



REGULACIÓN DE CAUDAL MEDIANTE VÁLVULA MARIPOSA EN UNA TURBINA HIDRÁULICA DE FLUJO TRANSVERSAL

ARIEL R. MARCHEGIANI, ORLANDO A. AUDISIO, MAXIMILIANO E. VARELA

Universidad Nacional del Comahue
Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (La.M.Hi.)
Depto. de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería
Buenos Aires 1400 - (8300) Neuquén - Argentina

(Recibido 4 de julio de 2011, para publicación 24 de agosto de 2011)

Resumen – En este trabajo se exponen los resultados de investigación sobre la regulación de caudal en una turbina de flujo transversal. A partir del desarrollo llevado adelante en este Laboratorio, de un pequeño grupo generador hidráulico, se trabajó sobre unos de los aspectos más importantes de esta turbina: la regulación de su caudal. El programa de trabajo fue elaborado a fin de poder cuantificar de manera experimental y numérica la influencia sobre la eficiencia de la turbina, de la utilización de una Válvula Tipo Mariposa en la regulación primaria del caudal de entrada. La máquina utilizada es una turbina de flujo transversal de un diámetro de 200 mm a la cual se le acopló aguas arriba de la misma una Válvula tipo Mariposa con acople tipo Waffer para cañería de 6 pulgadas de diámetro. Otro objetivo fue estudiar cómo se pueden utilizar estos resultados en el diseño de los equipos de regulación electrónicos que trabajan bajo el sistema de derivación de cargas. La rutina de trabajo consistió en hacer la regulación del caudal que ingresa a la turbina mediante el accionamiento de la válvula. A partir de ello se fueron relevando los distintos parámetros resultantes; y procesados los mismos se contrastaron con los resultados que arrojó la turbina sin regulación y con un regulador convencional. Como resultado del mismo podemos mencionar un comportamiento de esta válvula como reguladora primaria, aceptable y que, dada la gama de potencias en que estamos trabajando, podemos inferir que la misma si es acoplada en un punto del circuito de modo que permita una buena readecuación de las líneas de corriente al ingreso del inyector, prácticamente no tiene influencia en el rendimiento global de la turbina. Por lo tanto podemos decir, que para una "regulación primaria" del caudal, es factible poder utilizar estos elementos de características standards y accesibles en el mercado.

Palabras clave – Regulación, turbina hidráulica, turbina Banki, válvula tipo mariposa.

1. INTRODUCCIÓN

La turbina de flujo transversal es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Esta turbina consiste fundamentalmente en un rotor de forma cilíndrica que descansa sobre un eje horizontal. Los álabes del rodete están sobre la periferia de este; una tobera de sección rectangular guía el agua hacia el rodete, ya sea vertical u horizontalmente.

Existen varias geometrías de inyectores y sistemas de regulación como el que se aprecia en la Fig. 1. En este diseño, el álabe regulador divide el flujo en dos partes, una superior y otra inferior, que se van reduciendo a medida que se cierra el álabe. En definitiva, este álabe regulador actúa como una válvula que regula el caudal, pero este diseño encarece la construcción de la turbina ya que la geometría del álabe es complicada y laboriosa de fabricar.

Generalmente la regulación de la apertura de este álabe se realiza en forma manual mediante un mecanismo de tornillo sin fin y manivela, y por lo tanto la regulación del caudal será discreta y no responderá a una variación instantánea de la potencia, sobre todo si se trata de una turbina de muy baja potencia donde no existe mecanismo de regulación automática. Una alternativa a este álabe regulador podría ser plantear una turbina sin este dispositivo y regular el caudal con una válvula mariposa a la entrada de la turbina, de la misma manera que se hace con el álabe regulador mencionado.

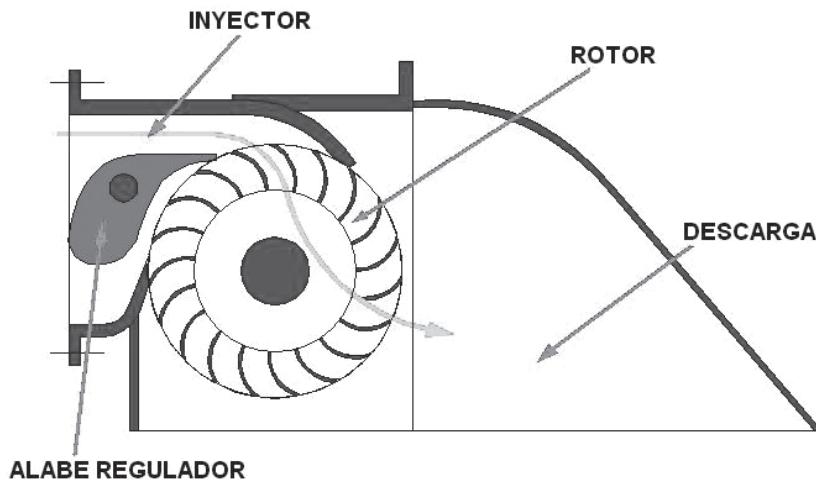


Fig. 1. Turbina de Flujo Transversal.

