

Modelación numérica del ingreso de flotantes superficiales en la toma de centrales hidroeléctricas

Mauricio Angulo, Mariano de Dios y Sergio O. Liscia¹

UIDET Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

RESUMEN

El salto energético disponible por las turbinas en las centrales hidroeléctricas es afectado por obstrucciones que pueden darse en las rejillas de toma debido a la presencia de basura o elementos flotantes en el embalse que fueron conducidos hasta allí. En la etapa de diseño de la central, conocer anticipadamente cómo será el desplazamiento de los flotantes, ayudará a elegir un método y sistema de limpieza de rejillas adecuado para que esta pérdida de energía se mínima, ya que ello se traduce en una disminución de los ingresos por generación.

En el presente trabajo se evalúa mediante modelación numérica el ingreso de flotantes en superficie a la toma de las turbinas de la ampliación de una central hidroeléctrica. En la primera fase se valida la modelación numérica del funcionamiento de la central actual y luego se evalúa el funcionamiento de dos alternativas de diseño de obra de toma. Los resultados obtenidos indican cual es la zona preferencial de acumulación de flotantes y predicen que el cambio del patrón de escurrimiento actual resultará en una reducción de flotantes en la central existente.

ABSTRACT

The head available by hydraulic turbines at hydroelectric power stations is affected by blockage at the trash racks due to the presence of debris floating on the reservoir that has been drift there. At the power station design stage, to know in advance how the floating elements are going to move will contribute to select the most adequate method and system of trash racks cleaning in order to minimize the energy loss, taking into account that this fact means a decrease of generation incomes.

In the present work is evaluated the entrance to the turbine intake of floating debris near the free surface by means of numerical model simulations. The intake belongs to an expansion project of a power station. As a first step, it was modeled the current state of the power station in order to validate the numerical simulations, next it has been modeled two design alternatives of the power intake. The obtained results indicated the preferential deposition zones of floating debris and also indicated that the current flow

pattern will reduce debris presence at the existing power station.

PALABRAS CLAVES: Modelación numérica; Toma; Flotantes

I. INTRODUCCIÓN

Es usual y absolutamente criterioso que en las centrales hidroeléctricas se concentre el mayor esfuerzo en aumentar la eficiencia de la transformación potencia hidráulica – mecánica – eléctrica, consumiendo gran parte del esfuerzo de diseño en el proyecto de la máquina hidráulica y en el generador eléctrico. No obstante ello, no debe perderse de vista que el diseño parte de una hipótesis de salto útil disponible por la turbina, es decir una potencia hidráulica aprovechable. Por ende deberán tenerse en cuenta acciones tendientes a disponer de la totalidad del salto útil asumido en el diseño.

Por ello es importante el estudio del material flotante en los embalses de acumulación de centrales hidroeléctricas ya que su presencia es habitual, especialmente días posteriores a crecidas del río. El conocimiento de la trayectoria y sitios preferenciales de acumulación de los mismos es relevante ya que generan una pérdida de carga en rejillas, consumiendo parte del salto útil aprovechable, por lo tanto anticiparse a ello ayuda a prever tareas de mantenimiento y limpieza de rejillas con la finalidad de minimizar dichas pérdidas energéticas.

Cabe destacar, que el consumo energético en rejillas puede ser significativo en aquellas centrales con bajo salto y alto número de unidades generadoras, dado que la pérdida de carga en rejillas disminuye el salto útil disponible afectando directamente a la potencia hidráulica y a la energía generada, traduciéndose finalmente en una afectación de los ingresos monetarios como energía no generada.

El presente trabajo introduce los resultados de la modelación numérica del flujo de aproximación del embalse a las tomas de una central hidroeléctrica con un cierto volumen de material flotante en superficie. La central hidroeléctrica tiene un salto útil nominal de 22 m, una potencia instalada de 3200 MW repartida en 20 unidades.

II Latin American “Hydro Power and Systems Meeting” – 2015

La pérdida de carga en rejas puede alcanzar valores extremos del orden del metro de pérdida de carga, representado una caída del 4.5 % del salto nominal, es decir, una reducción de la energía generada durante el período que se sostenga dicha obstrucción al flujo.

La central estudiada pretende ser ampliada en 3 unidades de generación adicionales y es necesario conocer en qué zonas se acumularán preferencialmente los flotantes y si la ampliación afectará el patrón de flujo actual de la central, mejorando o empeorando la situación de la central existente.

