presenta la forma usual en que se determina la combinatoria entre el ángulo de pala y la apertura del distribuidor para lograr condiciones de operación con el mayor rendimiento posible y en la sección 3 se introducen algunos conceptos teóricos sobre metrología. En la sección 4 se expone acerca de las incertidumbres

que se tienen actualmente en la medición de las magnitudes significativas con las que se alimenta el SRV y en la sección 5 las posibles modificaciones en tales incertidumbres. En la sección 6 se presenta un análisis del efecto que se tendría sobre la incertidumbre con que operaría la turbina debido al cambio de las incertidumbres.

2. Determinación de la condición de combinatoria

Las turbinas axiales del tipo Kaplan disponen de dos órganos de regulación como son el ángulo de pala (α) y la apertura del distribuidor (AD), cuya fijación permitiría una operación óptima para un punto de funcionamiento especificado por el salto neto (H_n) disponible y la potencia que se busca generar (P). La optimización se refiere a operar, para el H_n y P dados, con el mayor rendimiento (η) posible. En la [Figura 1](#) se aprecia la curva característica o diagrama de colina de una turbina de la Central Hidroeléctrica de Salto Grande, cuya construcción está basada en las condiciones de operación óptimas y obtenida a partir del ensayo de modelo realizado en NEL e informado en [3].

Las turbinas de la central hidroeléctrica de Salto Grande son del tipo Kaplan con un rotor de 8.5 m de diámetro y con una potencia nominal de 135 MW.

La curva característica se construye a partir de los resultados del ensayo en modelo, que suelen ser verificadas y seguidas a lo largo del tiempo en ensayos de campo, práctica que es recomendable realizarla cada no más de 10 años [4].

Este ensayo en modelo consiste en operar la unidad en un salto dado y para un conjunto acotado de valores de ángulo de pala. Luego, para cada ángulo de pala se varía la apertura del distribuidor. La [Figura 2](#) ilustra el resultado del mencionado ensayo, obtenido de [3], expresando el rendimiento en ordenadas y el caudal en abscisas, así como el trazado de la envolvente de las curvas que permite identificar las condiciones de operación con mayor rendimiento posible.

Los resultados de los ensayos conducidos en laboratorio suelen expresarse en forma adimensional, tal como se hace en la [Figura 2](#), utilizando los parámetros velocidad unitaria N_{11} definido en la ecuación 1, Q_{11} , caudal unitario, definido en la ecuación 2 y P_{11} , potencia unitaria, es definida de acuerdo a la ecuación 3.

$$N_{11} = \frac{D \cdot N}{H_n^{1/2}} \quad (1)$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 H_n^{1/2}} \quad (2)$$

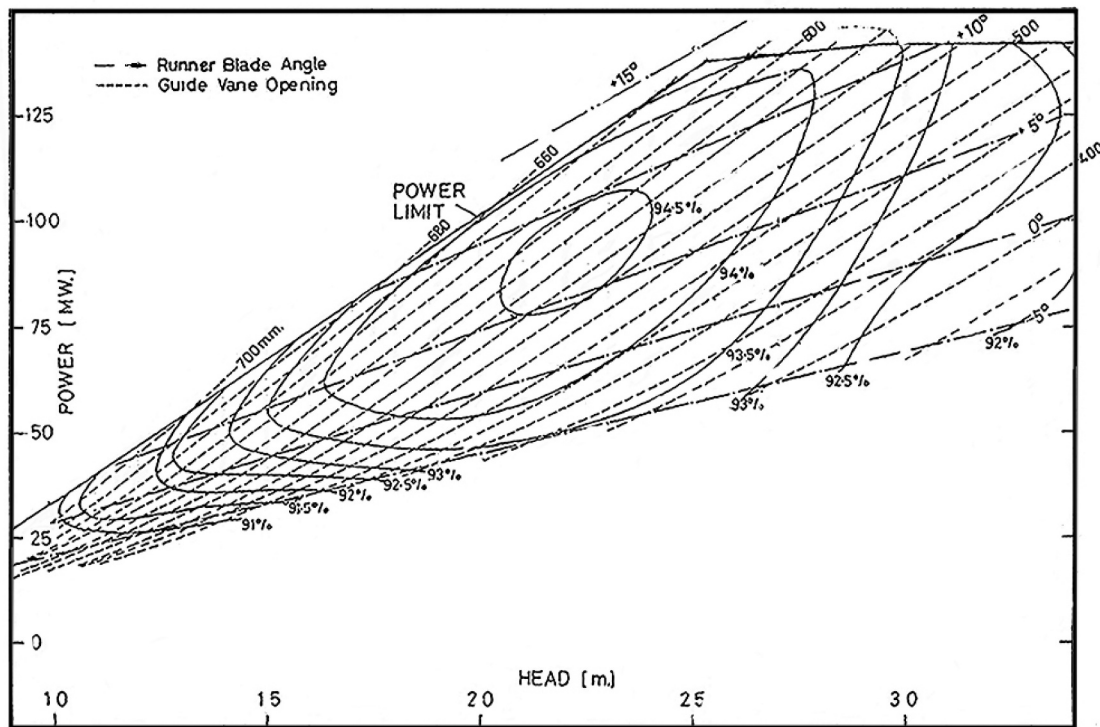


Figura 1. Diagrama de colina (extraída de [3]).

