



Análisis de las pérdidas de carga en rejillas de una central hidroeléctrica

José Cataldo Ottieri, Nicolás Rodríguez von Sanden & Ignacio Rovira

To cite this article: José Cataldo Ottieri, Nicolás Rodríguez von Sanden & Ignacio Rovira (2023) Análisis de las pérdidas de carga en rejillas de una central hidroeléctrica, Ribagua, 10:1, 18-30, DOI: [10.1080/23863781.2023.2236302](https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2236302)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2236302>



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



[View supplementary material](#)



Published online: 29 Jul 2023.



[Submit your article to this journal](#)



Article views: 711



[View related articles](#)



[View Crossmark data](#)

Análisis de las pérdidas de carga en rejillas de una central hidroeléctrica

José Cataldo Ottieri, Nicolás Rodríguez von Sanden and Ignacio Rovira

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

RESUMEN

En base a un planteo teórico y al análisis de datos se constató que el coeficiente de pérdida de carga de la conducción de entrada de las turbinas de Salto Grande sería de entre 2.38 y 2.77, siendo disímil en cada vano debido a que los caudales circulantes por cada vano serían diferentes. Además, el coeficiente de pérdida de carga, determinado a partir de la medida con un transductor de presión en la embocadura, resulta en promedio 3.6 veces superior al determinado a partir de la medida en la recata. Entre las acciones que actúan en dirección normal al flujo, parece ser mayor la debida a la aceleración de Coriolis, debido a lo cual el flujo presentaría una componente en dirección paralela a la entrada hacia margen izquierda. Sobre los tabiques que separan los vanos, se produciría una separación de capa límite, debido a lo cual se produciría un bloqueo diferente en cada vano. Esto tendría como consecuencia la diferencia en los caudales por cada vano y la diferencia entre las pérdidas de carga calculadas con el transductor de presión y la determinada a partir de la medición en la recata.

Screen head losses analysis in a hydraulic plant

ABSTRACT

A theoretical approach and data analysis performed on the flow at the intakes of the Salto Grande turbines showed that the coefficient of head local losses would be between 2.38 and 2.77. Such value varies for each intake because the features of flows through those intakes are different. Further, the local loss coefficients measured with a pressure transducer at the mouth is on average 3.6 times higher than that determined from direct measurement at the slots. Among the flow features in the direction normal to the main flow, the Coriolis force is posited as a potential explanation, according to which the flow would present a velocity component increasing the percentage of flow toward the left bank. In each intake, a boundary layer separation takes place. This generates the difference in head losses calculated with the pressure transducer."

ARTICLE HISTORY

Received 2 July 2022
Revised 28 January 2023
Accepted 2 July 2023

KEYWORDS

Head losses; hydropower entrance; measurement analysis; hydropower; boundary-layer separation

1. Introducción

La central Hidroeléctrica de Salto Grande (CHSG), emprendimiento bi-nacional entre Argentina y Uruguay, se compone de catorce unidades hidrogeneradores cada una de potencia nominal de 135 MW, con un salto de 25.3 m, un caudal por máquina de 615 m³/s y un diámetro de rotor de 8.5 m. La puesta en marcha de esta central ocurrió entre los años 1979 y 1983, habiendo mantenido un servicio ininterrumpido.

Luego de más de 30 años de la puesta en marcha la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM) decidió llevar adelante un proceso orientado al análisis de las posibles acciones para renovar las

unidades de la CHSG. Entre tales acciones se decidió proceder al recambio de los sistemas de regulación de velocidad (SRV) pasando de los originales sistemas mecánicos a sistemas electrónicos con niveles de precisión significativamente superiores. Surgió entonces la inquietud de saber si los niveles de precisión y exactitud de los sistemas de medición asociados al SRV permitirían hacer un uso de sus características de operación.

Se propuso entonces llevar adelante un acuerdo entre CTM y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UDEAR) con el objeto de analizar los equipos de medición existentes, los procedimientos de

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

This article has been republished with minor changes. These changes do not impact the academic content of the article.

Supplemental data for this article can be accessed online at <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2236302>

© 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 License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted 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.

medición, posibles anomalías que aparecen en los procesos de medición y proponer el eventual recambio de equipamiento de medición.

Debe tenerse en cuenta que una central hidroeléctrica como Salto Grande además de generar energía eléctrica con un relativamente bajo efecto sobre el ambiente, presenta beneficios como es el control de crecidas 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. Atendiendo a estos aspectos se entiende relevante utilizar el recurso hídrico en la forma más eficiente posible, de 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.

En particular, la potencia referida al flujo en peso disponible en una central hidroeléctrica, o lo que se denomina salto bruto, es posible calcularla como la diferencia entre la cota de la superficie libre del lago y la cota de la superficie libre del río o lo que se denomina restitución, tal como se define en [1] o en [2].

En la toma de cada unidad de la central se tiene una embocadura con rejas para impedir la entrada de grandes objetos a la turbina. Estas rejas suelen producir una pérdida de carga en el flujo. Debido a esta pérdida y a que se entrega una energía cinética remanente al río, la potencia referida al flujo en peso efectivamente disponible en la turbina es algo menor al salto bruto y se denomina salto neto.

Durante el ensayo de una unidad, ya sea en modelo [3,4] o en prototipo [1], es necesario determinar el salto neto para cada punto de funcionamiento ensayado. Asimismo, durante la operación ordinaria de cada unidad de una central hidroeléctrica, debería conocerse el salto neto de cada punto de operación, a los efectos de ajustar la posición de los órganos de regulación.

En una central hidroeléctrica es posible realizar mediciones destinadas a determinar la carga de lago disponible, así como la carga disponible corriente abajo de la embocadura con reja.

Para determinar la carga corriente abajo de rejas, es posible hacerlo o bien midiendo con transductores de presión ubicados sobre las paredes laterales en los vanos que componen la embocadura en cada unidad, o bien midiendo la cota de la superficie libre de las ranuras de las compuertas (recata) mediante una regla.

En el caso particular de la CHSG se han detectado algunas discrepancias entre los resultados de la medición por los diferentes métodos de medición. Entre estas discrepancias, se destaca una diferencia entre la carga medida con el transductor de presión y la realizada con la regla graduada. También se encuentra una discrepancia entre las cargas medidas entre cada vano, en todas las unidades. A pesar que la CHSG se compone de un vertedero central con dos salas de máquinas laterales con siete unidades cada una, las discrepancias detectadas se presentan en todo el ancho de la central.

Se decidió entonces, entre los trabajos realizados en el marco del acuerdo entre CTM y UDELAR, llevar adelante actividades, en conjunto con técnicos de Salto Grande, con el objeto de analizar las mencionadas diferencias e identificar sus posibles orígenes.

El trabajo implicó, en primer lugar, estimar el coeficiente de pérdida de carga en la entrada de cada unidad y, a partir de lo cual, analizar las discrepancias entre las diferentes mediciones. Luego, se analizaron las condiciones del flujo inmediatamente corriente arriba a la entrada de las unidades y, finalmente, la forma en la cual estas condiciones podrían afectar las mediciones de presión en los vanos del ducto de entrada.

2. Estimación de coeficiente de pérdida de carga en rejas

En la Figura 1 se presenta un corte de una unidad de la central de Salto Grande.

A su vez, se identifica la cota de la superficie libre del lago (Z_0) y de la restitución (Z_4).

El conducto de entrada de cada unidad está dividido en tres vanos. En la Figura 2 se aprecia una vista en planta de dichos vanos.