Es objeto de este trabajo contribuir al estudio mediante modelación numérica del ingreso de flotantes a la toma de centrales hidroeléctricas. El fin último es poder anticipar y prevenir la obstrucción de las rejas, tanto en la etapa de diseño como en la de operación de las centrales, reduciendo así el nivel de energía no generada.

El estudio que dio lugar a este trabajo se ha realizado en el marco del asesoramiento que las Universidades Nacionales de La Plata (UNLP) y Misiones (UNAM) llevan a cabo para la Entidad Binacional Yacretá, de las Repúblicas Argentina y Paraguay. La UIDET Hidromecánica de la Facultad de Ingeniería (UNLP) y el Centro de Estudio para la Energía y el Desarrollo (UNAM), son las unidades ejecutoras de un proyecto que tiene como objetivo la ampliación del parque de generación de la Central Hidroeléctrica existente y contempla otros aspectos referidos al equipamiento hidromecánico existente.

II. MATERIALES Y METODOS

Fundamentos teóricos

El código numérico implementado para las simulaciones es el FLOW-3D®, desarrollado por Flow Science Inc. El software resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y continuidad en tres dimensiones. Estas son ecuaciones diferenciales de segundo orden, no lineales y dependientes del tiempo, donde la solución numérica de las mismas implica aproximar los términos que la componen con expresiones algebraicas. Este código trabaja con volúmenes finitos. Para la representación de la turbulencia hay cinco modelos disponibles: el modelo de longitud de mezcla de Prandtl, los modelos k- ϵ de una y dos ecuaciones, un modelo basado en los métodos RNG (Renormalization-Group) y un modelo de simulación de grandes vórtices (large eddy simulation, LES). En el caso de este trabajo, el modelo de turbulencia implementado fue el RNG. El espacio modelado es discretizado mediante una malla

estructurada de celdas prismáticas donde se aplican las ecuaciones mencionadas y se las resuelve numéricamente mediante dos métodos posibles: la sobre-relajación sucesiva y la alternación de la dirección especial.

Modelo hidrodinámico

El dominio de simulación abarca el sector localizado de emplazamiento de la central y vertedero. La central tiene una extensión de 720 m de obra de toma + 108 m de ampliación. Se consideró un ancho de dominio de 2760 m por 1420 m. Se utilizó un bloque de mallado por unidad de generación (20+3 unidades) con un tamaño de celda cúbica de 4 m de lado y un bloque de mallado de celdas de 4 m de lado para el embalse, presa y vertedero. La batimetría del embalse fue considerada en la modelación. El dominio modelado tiene un total de 3.2 millones de celdas y las corridas se extienden 2000 segundos aproximadamente de forma tal que los flotantes logren aproximarse a la toma de las turbinas.

Se consideró un único escenario de operación de la central correspondiente con la operación de la misma con nivel máximo normal de embalse, caudal turbinado correspondiente al salto nominal de las turbinas y vertedero cerrado. El modelo hidrodinámico no considera influencia del viento que incide sobre el embalse, ni se consideró oleaje como producto del mismo.

Las condiciones de borde impuestas a las mallas son: para el bloque 1 (abarca el embalse, las presas de cierre lateral, de margen izquierda y de margen derecha) en los límites abiertos al embalse se impuso la condición de nivel de embalse máximo normal mediante la opción altura de fluido y presión de estancamiento que considera la energía total que depende de la velocidad del flujo entrante a la malla. Para 22 bloques (que representan las secciones de ingreso a las turbinas) se impuso en cada uno de ellos la condición de caudal saliente correspondiente al caudal nominal turbinado por una unidad, esto se realizó imponiendo una velocidad uniforme de salida en la cara de la malla de aguas abajo dado que se conoce el área de salida de la misma. Solo un único bloque en la central actual se deja con velocidad de salida nula representando una situación más realista de la central en donde al menos una unidad siempre está fuera de servicio por razones de mantenimiento, en este caso se eligió la turbina N° 5, más cercana a la margen izquierda.

En la Figura 1 se muestra el dominio mallado, los bloques utilizados y dimensiones principales. En la Tabla 1 se resumen las características principales de los bloques de mallado y la extensión en el tiempo de las simulaciones.