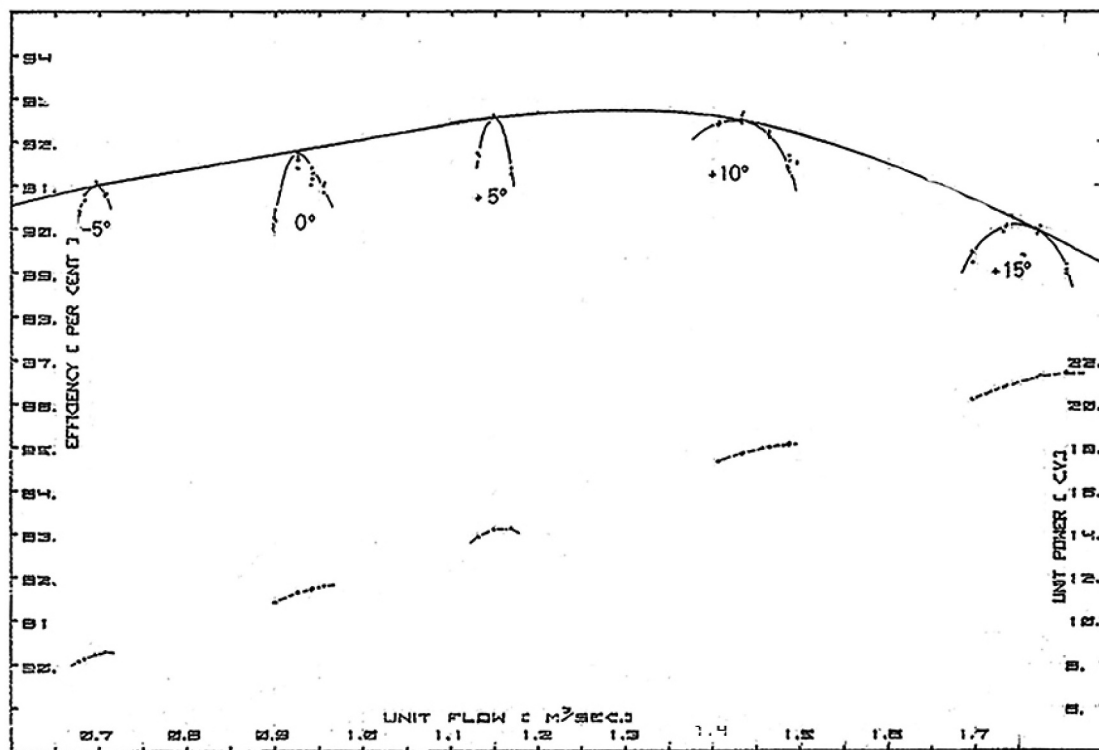


Figura 2. Resultado de modelo (extraído de [3]).

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 H_n^{3/2}} \quad (3)$$

donde Q es el caudal por la turbina, D el diámetro del rotor y N la velocidad de rotación. Los pares de valores de ángulo de pala y apertura de distribuidor determinados con la curva envolvente, que se visualiza en la [Figura 2](#), definen la denominada operación en combinatoria.

3. Información de base utilizada

El ensayo del modelo de la turbina de Salto Grande se realizó en NEL [3] y en este trabajo se utilizan como información de base. Es de destacar que, además, se realizaron tareas de evaluación de operación en el sitio de las unidades 5 en el año 1982 [5] y en la unidad 9 en el año 2012 [6], con lo que fue posible verificar la vigencia del ensayo de modelo.

En la central hidroeléctrica se disponen de al menos dos indicadores del posicionamiento del ángulo de pala. Una primera indicación la brinda una regla montada en el cabezal Kaplan y la otra es un indicador accionado por un cable cuyo desplazamiento es proporcional al desplazamiento del cabezal Kaplan. Personal de la central llevó adelante trabajos en la unidad 12 con el objeto de analizar el desempeño de estos equipos de medición utilizando una indicación existente en una pala del rotor con una apreciación de 1° . Además, se contrató a un Agrimensor para verificar el posicionamiento de las palas del rotor utilizando una Estación total de Alta Precisión. En este segundo ensayo se constató que la indicación presentaba una histéresis y una cierta desviación del ángulo medido respecto al indicado que podría llegar a ser $\pm 1^\circ$ para ciertas posiciones del rotor.

La AD se suele determinar con la indicación del posicionamiento del servo que acciona sobre las palas. En este caso, también a partir de mediciones de la indicación y de mediciones de ángulo de pala en la unidad 6 se pudo constatar un desvío menor.

Para determinar el salto neto se utilizan dos mediciones en la entrada que son una sobre una de las paredes de uno de los vanos de entrada a cada unidad y la otra es la medición de la cota del nivel de superficie libre en la ranura de la compuerta de mantenimiento (recata). En la [Figura 3](#) se indican las posiciones de las mediciones antes mencionadas. Además, se mide el nivel de restitución en dos sitios ubicados uno sobre cada margen de la central.

La medición en la recata se realiza con una cinta, en tanto que en la pared lateral se mide con un transductor de presión marca Rittmeyer modelo PJ109130466.

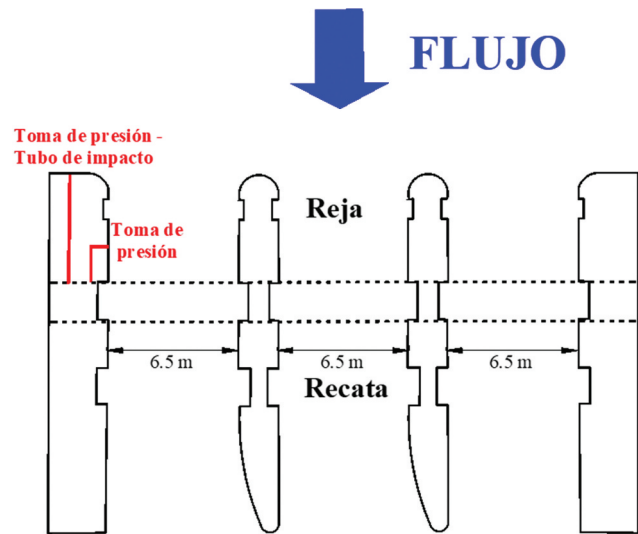


Figura 3. Posición de medición de carga piezométrica en la entrada.

4. Aspectos de metrología

En esta sección se introduce algunos conceptos sobre metrología. Los términos que se utilizan se extrajeron de [7], documento elaborado por parte de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas.

Como se plantea en [7], medir una magnitud significa asociarle un valor numérico deducido de su comparación con una magnitud patrón de la misma especie. Debido a las características del patrón y de la magnitud que se busca describir, así como de la metodología seguida para efectuar la medición, el valor resultante de repeticiones de la medición presentaría una cierta dispersión. Esta dispersión se puede apreciar en forma esquemática en la [Figura 4](#), donde se muestra la posible

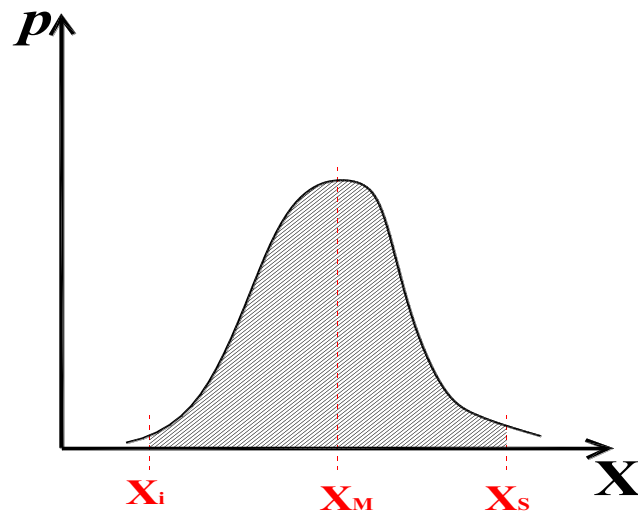


Figura 4. Curva de densidad de probabilidad de la medición.

función de densidad de probabilidad del valor de la medida que se obtendría.