En la Figura 2 se observa que el ancho de cada vano resulta constante, con un valor aproximado de 6,5 m. Por otro lado, en la vista en corte se observa que la sección recta disminuye desde la entrada hasta donde se conecta con la cámara espiral. En particular, su altura presenta diferentes valores donde se ubica la reja (velocidad V_1 en Figura 1), donde se ubica el transductor de presión (velocidad V_2) y donde se ubica la recata (V_R). En la Tabla 1 se presenta las características geométricas de cada sección. Asimismo, la cota de la superficie libre en dichas tres secciones sería Z_1 , Z_2 y Z_R respectivamente.

2.1. Estimación de pérdida de carga en base a información bibliográfica

Se considera la determinación de la pérdida de carga en la entrada, $\zeta_{entrada}$ según la ecuación 1.

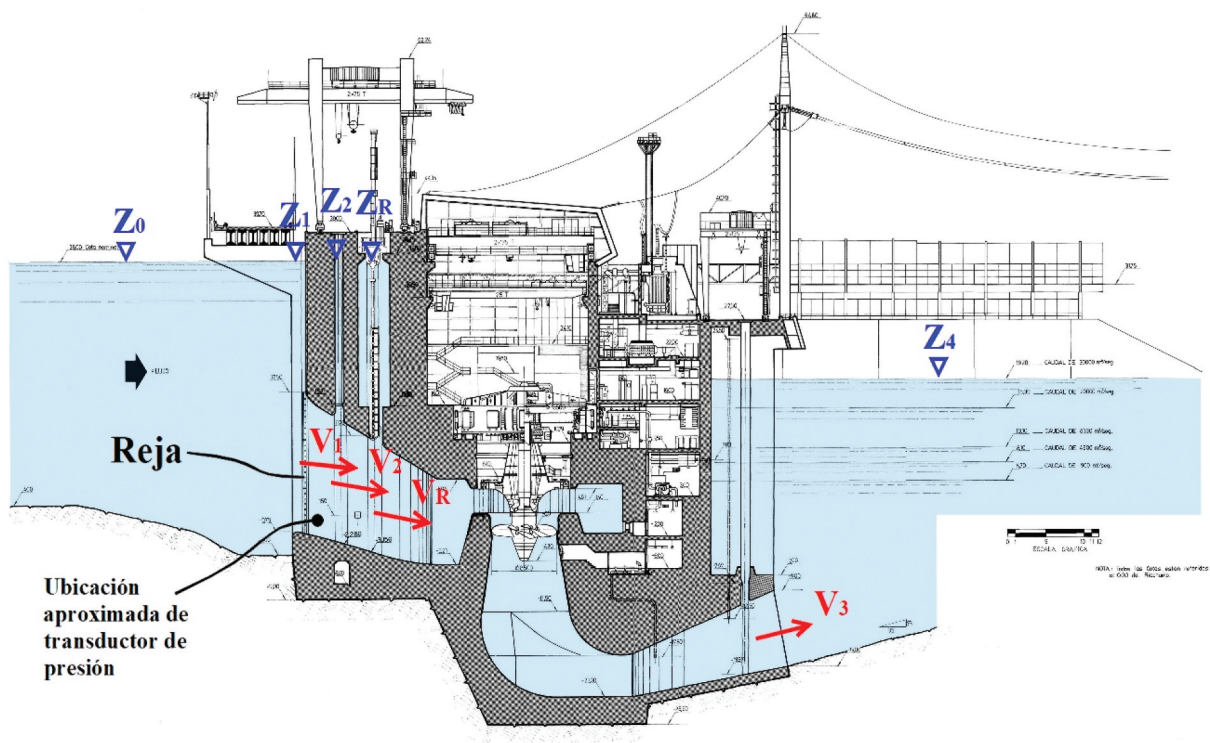


Figura 1. Vista en corte de una unidad.

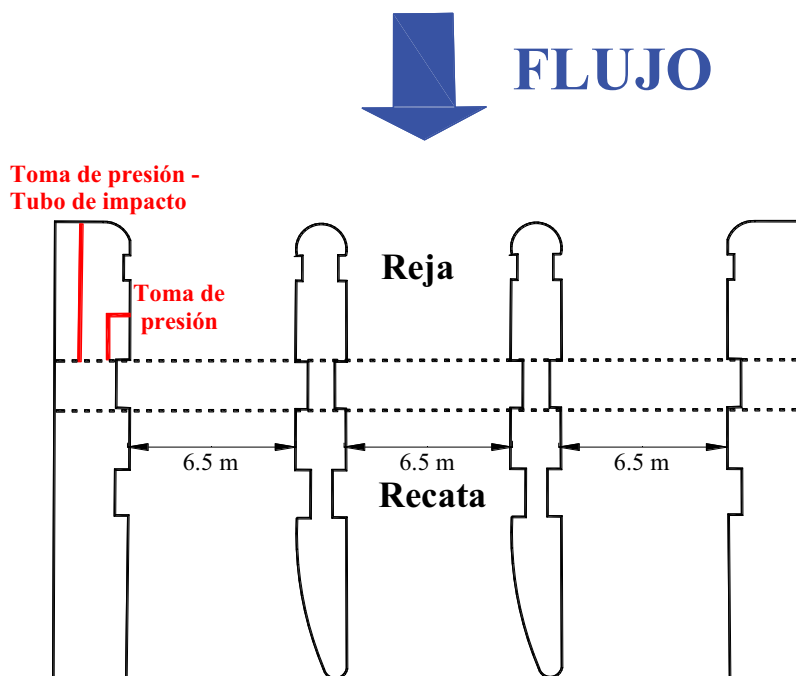


Figura 2. Vista en planta de obra de toma de una unidad de la central.

Tabla 1. Características geométricas.

Posición	Altura (m)	Área del vano (m ²)	Diámetro Hidráulico (m)	Distancia a sección de reja (m)
Reja	18.25	118.6	9.6	0
Transductor (Rittmeyer)	16.98	110.4	9.4	1.6
Recata	14.92	97.0	9.1	9.1

Tabla 2. Coeficiente de pérdida de carga calculado.

Porosidad		66,4%
Referencia	Metodología	$k_{entrada}$
Blevins, 1984 [5]	Embocadura + Reja	1.89
ASHRAE, 2005 [6]	Embocadura + Reja	1.20
Idelchik, 2007 [7]	Embocadura + Reja	1.97
Idelchik, 2007 [7]	Embocadura con reja	2.70

$$\zeta_{entrada} = k_{entrada} \frac{V_i^2}{2g} \quad (1)$$

donde $k_{entrada}$ es el coeficiente de pérdida de carga referido a la energía cinética en una sección de referencia i .

En distintos manuales de hidráulica se presentan valores de los coeficientes de pérdida de carga en base a información empírica. En los manuales consultados Blevins, 1984 e Idelchik, 2007 el coeficiente de pérdida de carga correspondiente a una embocadura como la que se tiene en cada unidad de Salto Grande sería **0.5**.

Para calcular el coeficiente de pérdida de carga de la reja es necesario conocer su porosidad. Esta característica se define como la razón entre el área libre de la reja y el área de la sección recta donde se ubica la reja.

Se destaca que la velocidad de referencia que se utiliza en la ecuación 1, se calcula en la sección recta del ducto donde se ubica la reja. Las rejas están constituidas, principalmente, por barras de sección recta rectangular de 22 mm de espesor, en el lado que se enfrenta al flujo, y una distancia entre centros de 250 mm. Además, dispone de soportes construidos por barras de sección recta PNI 400, que tienen un ala de 300 mm y de barras de sección L con el lado de 3/8 de pulgada enfrentado al flujo. La reja que se ubica en cada vano tiene tres tramos, inferior, medio y superior, cada uno de 4.6 m de altura y 6.7 m de ancho. Suponiendo que las rejas están limpias, se estimó que la porosidad resulta 66.4%.