II Latin American "Hydro Power and Systems Meeting" – 2015

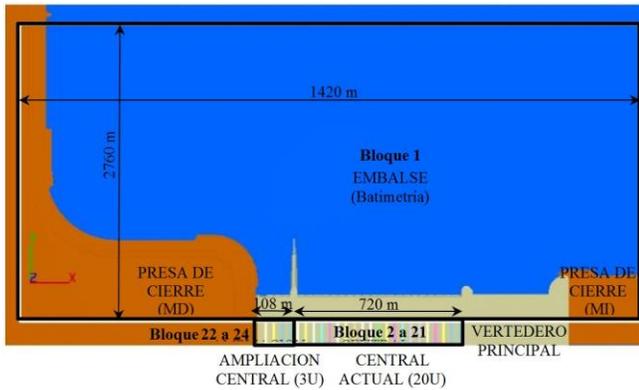

Figura 1: Mallado

Tabla 1.- Características del mallado y la simulación

| Bloque [N°] | Tamaño [m] | Celdas [#] |
|----------------------|---------------|------------------|
| 1 (embalse y presa) | 4 | 3.187.300 |
| 2-24 (turbinas) | 4 | 642.543 |
| Celdas (#) | Total | 3.829.843 |
| | Activas | 1.781.399 |
| Tiempo de simulación | 2000 seg | |

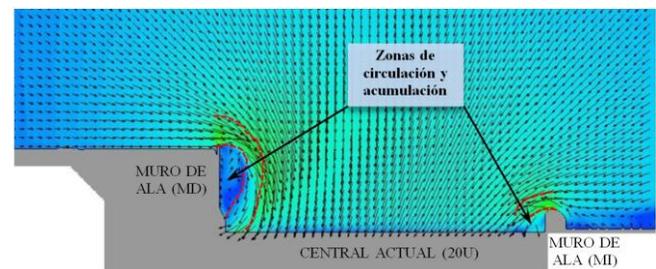
Los flotantes superficiales se representaron mediante partículas idénticas de 1 m de diámetro y densidad relativa 0.99, el resto de las propiedades de las partículas como: el coeficiente de arrastre, difusión, restitución y número de Schmidt fueron conservados los valores que el modelo de partículas fija por defecto. Las partículas fueron sembradas al azar en una franja del embalse paralela a la toma hasta una profundidad máxima de 1 m. La cantidad de partículas no supera las 10.000 y las mismas no interfieren en el escurrimiento sino que son arrastradas por la misma. Se registraron los movimientos de las partículas cada 10 segundos para detectar su avance con detalle suficiente.

Validación del modelo

La modelación de la condición actual de la central tiene como objetivo, validar los parámetros y criterios adoptados en el modelo hidrodinámico. No es simple ni económico validar una experiencia en prototipo de esta escala, ni tampoco se contó con modelos físicos a escala de la obra. Para ello en una primera etapa se modeló numéricamente la central en las condiciones actuales. En la Figura 2 puede observarse como el flujo se aproxima a la central desde el embalse y se detecta la formación de gran zona de recirculación detrás del muro de ala de margen derecha. Es evidente que existe una importante asimetría en la aducción

ya que los muros de ala están desfasados. Esto no es en sí mismo un diseño inadecuado sino que dicho desfase en el eje fue introducido intencionalmente previendo la ampliación de la central hidroeléctrica hacia la margen derecha, tal como se prevé ampliarla actualmente. Sobre la margen izquierda también existe una zona de recirculación aunque menor. En ambos casos estas zonas de recirculación también serán zonas de acumulación de flotantes según es predicho por la modelación numérica con la adición de partículas flotantes. En la Figura 3 puede observarse la evolución temporal del transporte de flotantes en superficies y las zonas de deposición final sobre las rejas de ingreso a las turbinas de margen derecha (U20 y U21). No es evidente la acumulación sobre la margen izquierda (U1).

Según la experiencia de los operadores de la central y registros fotográficos de la zona de aguas arriba de la toma, ver Figura 4, las zonas de recirculación y deposición de flotantes superficiales, en su mayoría restos de árboles y basura, coinciden con las zonas predichas por el modelo hidrodinámico. En la actualidad las zonas indicadas constituyen los sectores que requieren un mayor esfuerzo de mantenimiento para lograr un adecuado nivel de pérdidas energéticas en las rejas de las unidades de margen derecha. En la etapa de diseño de la central se trazó una vía de comunicación que une los países vecinos de Argentina y Paraguay, quienes comparten la propiedad y operación de la central. Este camino internacional está apoyado sobre ménsulas hacia aguas arriba de la obra de toma, dificultando la instalación de un sistema limpiarejas eficiente. Por esta razón la ampliación de la central prevé instalar un sistema limpiarejas más eficiente que permita un mantenimiento periódico de las mismas.


Figura 2: Resultado de la modelación numérica de la situación de la central actual.