Es posible definir un intervalo de valores de la magnitud $[X_i; X_S]$, centrado en el valor asignado a la medición X_M , como podría ser el valor medio de la muestra de mediciones. El mencionado intervalo se podría definir como $[X_M - \Delta X; X_M + \Delta X]$. El valor de ΔX se suele definir a partir de la desviación estándar de la muestra de mediciones (σ_M) multiplicándola por un factor de cobertura (k). El tamaño de ΔX ($k \cdot \sigma_M$) es una medida de la incertidumbre con la cual puede ser determinado el valor de la medición. El coeficiente de cobertura suele fijarse de manera que el área encerrada por la curva de densidad de probabilidad entre X_i y X_S , como se indica en la Figura 4, tenga un valor prefijado. Ese valor prefijado, denominado Nivel de Confianza, suele ser 95%.

Se considera ahora una magnitud Y , dependiente, que se define a partir de un conjunto de magnitudes X_k a través de una función como muestra la ecuación 4.

$$Y = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (4)$$

A los efectos de determinar la medida de la magnitud Y sería necesario medir las magnitudes X_k . La incertidumbre con que se determinaría la medida de Y depende de la incertidumbre de la medida de cada una de las magnitudes X_k , así como de la incertidumbre con que se definió la función 'g.' En caso que se asuma que se conoce el verdadero valor de la función 'g,' se podría despreciar la incertidumbre e su evaluación pero, en general, la función 'g' se determina a través de un proceso de calibración, durante el cual se deben medir todas las magnitudes intervinientes, como son las X_k y la Y . Dado que para la determinación de estas magnitudes se tienen incertidumbres, se tendrá una incertidumbre en la determinación de la función 'g.' Para determinar la incertidumbre de una magnitud como la Y (ΔY), se pueden seguir diferentes metodologías como es propagación de errores, el método sugerido en [8] o procesos de inter-comparación entre laboratorios. En particular, la propagación de errores se basa en la ecuación 5.

$$(\Delta Y)^2 = (\Delta g)^2 + \sum_k \left(\frac{\partial g}{\partial X_k} \cdot \Delta X_k \right)^2 \quad (5)$$

donde los ΔX_k son las incertidumbres en la medida de cada magnitud, supuestas no correlacionadas entre sí y Δg representa la incertidumbre en la determinación de la función. En [9] se presenta el análisis antes mencionado aplicado a la calibración de anemómetros. La incertidumbre en la determinación de la función g depende de la forma de dicha función, así como de los parámetros que presenta la formulación. En [3] se menciona que el rendimiento del modelo se determinó

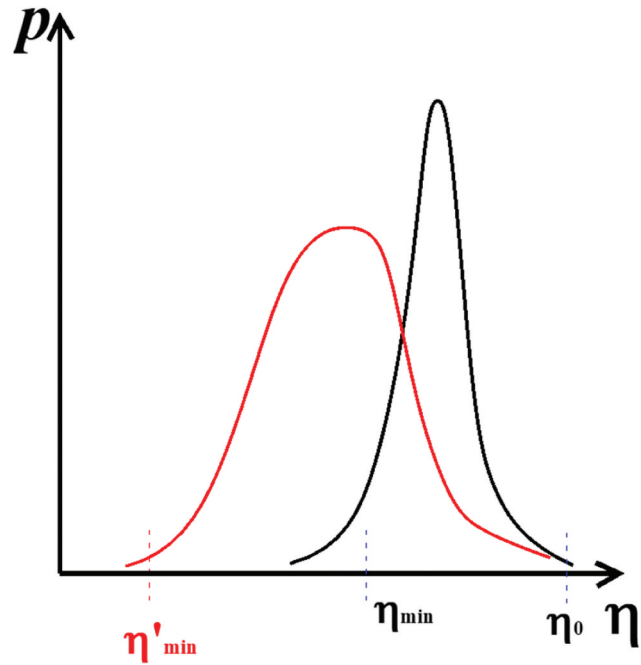


Figura 5. Efecto del cambio de la incertidumbre.

con una incertidumbre de 0.23% del valor hallado, la cual se determinó a partir de la incertidumbre en las diferentes magnitudes medidas como son caudal, potencia, salto neto y densidad.

Observando la Figura 2 se aprecia que, si las diferentes magnitudes que se deben medir para determinar la condición de operación de una unidad, como son el ángulo de pala, la apertura del distribuidor, el salto neto y la potencia, presentan un apartamiento respecto del valor que maximizan el rendimiento, implicaría que la unidad operara en condiciones con menor rendimiento. Es decir que debido a la incertidumbre con que se miden las diferentes magnitudes, la unidad operaría en condiciones cuyo rendimiento estaría entre el valor óptimo (η_0) y un valor menor (η_{min}), como se muestra en la Figura 5.

Si la incertidumbre en la determinación del punto de funcionamiento se redujera, se podría reducir la amplitud del intervalo en el cual se ordenarían los valores del rendimiento. Es decir que los valores de η estarían en el intervalo $[\eta_{min}; \eta_0]$ en vez de en el intervalo $[\eta'_{min}; \eta_0]$.

Pero, además, también se observa que podría modificarse el valor medio de la medida, seguramente acercándose al verdadero valor de la magnitud lo que significa reducir el error.

En este planteo se supuso que el extremo derecho del intervalo de variación de la magnitud η no cambia al modificarse la incertidumbre con que se miden las diferentes magnitudes, pues sería el mayor valor posible que adoptaría el rendimiento para la combinatoria consignada.

5. Incertidumbres actuales en la determinación de las magnitudes significativas

El análisis que se presenta en este trabajo consideró, inicialmente, evaluar el efecto de la incertidumbre en la medición de tres magnitudes, como son el salto neto, el ángulo de pala y la apertura del distribuidor, en la fijación de la condición de operación y, por lo tanto, sobre el rendimiento con que operaría una unidad.

5.1. Incertidumbre actual en la medición de salto

Se analizó la incertidumbre que se tendría en la determinación del salto neto siguiendo los dos posibles procedimientos que se utilizan en la central de Salto Grande.