En la **Tabla 2** se consignan los valores hallados, así como la referencia bibliográfica utilizada. Para el cálculo del coeficiente de pérdida de carga se siguió la metodología propuesta en cada manual consultado. La referencia ‘Embocadura+Reja’ se refiere a que el coeficiente de pérdida de carga se calculó sumando el coeficiente correspondiente a la embocadura (0.5) el de la reja para la porosidad estimada. La referencia ‘Embocadura con reja’ se refiere a que el manual consultado disponía información de la pérdida de carga en dicha situación, es decir, de una embocadura con una reja adosada.

En la **Tabla 2** se aprecia que el valor del coeficiente de pérdida de carga deducido a partir de ASHRAE, 2005, se aparta significativamente del valor deducido a partir de las demás referencias, en tanto se aprecia una consistencia entre los demás valores.

En una central hidroeléctrica, los procesos como la producción de vorticidad, así como la producción de turbulencia, pueden tener mayor o menor significancia que la que tuvieron en las distintas experiencias en la que se basan los cálculos realizados. A su vez, en cada caso de medición puntual, estos procesos pudieron haber aparecido con distinto grado de relevancia. En tal sentido, resulta conveniente manejar como valor para el coeficiente de pérdida, un promedio entre los valores hallados, el cual resulta de 1.94.

2.2. Estimación de la pérdida de carga en base a la información disponible

En la Central de Salto Grande se hacen mediciones de la carga del lago (H_{lago}) con el tubo de impacto que se ve en la **Figura 2**, de la presión sobre una pared de uno de los vanos de entrada mediante transductores (p_{Rit}), también mostrado en **Figura 2**, y de las cotas de superficie libre en la zona de recatas (h) mediante reglas graduadas referido a una cota de referencia de 37.68 m.

En cada unidad es posible estimar la carga piezométrica en base a los últimos parámetros según las siguientes ecuaciones.

$$h_{Rit} = \frac{p_{Rit}}{\gamma} + Z_{Rit} \quad (2)$$

$$h_R = 37,68 - h \quad (3)$$

donde h_{Rit} es la carga piezométrica obtenida por el sistema Rittmeyer, mediante la medición de la presión p_{Rit} medida por un transductor de presión a una cota Z_{Rit} . Por otro lado, h_R es la carga piezométrica obtenida a partir de la medida de las recatas descrita en el párrafo anterior.

Si se supone que la pérdida de carga entre la sección donde se ubica el transductor de presión y la sección de la recata es despreciable, entonces la pérdida de carga en la entrada ($\zeta_{entrada}$) podría calcularse de acuerdo a las ecuaciones 4 o 5.

$$\zeta_{entrada} = H_{lago} - \left(h_{Rit} + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (4)$$

$$\zeta_{entrada} = H_{lago} - \left(h_R + \frac{V_R^2}{2g} \right) \quad (5)$$

Expresando la pérdida de carga en la entrada según la expresión 1, dividiendo las ecuaciones 4 y 5 por $v_1^2/2g$ y considerando las dimensiones del ducto de entrada consignadas en la [Tabla 1](#), se obtienen las siguientes expresiones.

$$k_{entrada, Rittmeyer} = \frac{H_{lago} - h_{Rit}}{V_1^2/2g} - 1,155 \quad (6)$$

$$k_{entrada, Recata} = \frac{H_{lago} - h_R}{V_1^2/2g} - 1,496 \quad (7)$$

2.2.1. Coeficiente de pérdida de carga promedio

Utilizando información de entre los años 2014 y 2019, se dedujo el coeficiente de pérdida de carga en cada vano a partir del promedio de la medición de cota en las correspondientes recatas. A modo de ejemplo, se presenta en la [Figura 3](#) el resultado correspondiente a los años 2015 y 2019.

En cada año se observa que los valores de coeficiente de pérdida se ordenan alrededor de algún valor, o tienden a un valor luego de adoptar valores mayores. Los valores elevados de coeficiente de pérdida de carga se asocian a eventos de crecida durante los cuales se produce la obturación de las rejas. Por tal motivo, se entiende que no serían representativos de la operación de las rejas en condiciones normales y no fueron considerados para determinar los coeficientes de pérdida de carga.

Por lo tanto, se determinó para cada año, el valor del coeficiente de pérdida de carga al que convergían todas las unidades y se presentan en la [Tabla 3](#).

Los valores presentados en la [Tabla 3](#), que dan un promedio de 2.38, resultan coherentes con el valor que se deduce a partir del ensayo de Index Test realizado en el año 1982 [8], en el cual se obtuvo un coeficiente de pérdida de carga en la entrada de 2.77. Merece destacarse que para el año 2018 se dispusieron de muy baja cantidad de datos por lo que el resultado consignado en la [Tabla 3](#) para ese año no sería significativo.

Se destaca que los valores que se presentan en la [Tabla 3](#) son similares al valor consignado en la [Tabla 2](#), calculado mediante la metodología ‘Embocadura con reja.’

2.2.2. Relación entre Recata y transductor de presión

Se analizó la discrepancia entre los valores coeficiente de pérdida de carga determinados a partir de las ecuaciones 6 y 7.

En la [Figura 4](#) se presenta la relación que hay, en cada unidad hidráulica, entre el promedio del coeficiente de pérdida de carga obtenido con el transductor de presión ($k_{entrada, Rittmeyer}$, ecuación 6) y el promedio de dicho coeficiente obtenido a partir de la medición en la Recata (ecuación 7), para el año 2019.

Se aprecia cierta relación lineal entre ambos parámetros, resultando los coeficientes calculados a partir de la medición con el transductor de presión, del orden del doble a los que se determinan con las mediciones en las recatas.

A los efectos de verificar este comportamiento, se calculó para cada caso analizado en el año 2019, la diferencia entre el coeficiente de pérdida de carga determinado a partir de la medición con transductor y el valor de dicho parámetro determinado con la medición en la recata. Luego se construyó la curva de densidad de probabilidad para cada unidad, lo cual se presenta en la [Figura 5](#).

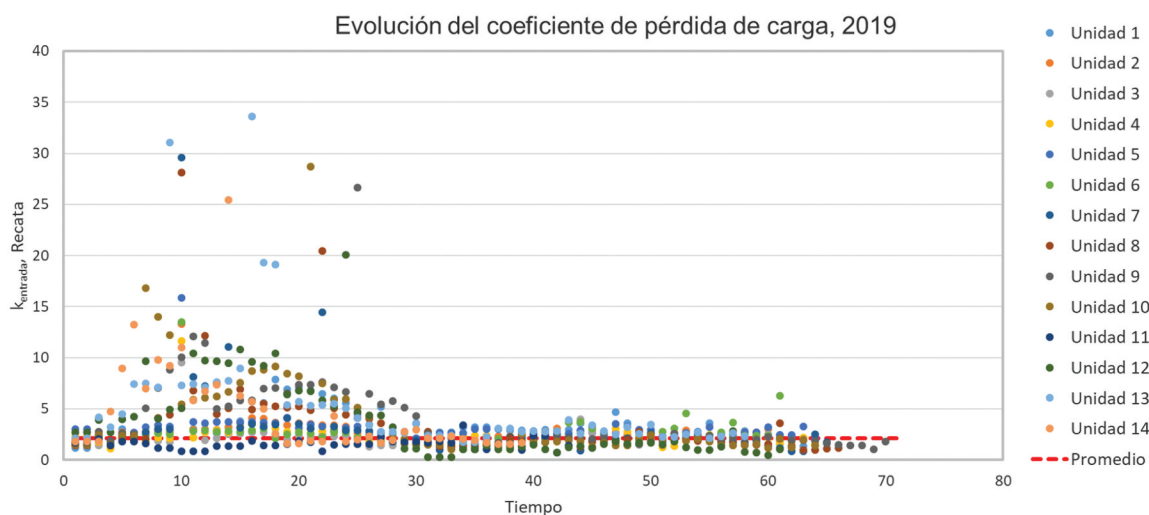
En la [Figura 5](#) resulta difícil identificar los valores de referencia de cada curva de densidad de probabilidad. A tales efectos, se aplicó una técnica para estimar la distribución de núcleo de la población analizada (Kernel Density Estimation (KDE), tal como se presenta en [9,10] y [11]). Para esto se separaron las series históricas de diferencia de coeficiente de pérdida de carga para cada unidad y se halló entonces dicha distribución. El resultado se presenta en la [Figura 6](#).