II Latin American “Hydro Power and Systems Meeting” – 2015

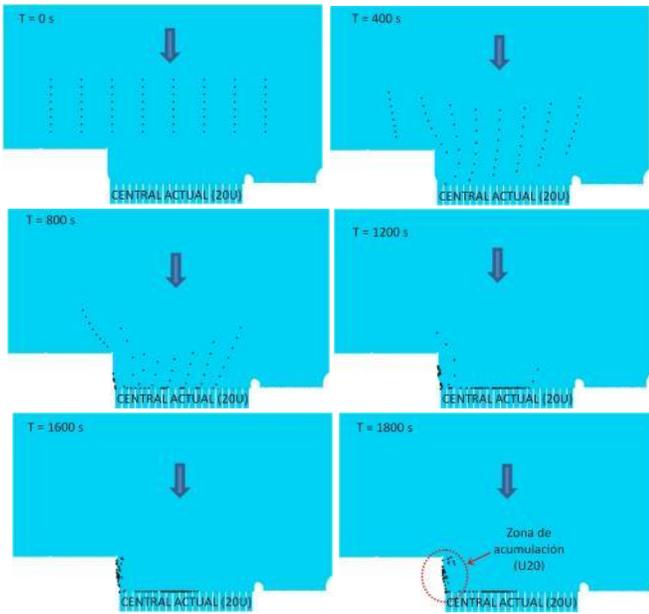


Figura 3: Evolución temporal del avance de los flotantes en superficie para la situación actual.



Figura 4: Fotografías de la zona de recirculación y de acumulación de flotantes en la central actual.

Geometrías modeladas

Se modelaron tres geometrías de obra diferentes, una correspondiente a la obra actual existente y otras 2 correspondientes con alternativas de diseño de la ampliación de la central sobre margen derecha.

La modelación de la central actual se describió en el anterior apartado. Las alternativas de ampliación son dos, y el criterio de diseño de las mismas está basado en obtener una mejor aducción del flujo a la central y no en cuestiones relacionadas con la entrada de flotantes. La nueva central tendrá 3 unidades generadoras adicionales. Por lo tanto el objetivo del estudio es conocer cuáles serán las zonas de circulación y deposición de flotantes superficiales, si es que las hubiera, para cada una de las alternativas propuestas. Adicionalmente interesa conocer si la presencia de esta ampliación modificará el patrón de flujo de la central actual y si ese cambio tendrá efectos en la deposición de flotantes en las unidades de margen derecha, principalmente.

La alternativa 1, constituye una alternativa sin muro de ala derecho en la aducción a la central. Por otra parte la alternativa 2 prevé la construcción de un muro de ala corto sobre la margen derecha para mejorar la aducción del flujo a la central. Estas alternativas se muestran en la Figura 5, donde se observan las diferencias geométricas y se visualiza el campo de velocidades en una capa superficial de la toma. En ambas alternativas existe una zona de velocidades muy bajas (color azul), que forma parte del talud sumergido de la presa de materiales sueltos que llega al pie de la nueva central sin apoyarse en esta. Esta zona “muerta” solo puede evitarse construyendo un nuevo muro de ala similar al existente de forma tal que permita apoyar la presa sobre el mismo pero con un costo de construcción tan elevado que haría inviable la ampliación de la central.

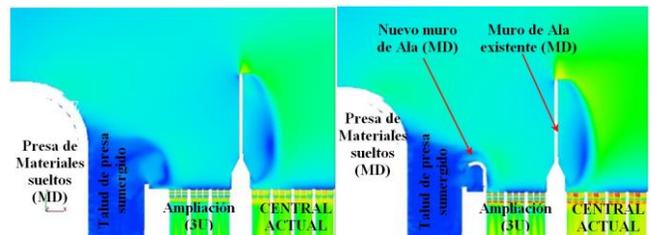


Figura 5: Campo de velocidades en la superficie para las 2 alternativas de ampliación.

Alternativa 1 (izquierda) Alternativa 2 (derecha).

III. RESULTADOS

Se modelaron las 3 geometrías de obras indicadas con el dominio y condiciones de borde mencionadas. Los resultados de la modelación de la central actual se adelantaron en la etapa de validación de la metodología. Los resultados para cada una de las alternativas se muestran en las Figuras 6 y 7. El resultado está constituido por una secuencia de la evolución temporal de la posición de las

II Latin American "Hydro Power and Systems Meeting" – 2015

partículas flotantes en el embalse, partiendo de una distribución aleatoria aguas arriba de la toma en una franja del embalse.