Un primer método se basa en la indicación de los transductores de presión ubicados corriente abajo de las rejas (ver Figura 6). En este procedimiento se identifican tres fuentes de incertidumbre o de error, según se lo vea, como son la inherente al uso del transductor de presión, la diferencia de valores, que el personal de la central informa, entre la medición con este transductor y la medición de cota de superficie libre en la Recata (ver Figura 6) y, finalmente, la debida a que en esta metodología no se considera el cambio de energía cinética entre la entrada y la salida de la turbina.

La ecuación 6 presenta la definición del salto neto.

$$H_n = (h_1 - h_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (6)$$

siendo los términos con subíndice 1 corresponden a una sección aguas arriba de la turbina y el subíndice 2 a la sección de salida de la unidad, con h se identifica la

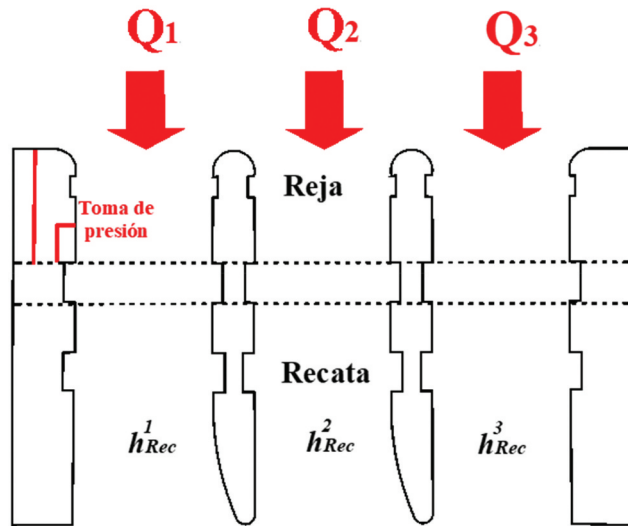


Figura 6. Esquema del flujo en la entra de una unidad.

Tabla 1. Incertidumbre en el salto neto.

Q (m ³ /s)	ΔH _n (m)
300	0,13
600	0,53

carga piezométrica y con v la velocidad promedio en la sección recta.

En base a la información disponible sobre resultados de mediciones utilizando el transductor de presión se tendría una incertidumbre 0,01 metros de columna de agua.

Además, se detectó una diferencia entre la medida obtenida con el transductor en la entrada a la turbina (h_{Rit}) y la medición en la Recata (h_{Rec}), tal como se señala en [10], que es posible estimarla de acuerdo a la ecuación 7.

$$h_{Rit} - h_{Rec} \approx -3,6 \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (7)$$

donde Q es el caudal que circula y A_1 el área de la sección recta de pasaje en la entrada de la turbina. En relación al término que tiene en cuenta la diferencia de energía cinética resulta proporcional al cuadrado del caudal.

Teniendo en cuenta estos tres aspectos antes mencionados se estimó entonces la amplitud (ΔH_n) del intervalo de variación que podría presentar el salto neto (incertidumbre), para dos valores de caudal, tal como se presenta en la Tabla 1.

Un segundo procedimiento implica determinar el salto bruto (H_B), a partir de las dos mediciones de cota de lago (Z_{lago}) y de las dos mediciones de cota de restitución (Z_{Rest}) que se realizan, cada una sobre cada margen de la central. Luego, se mide la diferencia entre la carga de lago y la carga piezométrica en recata, considerando un promedio entre las medidas de los tres vanos, cuando la unidad genera una potencia del orden de 100 MW, a los efectos de estimar la pérdida de carga en las rejas. El valor de caudal se infiere asumiendo un valor de rendimiento de 0,9 y considerando el valor de la potencia eléctrica generada y el valor del salto bruto de acuerdo a la ecuación 8.

$$Q = \frac{P_{el}}{\gamma \cdot H_B \cdot 0,9} \quad (8)$$

El valor de pérdida de carga es la que se utiliza luego para estimar el salto neto. Por otro lado, el caudal así determinado, se utiliza para calcular la diferencia de energía cinética entre aguas arriba y aguas abajo de la turbina. Entonces el salto neto se calcula de acuerdo a la ecuación 9, donde v_{Rec} es la velocidad promedio en la sección de la recata y v_{Sal} la velocidad en la salida de la turbina.

$$H_n = Z_{\text{lago}} - Z_{\text{Rest}} - (Z_{\text{lago}} - h_{\text{Rec}}) + \frac{v_{\text{Rec}}^2}{2g} - \frac{v_{\text{Sal}}^2}{2g} \quad (9)$$

En esta determinación, una primera fuente de incertidumbre es la correspondiente a la medición de cada una de las cotas, que resulta aproximadamente de 1 cm de columna de agua.

Una segunda fuente de error es la diferencia que se registra tanto en el valor de cota de lago como de cota de restitución en el ancho de la central. Para evaluar esta incertidumbre se analizó la serie histórica de diferencias de cotas de lago y de restitución entre márgenes y se aproximó como la desviación estándar de dichas series históricas resultando 4 cm de columna de agua para el lago y de 10 cm de columna de agua para la restitución.

En la determinación de la diferencia de energía cinética se estimó que la incertidumbre del orden de los 24 cm de columna de agua.

En conclusión, la determinación del salto neto siguiendo esta segunda metodología se realiza con una incertidumbre de 30 cm de columna de agua. Este valor resulta similar al evaluado por el método anterior y consignado en la [Tabla 1](#).

5.2. Incertidumbre actual en la determinación del ángulo de pala

La incertidumbre en la fijación del ángulo de pala, en la actualidad, tiene dos fuentes como son la lectura de la escala y la histéresis que presenta la medición. En

relación a la medición del ángulo de pala, se aprecian valores con una definición de 0,1°.

Además, debido a la histéresis que presenta la escala de medición utilizada daría lugar a un error promedio de 0,3°.

En forma adicional se destaca que, tal como se señaló en la sección 3, a partir de mediciones realizadas en una unidad se encontraron desviaciones entre la ubicación de las palas y la indicación de ángulo que llegó a ser de $\pm 1^\circ$, para alguna posición, y nula para otras. Este tipo de apartamientos sería un error aleatorio.

5.3. Incertidumbre prevista en la apertura del distribuidor

En la [Figura 7](#) se aprecia la relación entre apertura del distribuidor y el posicionamiento del servo de accionamiento. Este gráfico se confeccionó a partir de los resultados presentados en [5] que vincula el posicionamiento de los álabes del distribuidor con el desplazamiento de uno de los cilindros hidráulicos que se utilizan para accionar el distribuidor.