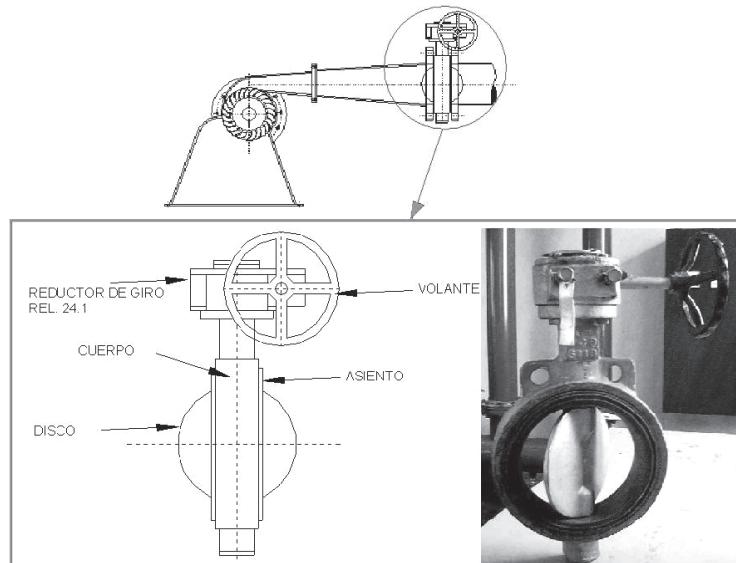


Fig. 2. Esquema y vista de la válvula mariposa acoplada a la turbina.

En el presente trabajo se exponen los resultados de una investigación experimental respecto a la regulación primaria que se hace sobre el caudal en una turbina de flujo transversal o Tipo Michell-Banki.

El programa de trabajo fue elaborado a fin de poder cuantificar de manera experimental la influencia que tiene, en cuanto a la eficiencia de la turbina, la utilización de una Válvula Tipo Mariposa en la regulación primaria o "Regulación Gruesa" del caudal de entrada.

La turbina utilizada es del tipo de flujo transversal o Michell-Banki, de un diámetro de 200 mm (Marchegiani *et al.*, 2003) a la cual se le acopló aguas arriba de la misma una Válvula tipo Mariposa con acople tipo Waffer para cañería de 6 pulgadas de diámetro (Fig. 2).

Como objetivo de la investigación se buscó, no solo poder hacer la ponderación mencionada, sino ver cómo se pueden utilizar estos resultados en el diseño de los equipos de regulación electrónicos que trabajan bajo el sistema de derivación de cargas.

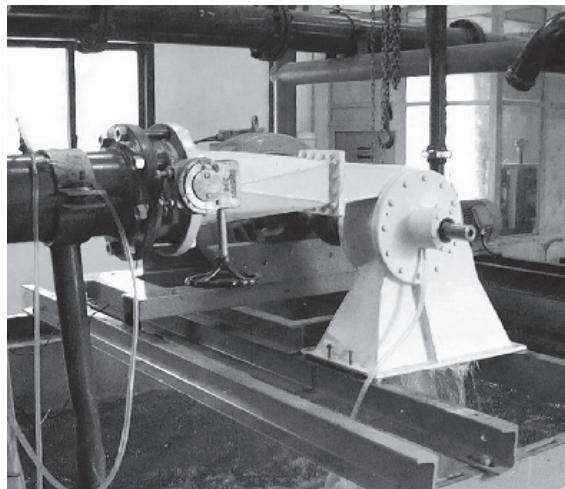


Fig. 3. Ensayo de la turbina.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La rutina de trabajo consistió en hacer la regulación del caudal que ingresa a la turbina mediante el movimiento de la válvula. A partir de ello se fueron relevando los distintos parámetros resultantes. Una vez procesados los mismos se contrastaron con los resultados que arrojó la turbina para el caso sin regulación aguas arriba.

Los ensayos de la turbina fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. En la Fig. 3 puede observarse la turbina durante el ensayo.

El ensayo se realizó para una altura neta de 13,5 m y un rango de caudales a fin de determinar la influencia de la regulación mediante la válvula mariposa. Los métodos de medición fueron aplicados conforme a las reglas de la IEC, la BSI, y la DIN.

Se utilizó una válvula mariposa marca UNICOM con reductor de giro de relación 24 a 1, de 6 pulgadas de diámetro, a la que se dotó de una escala para la medición del ángulo de apertura, como se aprecia en las Figuras 2 y 4.