A partir del resultado presentado en la [Figura 6](#) se determinó, para cada unidad, la diferencia promedio entre los coeficientes de pérdida de carga, lo cual se presenta en la [Tabla 4](#).

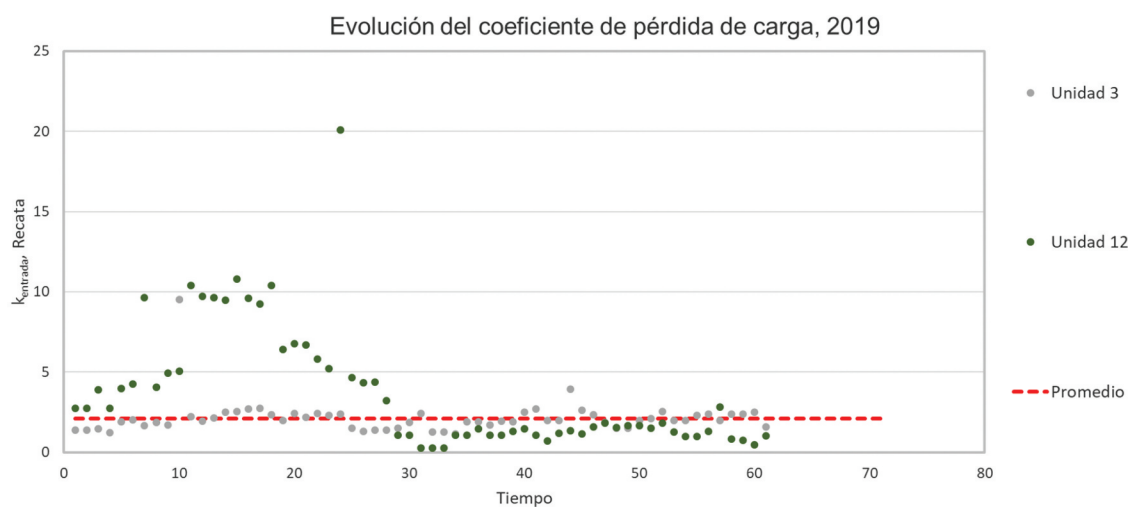
Promediando todas las unidades, la diferencia resulta de 3.6, por lo que el coeficiente de pérdida de carga estimado a partir de la medición con el transductor de presión resulta del orden de 6, si se suma la diferencia al valor promedio de coeficiente de pérdida de carga en la recata, es decir, más de dos veces el calculado con la medición en la recata.

El valor del coeficiente de pérdida de carga hallado a partir de la medición del transductor, resulta significativamente mayor no sólo al hallado por la otra medición, sino que también al calculado a partir de datos bibliográficos.

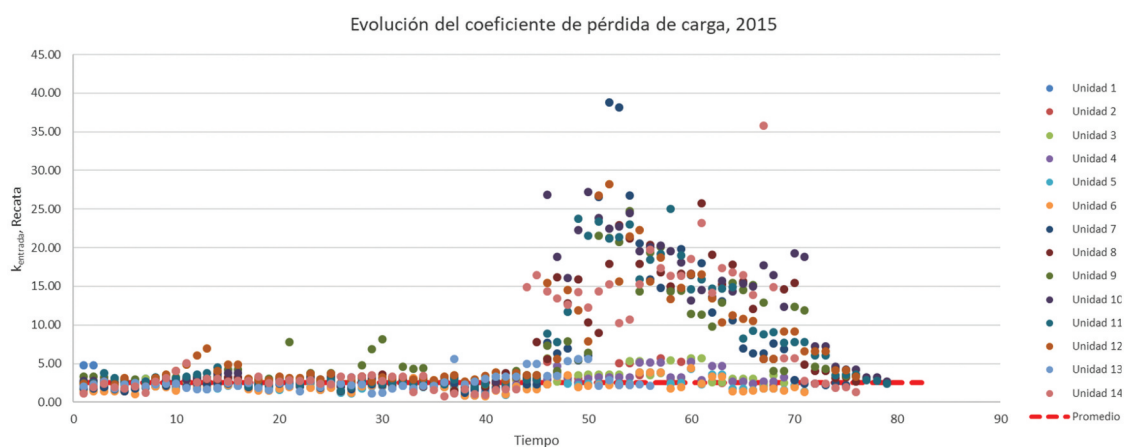
Aunque se haya verificado la hipótesis de pérdida de carga despreciable entre la sección de medición con el transductor y la sección de la



(a)



(b)



(c)