Se destaca que no se aprecia histéresis, por lo que la indicación del desplazamiento del cilindro hidráulico sería una adecuada indicación del posicionamiento del distribuidor. La incertidumbre en el posicionamiento del distribuidor resulta inferior a 1.4 mm de acuerdo a lo presentado en [11], siendo las carreras de entre 38 mm y 775 mm.

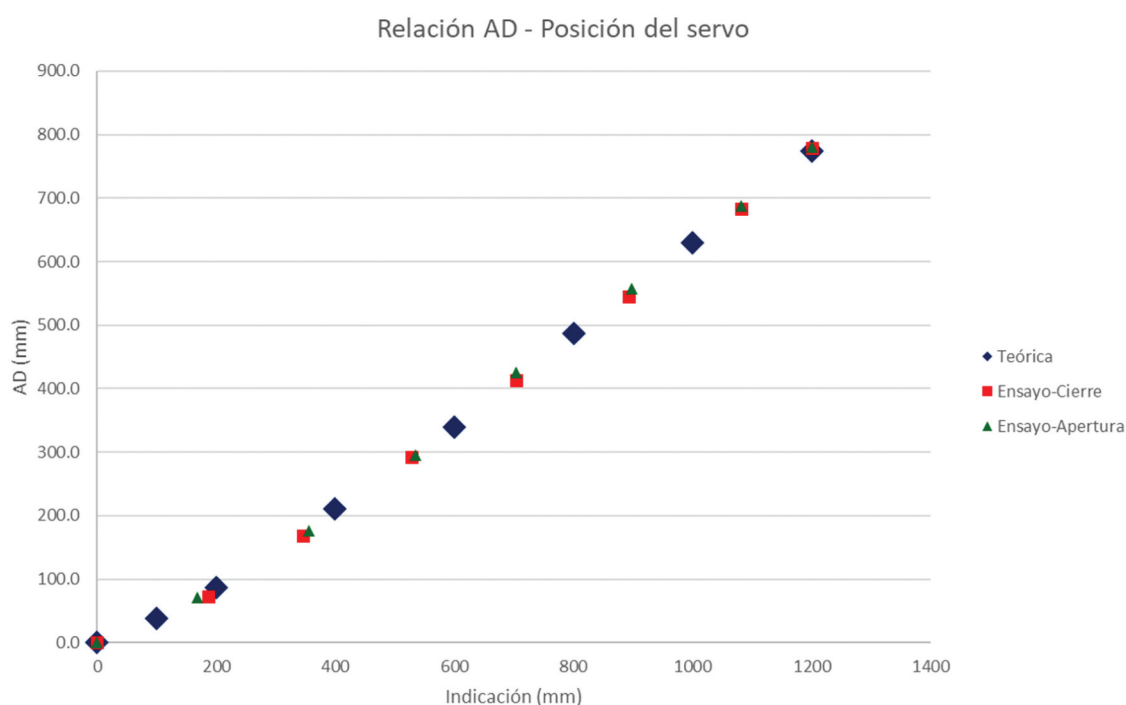


Figura 7. Apertura de distribuidor – Posición servo.

6. Escenario de reducciones de las incertidumbres

En esta sección se analiza las incertidumbres que se tendrían en la determinación de las magnitudes significativas si las mediciones se realizaran con incertidumbres de 2 mm en la medición de la cota de la superficie libre, del 1,5% en el caudal y de 0,1° en el ángulo de pala.

6.1. Incertidumbre prevista en el salto neto

El salto neto es posible expresarlo de acuerdo a la expresión 6. La determinación de la carga corriente arriba implicaría determinar la carga en cada uno de los vanos en que se encuentra dividida la entrada de la unidad, por cada uno de los cuales circula un caudal diferente, como se presenta en la Figura 7. La carga corriente arriba de la turbina se puede calcular de acuerdo a la ecuación 10, es decir como la media ponderada en el flujo en peso.

$$H_1 = \frac{\gamma Q_1 H_1^1 + \gamma Q_2 H_1^2 + \gamma Q_3 H_1^3}{\gamma(Q_1 + Q_2 + Q_3)} = r_1 \cdot H_1^1 + r_2 \cdot H_1^2 + r_3 \cdot H_1^3 \quad (10)$$

expresando los coeficientes r_i la relación entre el caudal por cada vano y el caudal total y las variables H_1^i las cargas en cada uno de los vanos. A partir de series históricas de mediciones de la cota de la superficie libre de la recata entre cada uno de los vanos de cada unidad obtenidos entre los años 2014 y 2019 se generó una serie histórica de los coeficientes r_i para cada unidad. A tales efectos, en las series históricas fueron eliminados los valores anómalos, teniéndose en cuenta todos los valores restantes. Se obtuvo que, en promedio, la incertidumbre en la determinación de estas relaciones es de 11,7% para el vano 1, 6,9% para el vano 2 y 7,9% para el vano 3. Estas incertidumbres se obtuvieron estimando la desviación estándar de la dispersión que presentó cada relación. Se destaca que estos valores se infirieron considerando todas las condiciones de operación en la cual se efectuaron mediciones y que, además, no fue medido el caudal. Por otro lado, se destaca que para la determinación de la incertidumbre en el salto neto se consideró el valor que adopta esta relación para cada vano de cada unidad y sus respectivas incertidumbres. Se elimina de esta forma el aporte de la incertidumbre que surge de aproximar valores obtenidos en una unidad o en una condición particular de trabajo a otra unidad o a otra condición de trabajo.

La carga en cada vano se propone calcular de acuerdo a la ecuación 11

$$H_1^i = Z_{Ref} - h_{Rec}^i + \frac{Q_i^2}{2gA_{Rec}^2} \quad (11)$$

donde h_{Rec}^i es la medida de la cota de la superficie libre en la recata en cada vano y A_{Rec} el área de la sección recta en donde efectúa dicha medida. La carga en la salida de la unidad se debe calcular de acuerdo a la ecuación 12.

$$H_2 = h_{Rio} + \frac{Q^2}{2gA_{sal}^2} \quad (12)$$

siendo h_{Rio} la cota de la superficie libre a la salida de la unidad y A_{sal} es el área de la sección recta en la salida de la unidad.