En ambas alternativas se observa como una parte del flotante será captado por la central ampliada, reduciendo así el volumen de partículas ingresantes la central existente.

Para la alternativa 1, se observa que el sector preferencial de deposición de flotantes es en la zona del talud sumergido de la presa y otra parte se deposita sobre la unidad N° 21 cercano al muro de ala existente. Ver Figura 6, zoom de detalle del último cuadro correspondiente a 2000 segundos. Para esta alternativa se observa una zona de recirculación que atrapa parte de los flotantes y no permite el avance hacia las rejillas.

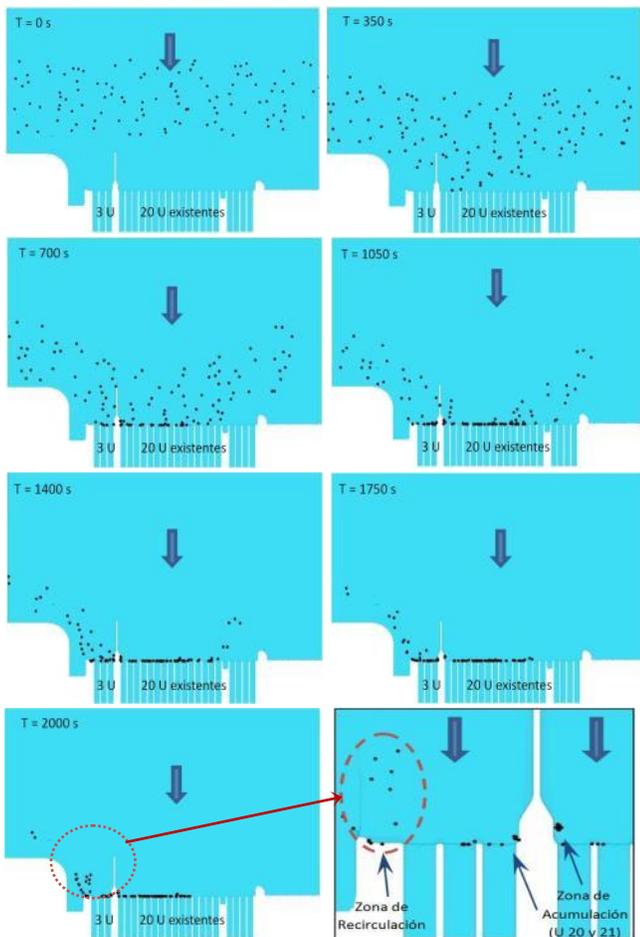


Figura 6: Evolución temporal del avance de los flotantes en superficie para la Alternativa 1.

Para la alternativa 2, se observa que el sector preferencial de deposición de flotantes es la unidad N° 23, seguido por la

unidad 21 y finalmente la unidad N° 22. En este caso la aducción es más eficiente en conducir el flujo hacia la central eliminando zonas de recirculación y esto se ve reflejado en una distribución más uniforme de los sólidos flotantes. Ver Figura 7, zoom de detalle del último instante de simulación correspondiente con el tiempo 1420 segundos en donde se observan las zonas de acumulación en la zona de entrada a las rejillas.

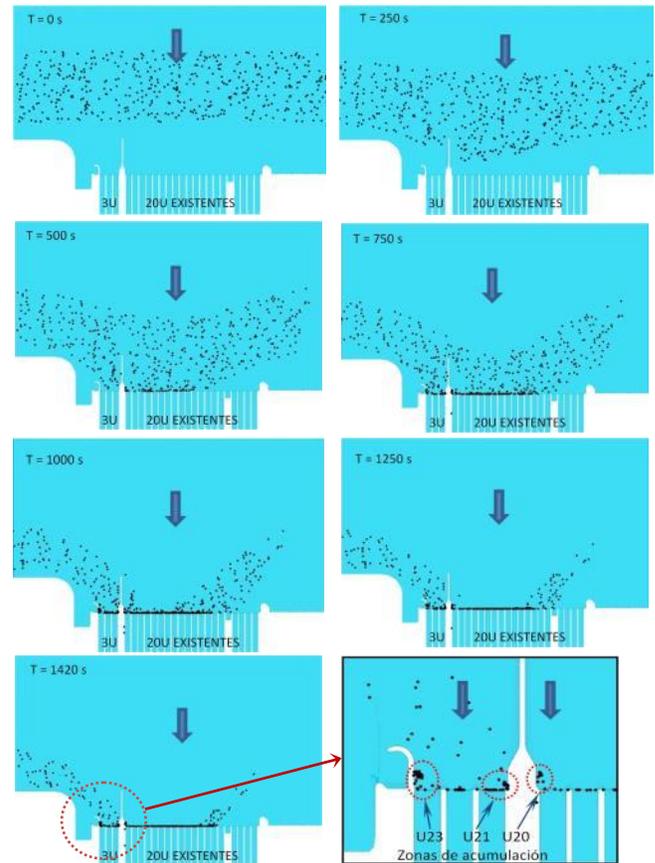


Figura 7: Evolución temporal del avance de los flotantes en superficie para la Alternativa 2.