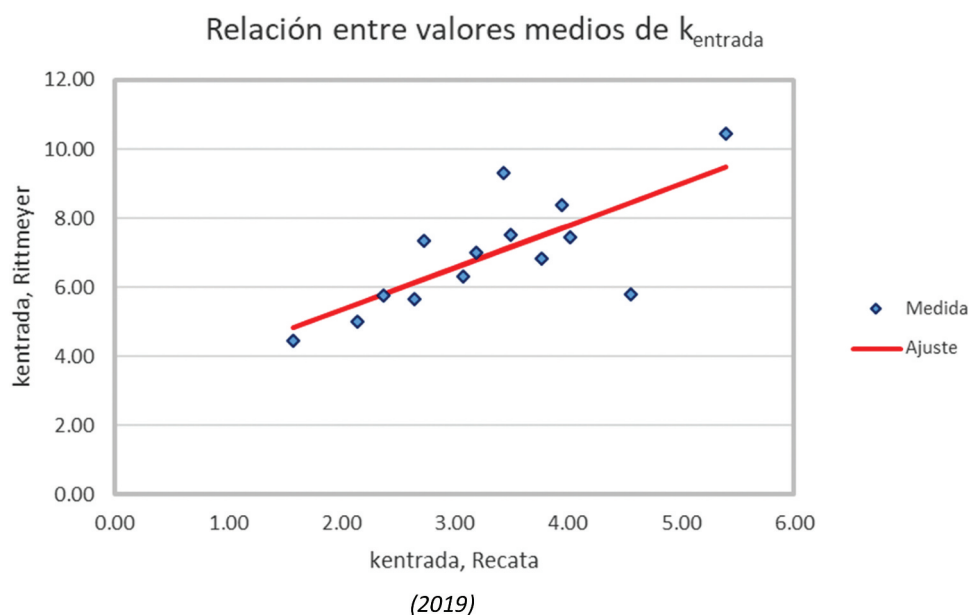
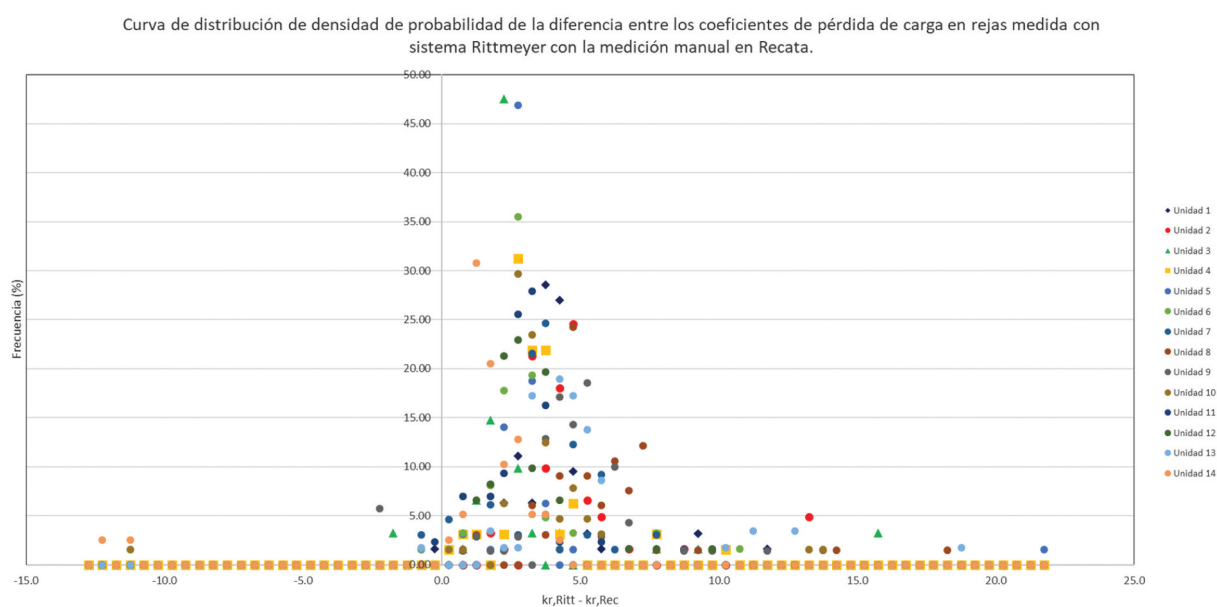
Figura 3. Coeficiente de pérdida de carga para el año 2015 y 2019 (paso promedio temporal de 5 días). (a) Todas las unidades año 2019, (b) Unidades 3 y 12, año 2019, (c) Todas las unidades año 2015.

Tabla 3. Valores de coeficiente de pérdida de carga promedio.

Año	K_{entrada} Recata, promedio
2014	2.32
2015	2.54
2016	2.74
2017	2.82
2018	1.77
2019	2.10

recata, sería esperable que la pérdida de carga estimada a partir de la medición en la recata hubiera sido mayor.

Estos resultados llevan a plantear que en la posición del transductor se está midiendo un valor de carga piezométrica menor que el correspondiente a la sección donde se ubica.

**Figura 4.** Relación entre coeficientes de pérdida de carga ($R^2 = 0.55$).**Figura 5.** Distribución de densidad de probabilidad de la diferencia de coeficientes de pérdida de carga.

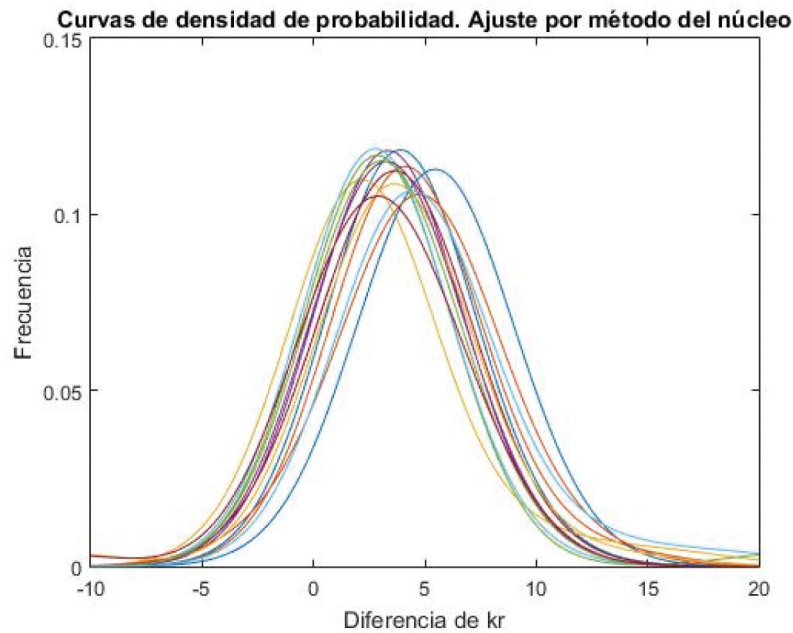


Figura 6. Distribución de densidad de probabilidad núcleo.

Tabla 4. Diferencia del coeficiente de pérdida de carga promedio para cada unidad.

Unidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Diferencia	3.9	4.1	2.2	3.3	2.9	2.8	3.6	5.5	4.8	3.6	3.3	3.1	4.4	2.9

2.2.3. Flujo por cada vano

Una peculiaridad que surge de las mediciones de la carga piezométrica en las recatas de cada vano es que hay una marcada diferencia entre los valores medidos en el vano ubicado sobre la margen izquierda respecto a la que se mide en el vano sobre margen derecha.

Para analizar dicha diferencia se calculó, en primer lugar, la diferencia entre la carga del lago y la carga piezométrica medida en cada recata, tal como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\Delta h_{\text{entrada}} = H_{\text{lago}} - h_R \quad (8)$$

Luego, en cada unidad y para cada medición considerada, se calculó la diferencia entre estos valores para el vano de margen izquierda (U) así como la correspondiente para el vano sobre margen derecha (A), tal como expresa la siguiente ecuación.

$$\text{Diferencia de carga} = \Delta h_{\text{entrada}, U} - \Delta h_{\text{entrada}, A} \quad (9)$$

Para cada unidad se determinó, para cada año considerado, la curva de densidad de probabilidad de la magnitud ‘Diferencia de carga.’ A modo de ejemplo, en la Figura 7 se presenta esta curva para el año 2019.

En la Figura 7 se observa la significativa mayor probabilidad de ocurrencia que tienen los valores positivos

con respecto a los negativos. Para tener una evaluación cuantitativa, en la Tabla 5 se presenta, para cada año y para cada unidad, la probabilidad que el valor de la Diferencia de carga sea positivo y, en la Tabla 6, el valor medio de dicha magnitud.

A partir de los valores presentados en la Tabla 6 se obtiene una diferencia promedio de 0.18 m.

Suponiendo que los coeficientes de pérdida de carga de la entrada de cada vano de una unidad resultan sensiblemente iguales, el resultado obtenido lleva a plantear que el caudal que circula por el vano sobre margen izquierda resulta mayor que el que circula por el vano sobre margen derecha.

El planteo anterior se podría producir tanto debido a factores externos, como pueden ser las características del flujo incidente como ser su dirección, como a factores internos a la unidad, como podría ser la excentricidad del eje del rotor respecto al plano de simetría de la embocadura.

3. Análisis del flujo en la toma de las unidades

En las proximidades de la entrada a las unidades, el flujo en el lago de la central tendría una dirección como la que se indica en la Figura 8 elaborada a partir de imagen obtenida de Google Earth®.