Las ecuaciones 13 y 14 permiten estimar la incertidumbre de la carga corriente arriba y corriente abajo respectivamente.

$$(\Delta H_1)^2 = \left(\frac{\partial H_1}{\partial Q_1} \cdot \Delta Q_1\right)^2 + \left(\frac{\partial H_1}{\partial Q_2} \cdot \Delta Q_2\right)^2 + \left(\frac{\partial H_1}{\partial Q_3} \cdot \Delta Q_3\right)^2 + \left(\frac{\partial H_1}{\partial H_1^1} \cdot \Delta H_1^1\right)^2 \quad (13)$$

$$(\Delta H_2)^2 = \Delta h_{Rio}^2 + \left(\frac{Q}{gA_{sal}^2} \Delta Q\right)^2 \quad (14)$$

Se destaca que la incertidumbre de la estimación del caudal en cada vano se integra con la incertidumbre en la determinación del caudal por la turbina y con la incertidumbre en la determinación de la relación de caudales r_i que se estima para cada vano de cada unidad.

La incertidumbre promedio, considerando todas las unidades se presenta en la Tabla 2 para dos valores de caudal.

6.2. Incertidumbre prevista en el ángulo de pala

A los efectos de reducir la incertidumbre en el posicionamiento de la pala se observa que la relación entre el ángulo de pala y la posición del cabezal Kaplan (LCK) no presenta histéresis como se muestra en la Figura 8.

En la ecuación 15 se presenta, en forma esquemática, esta relación.

$$\alpha = g(LCK) \quad (15)$$

Si se supone que, durante la operación de calibración, para determinar la función g , siguiendo el procedimiento como se describe en [11], la incertidumbre en el ángulo de pala es de 0,1° y la incertidumbre en el posicionamiento del cabezal Kaplan (ΔL) es de 1 mm, y luego para determinar el ángulo

Tabla 2. Incertidumbre en el salto neto.

$Q(m^3/s)$	300	600
$\Delta H (m)$	0.005	0.015

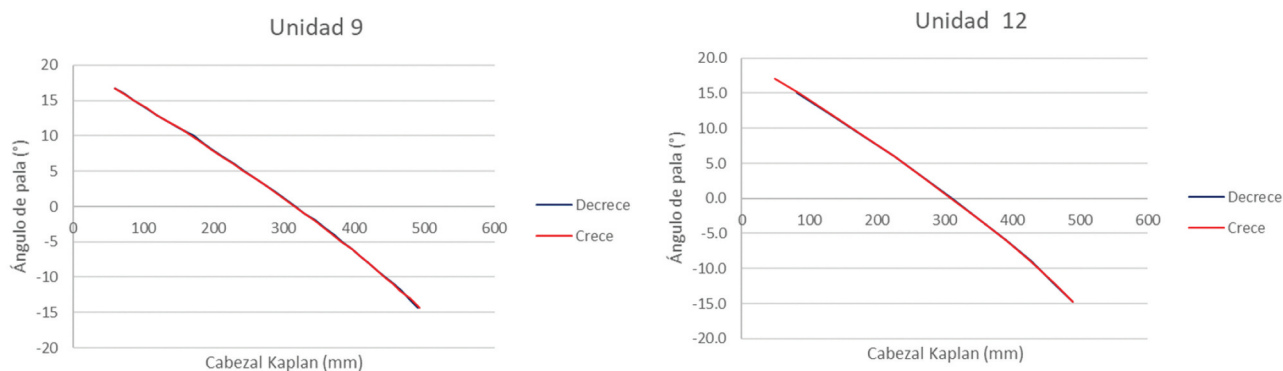


Figura 8. Relación entre ángulo de pala y posición de cabezal Kaplan en unidades 9 y 12.

Tabla 3. Cambio esperado en incertidumbres.

	Salto (mm)	Ángulo de pala (°)	AD (mm)
Actual	130 a 530	0,3	1,4
Esperado	5 a 17	0,11	1,4

de pala se utiliza la medición de la posición del cabezal Kaplan también con una incertidumbre de 1 mm, la incertidumbre en el ángulo de pala se puede hallar de acuerdo a la siguiente ecuación

$$(\Delta\alpha_M)^2 = (\Delta\alpha)^2 + 2(\Delta L \cdot \text{tg}(\theta))^2 \quad (16)$$

expresando θ la pendiente de la curva mostrada en la Figura 8. Utilizando esta expresión es posible estimar que la incertidumbre en el ángulo de pala sería de entre 0,11° y 0,13°.

En resumen, en la Tabla 3 se presenta el cambio esperado en la incertidumbre en la determinación del valor de las magnitudes. En el caso de la apertura del distribuidor se asumió el valor de incertidumbre actual.

7. Análisis del efecto de las incertidumbres

7.1. Cambios previstos en la incertidumbre del rendimiento

El análisis del efecto de la incertidumbre sobre la operación resulta complejo y alcanza, básicamente, a todas las magnitudes cuyo valor interviene en la determinación de la consigna que fija la operación de la unidad. Como se ha visto en las secciones previas, así como en las características identificadas de los diferentes instrumentos, los valores de algunas magnitudes presentan incertidumbres de mayor significación que otras.

Para el análisis que sigue se supone que la incertidumbre en la potencia y en la apertura del distribuidor no resultan significativas.

Entonces, conocido el salto neto disponible (H_{n0}) y la Potencia que se desea generar (P_0) utilizando el diagrama de colina (Figura 1) se puede determinar el ángulo de pala (α_0) y la apertura del distribuidor (AD_0) correspondientes a la operación en combinatoria, así como el rendimiento (η_0) con que operaría la turbina. Este valor del rendimiento sería el mayor valor posible que pudiera tener dicho parámetro para la condición de trabajo considerada.

Para estos valores de salto y potencia fijados, se podría deducir el valor de los parámetros adimensionales N_{110} y P_{110} (ecuaciones 1 y 3). Además, utilizando la ecuación 17, es posible determinar el caudal Q_0 que circularía por la turbina.

$$Q_0 = \frac{P_0}{\gamma \cdot H_{n0} \cdot \eta_0} \quad (17)$$

Los resultados presentados en las Tablas 1 y 2, muestran que la incertidumbre en el salto neto (ΔH_n) depende del caudal. Entonces, con el caudal hallado (ecuación 17) sería posible determinar dicha incertidumbre y entonces definir un intervalo de posibles valores de salto que podría tenerse [$H_{n,i} = H_{n0} - \Delta H_n$; $H_{n,s} = H_{n0} + \Delta H_n$], debido a la incertidumbre γ , como consecuencia, un intervalo de parámetros adimensionales [$N_{11,i}$; $N_{11,s}$].