IV. CONCLUSIONES

La modelación de la situación actual indica que los flotantes superficiales se acumulan en la zona de la unidad 20 principalmente representando satisfactoriamente las condiciones observadas en la central. De igual forma mediante el campo de velocidades y vectores (Figura 2) se

II Latin American “Hydro Power and Systems Meeting” – 2015

detectaron claramente las zonas de recirculación en una condición de funcionamiento normal de la central.

En las alternativas de ampliación, se sigue observando el mismo fenómeno de acumulación en la unidad 20, aunque parte de los sólidos ahora son captados por la zona de la central ampliada provocando así una disminución en la captación de flotantes de esta unidad, mejorando así la condición de funcionamiento actual para cualquiera de las alternativas propuestas.

En la alternativa 1, sin muro de ala, los flotantes que provienen de margen derecha del muro de ala existente, en parte se acumulan sobre la unidad 21 y otra parte queda recirculando sobre el sector de aguas quietas cercano a la presa de materiales sueltos. Desde el punto de vista del funcionamiento de la aducción el flujo es más desordenado y no propicia una distribución uniforme a las turbinas. Desde el punto de vista de los flotantes puede resultar beneficioso ya que una parte importante de los mismos queda atrapado en esta zona de aguas quietas y no ingresa a las rejillas. De esta forma el mantenimiento requerido será menor y solo bastará realizar una limpieza en la zona de aguas muertas mediante algún sistema adecuado.

Para la alternativa 2 una parte de los flotantes se acumula entre la unidad 23 y el nuevo muro de margen derecha, otra parte se acumula sobre la unidad 21. Contrariamente a lo que sucede en la alternativa 1 desde el punto de vista de la aducción a las turbinas, la introducción de un nuevo muro de ala corto, mejora sustancialmente la distribución del flujo al ingreso de las máquinas. Desde el punto de vista de la acumulación de flotante esta mejora en la distribución del flujo en las máquinas también hace más equitativa la distribución de flotantes respecto de la primera alternativa. También puede agregarse que si bien en las simulaciones no se observa, es posible que algunos flotantes se acumulen en la zona de recirculación que se encuentra entre el muro de ala nuevo y la presa de materiales sueltos. Esta situación sería beneficiosa en principio ya que evitaría que parte de los flotantes fueran a las unidades nuevas y podrían retirarse con un sistema apropiado ubicado en esa zona. Por otra parte la segunda alternativa requerirá de un sistema limpia rejillas con mayor capacidad que la alternativa 1, y desde el punto de vista del mantenimiento deberá realizarse con una mayor periodicidad y de forma equitativa entre las 3 unidades.

Finalmente puede decirse que la predicción del movimiento y acumulación de flotantes en las tomas de centrales hidroeléctricas puede ser anticipado mediante la modelación numérica. De esta forma se contribuye a un mejor mantenimiento de las rejillas y a una selección del equipo de limpieza adecuado, con el fin último de evitar el

consumo energético innecesario maximizando así la generación eléctrica.

V. REFERENCIAS

- [1] Pfister, M.; Capobianco, D.; Tullis, B. and Schleiss A. J. (2013). “Debris-Blocking Sensitivity of Piano Key Weirs under Reservoir-Type Approach Flow”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 139, No. 11, November 2013, pp. 1134-1141.
- [2] Pfister, M.; Schleiss A. J. and Tullis, B. (2013). “Effect of driftwood on hydraulic head of Piano Key weirs”. 2nd international workshop on Labyrinth and piano keys weirs, PKW 2013, Paris, Francia. pp. 255-265.
- [3] Xiang, F.; Kavvas, L.M.; Chen, Z., Bandeh, H.; Ohara, N.; Kim, S.; Jang, S.; Churchwell, R. (2009). “Experimental study of debris capture efficiency of trash racks”. *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 3, No. 3, November 2009, pp. 138-147.