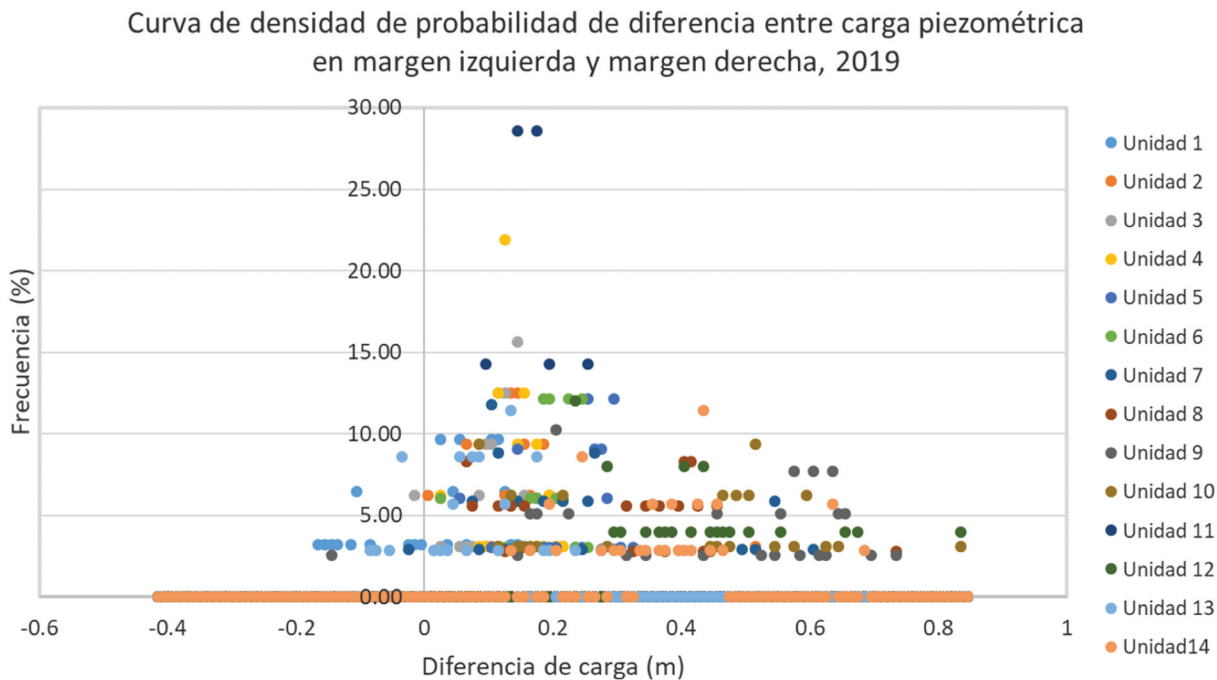


Figura 7. Curva de densidad de probabilidad de la diferencia de carga piezométrica entre márgenes, para cada unidad, en el año 2019.

Tabla 5. Probabilidad de Diferencia de carga positiva.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2014	69	88	97	100	97	91	100	100	97	100	97	100	100	100
2015	97	91	97	100	100	100	97	100	97	100	94	97	100	100
2016	100	84	96	89	89	96	100	93	97	100	100	98	76	100
2017	100	100	63	100	100	100	88	100	100	100	100	100	92	100
2018	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	67	100
2019	65	100	94	100	100	100	97	100	97	100	100	100	83	100

Tabla 6. Valor medio de Diferencia de carga.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2014	0.02	0.05	0.08	0.12	0.13	0.11	0.21	0.13	0.24	0.26	0.30	0.34	0.14	0.25
2015	0.11	0.08	0.13	0.17	0.15	0.14	0.11	0.15	0.20	0.21	0.28	0.33	0.14	0.18
2016	0.09	0.11	0.07	0.11	0.12	0.12	0.45	0.28	0.46	0.44	0.21	0.20	0.03	0.18
2017	0.11	0.12	0.05	0.15	0.16	0.19	0.09	0.11	0.17	0.18	0.27	0.36	0.08	0.33
2018	0.11	0.14	0.11	0.13	0.16	0.16	0.07	0.09	0.20	0.14	0.15	0.27	0.10	0.19
2019	0.02	0.15	0.11	0.14	0.22	0.19	0.22	0.30	0.45	0.38	0.17	0.42	0.08	0.37

Sobre el flujo que se desarrolla en el embalse, se identifican dos acciones con dirección normal o aproximadamente normal a la indicada en la [Figura 8](#).

Una primera acción es la debida al viento. El viento sopla con mayor probabilidad de ESTE a OESTE. Esto es posible observarlo en la [Figura 9](#), donde se presenta la rosa de los vientos de dirección obtenida en la estación Colonia Rubio, ubicada en el departamento de Salto, 45 km al ESTE de Salto Grande en una zona de llanura.

El valor medio anual de viento en esa posición y a 10 metros del suelo, resulta de 4.4 m/s, donde la longitud

de rugosidad vale 10 cm. La tensión rasante (τ) que produce el viento sobre la superficie del lago, donde la longitud de rugosidad se estimó en 1 cm, es posible estimarla de acuerdo a la ecuación que sigue.

$$\tau = \rho \cdot u_*^2 \quad (10)$$

En la ecuación 10, ρ es la densidad del aire y u_* es la velocidad de fricción sobre el lago. Este último parámetro es posible estimarlo a partir de la estadística de velocidad del viento, asumiendo que la distribución de



Figura 8. Dirección aproximada del flujo.

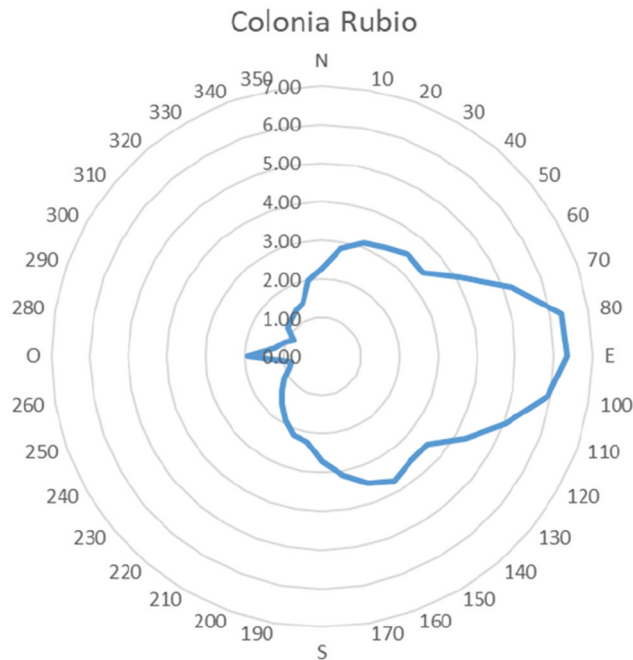


Figura 9. Rosa de los vientos de dirección. Colonia Rubio.

velocidad media del viento es de tipo logarítmica, y considerando el cambio de rugosidad.

La tensión rasante estimada que induce el viento en promedio sería de 0.1 N/m^2 .