También, sería posible determinar el intervalo de posibles valores de ángulo de pala como [$\alpha_i = \alpha_0 - \Delta\alpha$; $\alpha_s = \alpha_0 + \Delta\alpha$], siendo $\Delta\alpha$ la incertidumbre en la determinación del ángulo de pala.

Utilizando los resultados del ensayo de modelo (como los que se presenta en la Figura 2), para cada uno de los cuatro pares de valores (α , H_n), definidos utilizando los extremos de los intervalos de variación de cada una de estas magnitudes, es posible deducir cuatro valores de los parámetros Q_{11} , P_{11} , η y AD .

Asumiendo que el parámetro P_{11} adopta, en todos estos casos, el valor P_{110} y lo mismo ocurre con la apertura del distribuidor, es posible deducir el valor que tomaría el

rendimiento para cada par de valores (α, H_n) , como simbólicamente lo expresa la ecuación 18,

$$\eta = f(\alpha, H_n) \quad (18)$$

y entonces evaluar la diferencia con el valor del rendimiento η_0 , es decir el mayor posible que se tendría si se lograra operar en la condición de consigna (H_{no}, P_0) .

A modo de ejemplo, en la [Tabla 4](#) se presenta este análisis para tres condiciones de operación, considerando los niveles de incertidumbre en la determinación del salto neto y del ángulo de pala que se tienen en la actualidad (primera fila de [Tabla 3](#)).

El resultado presentado en la [Tabla 4](#) permite decir que, para la primera condición de operación (primera fila), la unidad podría estar operando en una condición con un rendimiento entre 92,5% y el valor correspondiente a la combinatoria, es decir 94%. Es decir que, para cada condición consignada en la [Tabla 4](#), se estableció un intervalo de posibles valores de rendimiento en que podría estar operando la unidad.

Este mismo análisis se realizó utilizando los valores de incertidumbre esperados, que se consignaron en la segunda fila de la [Tabla 3](#). En la tercera columna de la [Tabla 5](#) se consigna el menor valor que podría adoptar el rendimiento en este caso. Se estimó entonces el incremento en el menor valor de rendimiento tal como se presenta en la cuarta columna de la [Tabla 5](#).

Este cambio se presenta en forma esquemática en la [Figura 9](#) pasando de la curva roja a la curva negra. En la [Figura 9](#), a modo de ejemplo, se muestra los cambios esperados en el rendimiento para la operación con un salto neto de 23.4 m.

7.2. Evaluación del cambio previsto en el rendimiento

En base a los resultados presentados en la [Tabla 5](#) y basándose en el esquema presentado en la [Figura 9](#), se

Tabla 4. Reducción estimada en el rendimiento debido a incertidumbres.

H_{no} (m)	P_0 (MW)	η_0 (%)	η_{min} (%)
23,4	72	94,0	92,5
17,0	80	93,5	92,75
30,0	137	92,9	92,05

Tabla 5. Incremento esperado en el rendimiento debido a reducción en incertidumbre.

H_{no} (m)	P_0 (MW)	η_{min} (%)	Incremento en η_{min} (%)
23,4	72	93,28	0,78
17,0	80	93,00	0,70
30,0	137	92,45	0,40

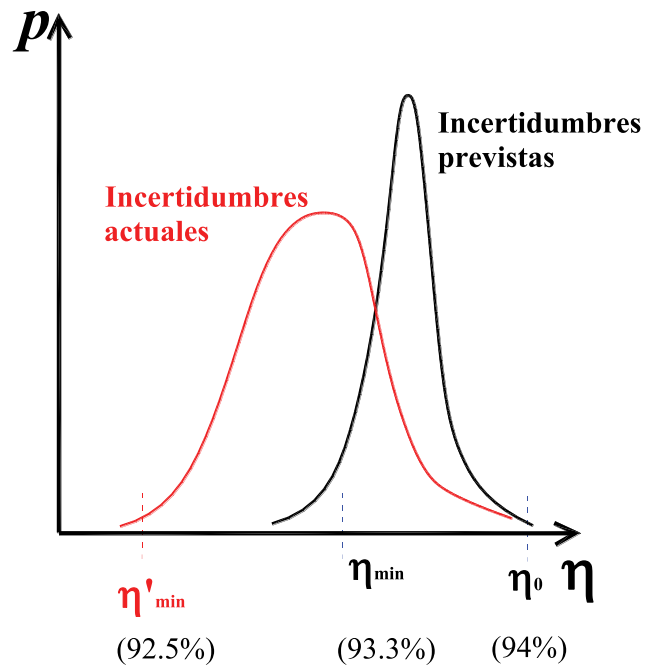


Figure 9. Efecto de la reducción de incertidumbres en la dispersión de valores de rendimiento.

esperaría que, debido a la reducción en las incertidumbres, la unidad opere en un rendimiento en promedio mayor a lo largo del tiempo. Este incremento en el rendimiento medio sería de entre 0,39% a 0,2%, suponiendo que las distribuciones de densidad de probabilidad son del tipo normal. Este incremento de rendimiento medio estimado estaría asociado a la reducción de la incertidumbre en la medición del salto neto y del ángulo de pala del rodete siendo, en principio, independiente de la potencia nominal de las unidades hidro-generadoras.

En base a una producción media anual de la central hidroeléctrica de 8136 GWh, de los cuales se supone que la mitad corresponde al sistema uruguayo, lo cual es 4068 GWh por año. y a un valor de la producción de Salto Grande de 88,2 U\$/MWh, el incremento previsto de 0.39% promedio en el rendimiento significaría un incremento promedio en la producción de la Central de 33,250 MWh por año, que implicaría un incremento en los ingresos anuales de cerca de 3,5 millones de dólares. En la [Tabla 6](#) se presenta un desglose de la forma en que afectaría la reducción de la incertidumbre en el incremento del rendimiento, así como en el incremento de ingresos por incrementarse el rendimiento medio. En la primera columna se consigna la magnitud, así como la incertidumbre con la cual sería previsto medirla.

Se destaca que, aunque el análisis presentado previamente resulta en extremo conservador, permitirá

Tabla 6. Desglose del efecto de reducción de incertidumbre.

Magnitud	Incremento esperado en el rendimiento (%)	Incremento esperado en el ingreso anual (USD)
Cota en las recatas y restitución con exactitud de 2 mm	0,34	$1,34 * 10^6$
Ángulo de pala con incertidumbre de $0,1^\circ$	0,30	$1,10 * 10^6$
Caudal con incertidumbre de 1,5%	0,10	$3,57 * 10^5$
TOTAL	0,74	$2,80 * 10^6$

justificar cualquiera de las inversiones requeridas para reducir las incertidumbres.