Se realizaron ensayos para aperturas de la válvula del 20% al 100% con variación del 10%, y se determinaron el rendimiento óptimo y la potencia en el eje de la turbina con su correspondiente punto de operación para cada apertura de la válvula.

2.1. Análisis de los resultados experimentales

Los resultados fueron analizados y combinados en distintos diagramas que dan un conocimiento acabado del funcionamiento de la turbina para cada apertura de la válvula.

El resultado conseguido por una turbina hidráulica es medida por su rendimiento. En general el rendimiento es una indicación de que porcentaje de la potencia entregada por el agua a la turbina es transformada en potencia mecánica en el eje.

La potencia entregada por el agua fue medida a través de la presión a la entrada de la turbina y el caudal turbinado.

En primer lugar se relevaron los distintos parámetros y se analizaron mediante regresión estadística a fin de obtener las curvas de potencia en el eje y rendimiento versus el caudal. En las Figuras 5 y 6 se observa lo antes dicho para una apertura del 70%.

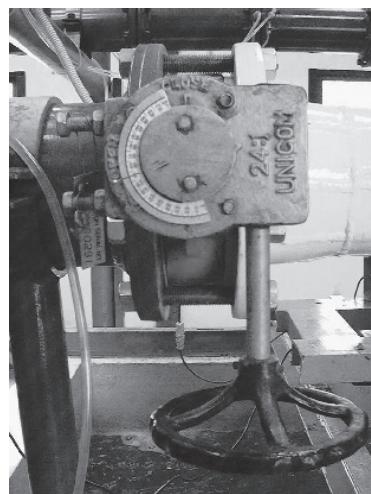


Fig. 4. Escala de regulación de la apertura.

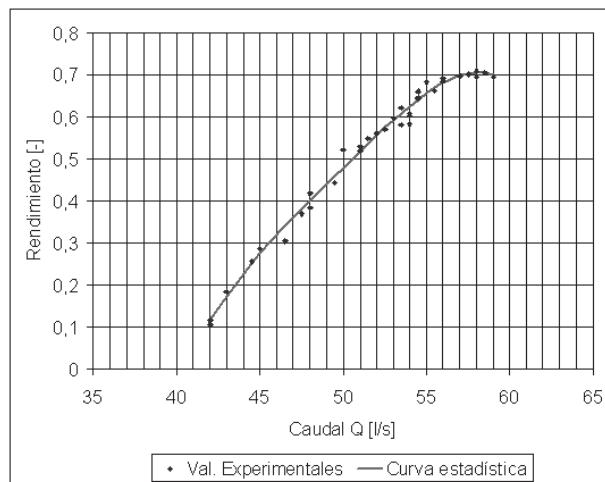


Fig. 5. Rendimiento vs. caudal para $A_0=70\%$.

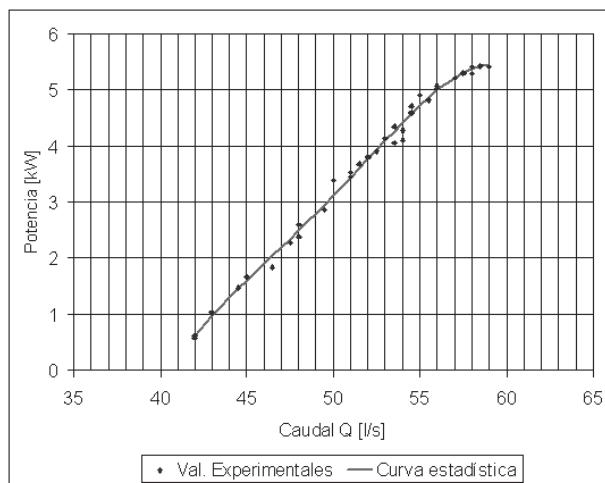


Fig. 6. Potencia vs. caudal para $A_0=70\%$.

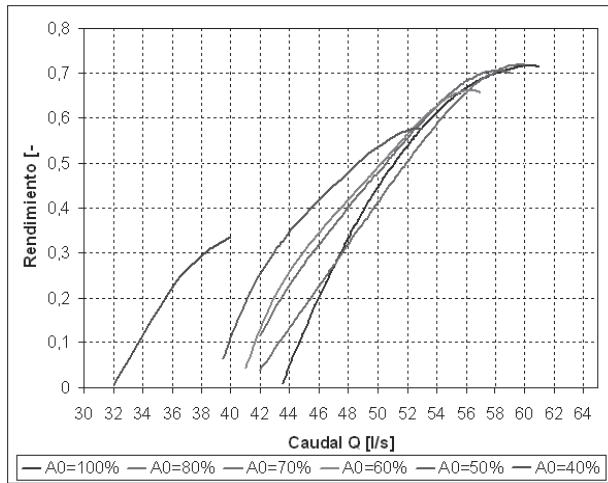


Fig. 7. Rendimiento vs. caudal para distintas aperturas.