La otra acción que produce una fuerza perpendicular al flujo es la debida a la aceleración de Coriolis, tal como se esquematiza en la Figura 10. Esta aceleración la experimenta toda la masa de fluido que se mueve y se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$|\vec{a}_C| = |2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_R| = |2 \cdot \Omega \cdot v_R \cdot \sin(\varphi)| \quad (11)$$

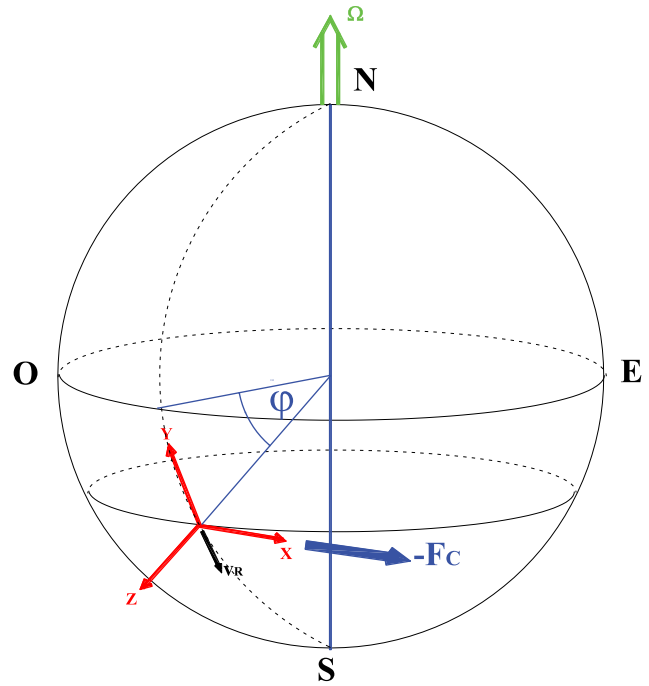


Figura 10. Aceleración de Coriolis.

El vector Ω es el vector rotación de la Tierra, $\vec{v}_R$ es la velocidad a la cual se mueve el fluido, siendo la velocidad relativa a un referencial solidario a la Tierra y φ es la latitud.

Suponiendo que el flujo de agua tiene una velocidad de 1.5 m/s y que la profundidad del mismo fuera 18 m , la tensión lateral por unidad de superficie plana se estima en 2.25 N/m^2 , de OESTE a ESTE. Se destaca que el tramo del lago de interés presenta una longitud y un ancho del orden de los 10 km , como puede corroborarse en la Figura 11 (elaborada a partir de una imagen obtenida en Google Earth *), por lo que el número de Rossby, cuyo cálculo se realiza mediante la ecuación 12, correspondiente adopta un valor del orden de la unidad, lo que implica que esta fuerza sería significativa en la dirección normal al flujo.

$$Ro = U/fL \quad (12)$$

$$f = 2\Omega \sin \varphi \quad (13)$$

donde U la velocidad del flujo de agua, f la frecuencia de Coriolis, calculada según la ecuación 13, L la escala espacial considerada como el tramo del lago de interés, Ω la velocidad de rotación de la Tierra ($7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$) y φ la latitud considerada para el fenómeno de estudio.

En conclusión, la fuerza que se hace sobre la masa de fluido debido a la aceleración de Coriolis es más de un orden de magnitud mayor a la del viento, lo cual lleva a postular que el flujo en el lago tendría una componente normal a la dirección mostrada en la Figura 8 y de sentido hacia la margen izquierda.

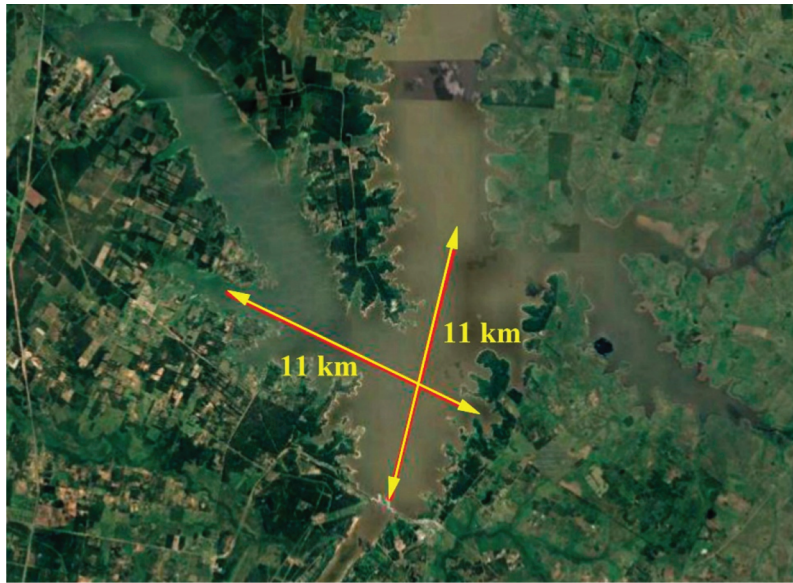


Figura 11. Vista del lago con escala de longitud.

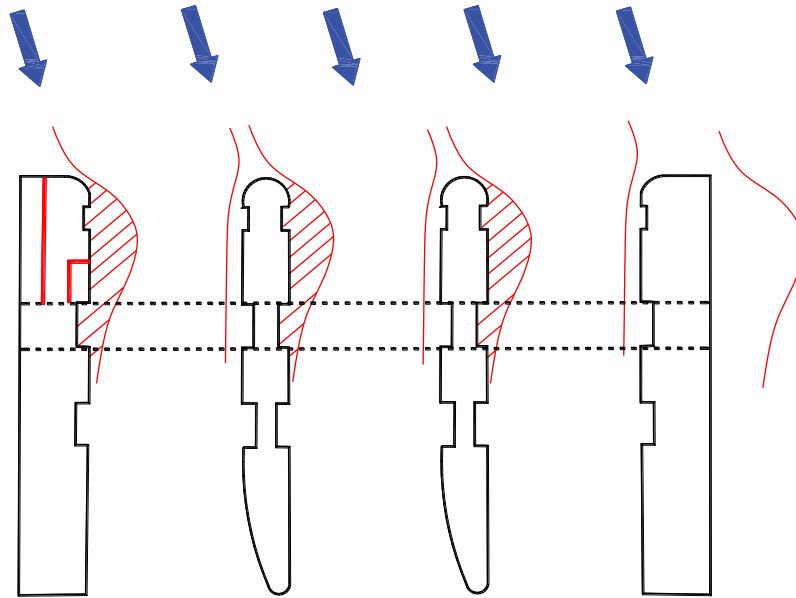


Figura 12. Patrón del flujo en la entra de una unidad.

Este resultado puede ser corroborado mediante observación del personal de la central en eventos de crecida que destacan que los residuos se acumulan en margen izquierda.

4. Efecto de distorsiones del flujo en la medición de carga en la toma

4.1. Análisis de la diferencia de carga en el transductor de presión y en recata

En consecuencia, el flujo, en la entrada de cada unidad presentaría un patrón como el presentado en la [Figura 12](#).

Se observa que en la entrada de una unidad se tiene dos tabiques centrales iguales y de un ancho aproximado de 2 m, en tanto los tabiques que separan la entrada de dos unidades aledañas son del orden de 6 m. Debido a que el flujo presenta un cierto ángulo respecto al eje de cada vano, alrededor de los tabiques se produciría una separación de capa límite. Al desarrollarse el flujo alrededor del borde de un tabique, las líneas de flujo presentan una curvatura lo cual induce una reducción de la presión sobre la pared como se presenta en la [Figura 13](#).

$$\partial p / \partial r$$

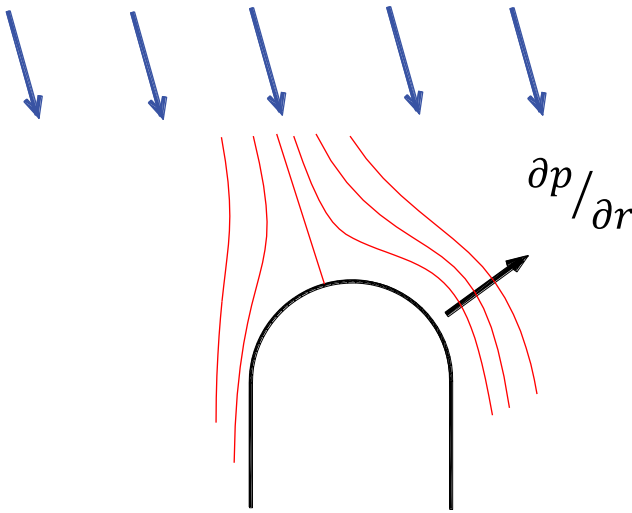


Figura 13. Esquema del flujo alrededor del borde de un tabique.