7.3. Análisis del cambio de incertidumbre en el ángulo de pala

Considerando que el análisis previo sea en extremo conservador, en forma complementaria se analizó el efecto de la incertidumbre en el ángulo de pala. Este análisis se realizó debido a que, en realidad, no es claro cuál sería la incertidumbre actual en la fijación de este parámetro asociado a la escala disponible en la actualidad en la pala. Como fuera señalado, la incertidumbre en la determinación del ángulo de pala debida a la medición en los dispositivos disponibles y a la histéresis existente en el sistema, sería del orden de 0.3° . Ahora bien, como también se señaló, se identificó un apartamiento en la ubicación real de las palas respecto a la indicación en los puntos de medición, así como a una dispersión en la posición de las diferentes palas de un mismo rotor, que llegó a ser $\pm 1^\circ$.

Para ello se consideró la condición de operación con un salto neto de 23,4 m y una producción de 72 MW, que sería el valor de producción promedio para el salto neto considerado. Además, se supuso que la incertidumbre en el salto y en el caudal eran las previstas y especificadas en la sección 6.

Se consideraron diferentes valores de la incertidumbre en la fijación del ángulo de pala. En cada caso se determinó el menor rendimiento en el cual podría operar la unidad debido a esta incertidumbre. En la [Tabla 7](#) se presentan los resultados de este análisis.

Se observa que, por ejemplo, si se hiciera el esfuerzo de reducir la incertidumbre en el salto y en el caudal, y la incertidumbre en el ángulo de pala fuera de 1° , se tendría una situación peor que la considerada como actual.

En caso que la incertidumbre real actual en el posicionamiento de la pala sea 1° , el incremento en los ingresos, por reducirse a una incertidumbre de 0.1° , sería del orden del 1.4% del ingreso actual.

8. Conclusiones

Utilizando como información de base los resultados de los ensayos en modelo se caracterizaron las condiciones de

Tabla 7. Efecto de la incertidumbre del ángulo de pala.

$\Delta\alpha$ ($^\circ$)	$\eta_{\min}$ (%)
0,1	93,28
0,3	92,93
0,5	92,69
1,0	92,41

operación en combinatoria de las unidades de la Central Hidroeléctrica de Salto Grande. Se observó que, debido a la incertidumbre con que se miden las diferentes magnitudes significativas, el rendimiento en que operaría una unidad sería menor que el correspondiente a la combinatoria. El rendimiento de la unidad sería entre un valor mínimo y el máximo correspondiente a la combinatoria.

En las condiciones actuales el salto neto se estaría determinando con una incertidumbre que llega a ser 0.5 m. Por su lado, el ángulo de pala es medido con una incertidumbre del orden de 0.4° aunque presentaría un error aleatorio del orden de $\pm 1^\circ$. Si las mediciones se realizaran con incertidumbres de 2 mm en la cota de la superficie libre, del 1,5% en el caudal y de $0,1^\circ$ en el ángulo de pala, se obtendrían incertidumbres en el salto neto de menos de 1 cm y de 0.11° en el ángulo de pala. Se puede suponer, en principio, que las mediciones de potencia y de apertura del distribuidor no introducirían incertidumbres significativas.

Estas reducciones de la incertidumbre de la medición tendrían como consecuencia que el rendimiento mínimo con que operaría cada unidad se incrementara entre 0.78% y 0.4%. Como consecuencia el rendimiento medio podría presentar un incremento del orden de 0.39%. Suponiendo que efectivamente se produjera este incremento de rendimiento, el ingreso anual de producción podría incrementarse en el orden de los 3 millones de dólares. Los principales aportes estarían asociados a la reducción de la incertidumbre en la medición del salto neto y del ángulo de pala. Si se redujera la incertidumbre en el salto, pero se tuvieran elevados errores aleatorios en la medición del ángulo de pala del rotor, se podrían llegar a tener rendimientos aún menores a los estimados previamente.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Agradecimientos

Agradecemos a la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande habernos dado la oportunidad de llevar adelante los trabajos que permitieron obtener los resultados que se presentan en este artículo.

Asimismo, deseamos agradecerles a los ingenieros Ignacio Texeira, Aníbal Tissoni y David Geinsensblen por los enriquecedores intercambios en innumerables reuniones.

References

- [1] Zhang H, Dou Y, LeiYe CZ, et al. Realizing the full reservoir operation potential during the 2020 Yangtze river floods. *Sci Rep Open Access*. 2022 December;12(1):2822.
- [2] Chenggang L, Tao L, Zhenci X. Impact of hydropower on air pollution and economic growth in China. *Energ Open Access*. 2021 May;14(102):2812.
- [3] Mallinson HD. Acceptance test on a model Kaplan turbine (Salto Grande). *Nat Eng lab Fluid Mech Div*. 1979 November;Y2/COD/1
- [4] Isaksson H, Sendelius M, Cervantes MJ. Cam curve in Kaplan turbine, a sensitivity analysis. *U P B Sci Bull Series D*. 2016;78(3):185–192.
- [5] Aldine A, Golitsinsky J, Y Mischenko B. Sobre los ensayos (Index-tests) de la turbina Nro.: 5 de la Central argentino-uruguaya Salto Grande. Argentina; 1982.
- [6] Dúshin VA, Y Maslov AI. Informe de la realización de trabajos para la evaluación del estado Técnico de la turbine U/H N°9 de CH Salto Grande. Jarkiv. 2012.
- [7] JCGM 200. International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM). In: BIPM. 3rd ed. 2012.
- [8] International Organization for Standardization (ISO / 1995). “Guide to the expression of uncertainty in measurement.” 1995.
- [9] Pienika R, Pais P, Cataldo J. Comparación de métodos de estimación de la incertidumbre de calibración de anemómetros de cazoleta. In: 7th Brazilian congress on metrology, ouro preto/MG. 2013 Nov.
- [10] Cataldo J, Rodríguez N, Rovira I. Análisis de las pérdidas de carga en rejillas de una central hidroeléctrica, screen head losses analysis in a hydraulic plant. *Ribagua*. 2023;10(1):18–30.
- [11] Amato W. Servicio de escaner láser 3d turbina uh-10 relevamiento de difusores y alabes de turbina, procedimientos de medición e informe analítico. 2020 Diciembre.