Este gradiente de presión radial es proporcional al cuadrado de la velocidad e inversamente proporcional al radio de curvatura de las líneas de flujo, tal como expresa la ecuación 14.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v^2}{r} \quad (14)$$

Para caudales de entre 300 m³/s y 600 m³/s, el valor de este gradiente estaría entre -723 Pa/m y -2890 Pa/m.

En un flujo en que la capa límite se mantiene adherida a la pared, la presión de pared sigue la evolución de la presión del flujo. Se dice que el flujo ‘imprime’ la presión en la pared. Sin embargo, si en algún punto el flujo presentara separación de capa límite, la presión en la pared, en la zona de flujo separado, se mantendría sensiblemente constante e igual a la presión en el punto de separación.

En un caso como el objeto de análisis, la ocurrencia de la separación de capa límite se debe a la existencia de un gradiente adverso de presión en la dirección del flujo, lo cual ocurre en la capa límite que se desarrolla sobre cada tabique.

Por lo tanto, es de esperar que en la posición donde se ubica el transductor de presión, el valor de piezométrica esté comprendido entre 0.1 m y 0.4 m por debajo de la piezométrica que se tendría en el flujo y que sería la que se mediría en la recata. Este valor se deduce del gradiente de presión radial expresado en la ecuación 12.

A partir de los valores de diferencia de coeficientes de pérdida de carga consignados en la [Tabla 4](#) para caudales entre 300 m³/s y 600 m³/s, se obtienen diferencias de presiones de ente 0.1 m y 0.6 m,

valores que resultan coherentes con los presentados en el párrafo anterior.

4.2. Análisis de la diferencia de pérdida de carga entre vanos

El ancho que adquiere la región del flujo separado que se muestra en la [Figura 12](#) resulta escalable con el espesor del tabique, por lo que, en el vano ubicado sobre la margen derecha, el ancho de la zona bloqueada es del orden de tres veces al que se tiene en el vano ubicado en el vano sobre margen izquierda.

Siguiendo lo planteado en [12], donde se propone una relación entre el ancho de la zona separada del flujo y las dimensiones del obstáculo, el ancho de la zona de flujo separado puede ser el orden de 0,22 veces el ancho del tabique. Sólo a los efectos de estimar el orden de diferencia entre los caudales que circula por cada vano, se asume que los valores de la velocidad en cada vano resultan del mismo orden. Por esta razón, los caudales resultan proporcionales al área de pasaje, en tanto que las pérdidas de carga son proporcionales al cuadrado de la relación de áreas. En tal sentido, se estimó que la pérdida de carga sobre margen izquierda es del orden del 40% superior a la que se registraría sobre margen derecha, lo cual resulta coherente con lo presentado en la [Tabla 6](#).

5. Conclusiones

Utilizando información bibliográfica se estimó que el coeficiente de pérdida de carga en la entrada de la turbina, que incluye la embocadura y la reja, sería del orden de 2.77. Los valores experimentales dieron lugar a un valor promedio de dicho parámetro de 2.38, mientras que el medido durante el Index Test del año 1982 se obtuvo un coeficiente de pérdida de carga de 2.77.

El coeficiente de pérdida de carga obtenido a partir de la medida con el transductor de presión resulta en promedio 3.6 veces superior al obtenido con la medida en la recata, es decir que el coeficiente de pérdida de carga deducido a partir de la medición en el transductor de presión resulta más de dos veces el calculado con la medición en la recata.

En base al planteo teórico, así como al análisis de los datos, se constata que la pérdida de carga de la entrada, medida en el vano sobre el margen izquierdo, es mayor que la medida sobre margen derecho, resultando una diferencia promedio de 0.18 m. Tal comportamiento se asocia a que por el vano sobre margen izquierdo circula un caudal mayor que por el vano sobre margen derecho.

Entre las acciones que actúan sobre el flujo, en dirección normal al mismo, se identifica el viento que ejercería una tensión rasante de 0.1 N/m^2 hacia margen derecha y la fuerza de Coriolis que ejercería una tensión de 2.25 N/m^2 hacia margen izquierda. En consecuencia, la tensión debida a la aceleración de Coriolis sería mayor por lo que el flujo presentaría una componente en sentido hacia margen izquierda.

Sobre los tabiques que separan los vanos, se produciría una separación de capa límite. La burbuja de separación tendría un ancho del orden 0.22 veces el ancho del tabique de separación entre los vanos. Debido a que el ancho del tabique de separación entre las unidades es tres veces mayor que el ancho de los tabiques de separación entre vanos de una misma unidad, el ancho de la región de separación de capa límite sería mayor en los vanos de margen derecha de cada unidad que en el resto de los vanos.

Esto tiene como consecuencia un bloqueo mayor del flujo en el vano sobre margen derecha, lo cual induce una derivación del flujo hacia margen izquierda.

A su vez, se induce una menor presión en la posición donde se ubica el transductor de presión. Si bien el uso del transductor de presión es una forma aceptada para determinar la carga piezométrica, el posicionamiento actual no permitiría hacer un uso adecuado.

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 Teixeira, Aníbal Tissoni y David Geinsensblen por los enriquecedores intercambios en innumerables reuniones.

Disclosure statement

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

References

- [1] UNE-EN 60041. *Ensayos de recepción en central de las turbinas hidráulicas, bombas de acumulación y turbinas-bomba, para determinar sus prestaciones hidráulicas*. 1994. [1994](#)
- [2] Fritz J. Small and mini hydropower systems. McGraw-Hill; [1984](#).
- [3] IEC 60193. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – model acceptance tests. Second ed. CEI/IEC 60193; [1999](#).
- [4] ASME PTC 18. Hydraulic Turbines and pump-turbines – performance Test Codes. American Society of Mechanical Engineers; [2011](#).
- [5] Blevins RD. Applied fluid dynamics handbook. Florida: Krieger Publishing Co., Malabar; [1984](#).
- [6] ASHRAE. ASHRAE handbook series, chapter 35, duct design. [2005](#).
- [7] Idelchik IE. Handbook of hydraulic resistance. In: William Begell. 4TH Revised and augmented edition, English ed. New York; [2007](#).
- [8] Alvaine A, Golitsinsky B, Y Mischenko B. Informe. Sobre los ensayos (Index-tests) de la turbina Nro. 5 de la Central Argentino-Uruguay Salto Grande. Argentina; [1982](#).
- [9] Lakshmanan K, Ortner R, Ryabko D, Improved regret bounds for undiscounted continuous reinforcement learning, in: Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning, Lille, [2015](#), pp. 524e532.
- [10] Liu Z, Shi R, Shen L, et al. Unsupervised salient object segmentation based on kernel density estimation and two-phase graph cut, Multimed. IEEE Trans. [2012](#);14(4):1275e1289.
- [11] Bessa RJ, Miranda V, Botterud A, et al. Time adaptive conditional kernel density estimation for wind power forecasting, Sustain. Energy IEEE Trans. [2012](#);3(4):660e669.
- [12] ASHRAE. ASHRAE handbook series, chapter A44, building air intake. [2005](#);(1).