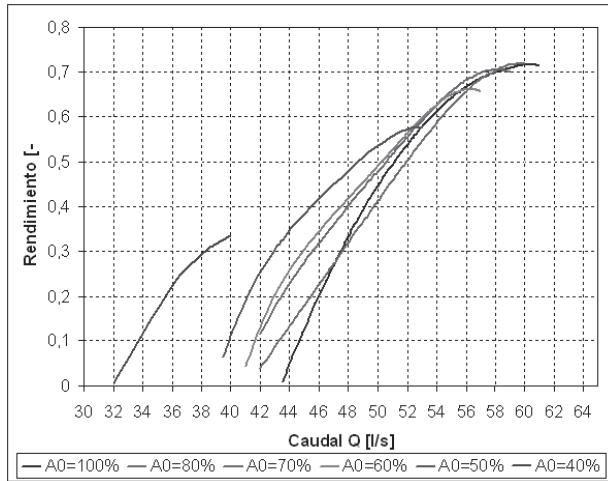


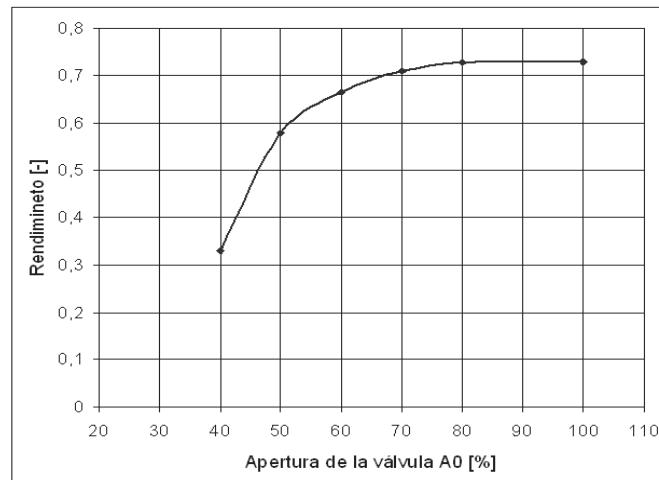
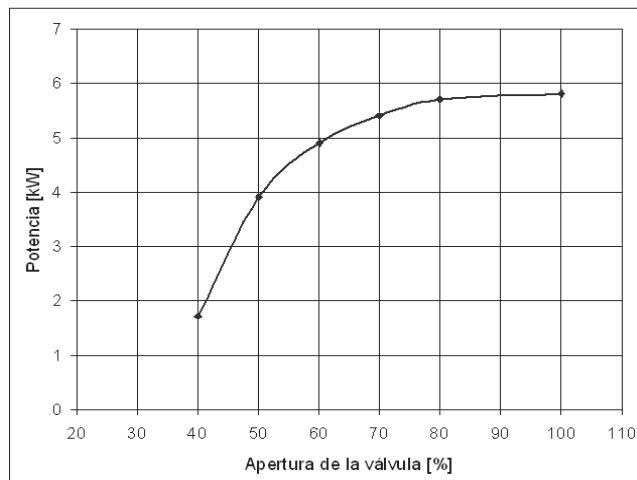
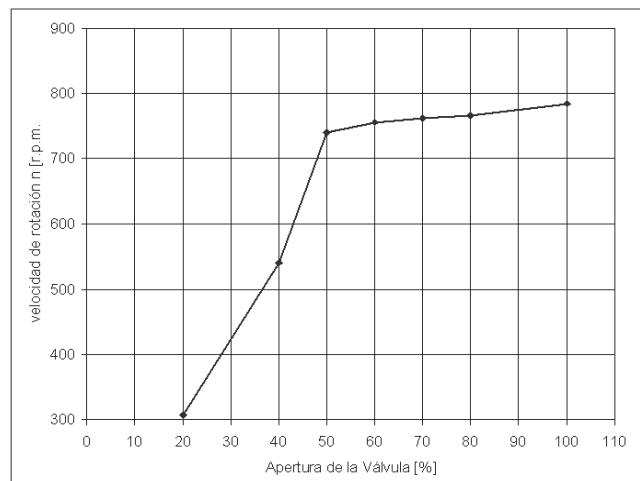
Fig. 8. Potencia vs. caudal para distintas aperturas.

Este procedimiento se repitió para todos los porcentajes de apertura, con lo que se obtuvo el comportamiento de la turbina con se aprecia en la Fig. 7. Se observa que hasta una apertura de la válvula de 50% el comportamiento es bastante parejo para luego descender bruscamente en las sucesivas aperturas. Lo mismo sucede con la potencia en el eje, como se observa en la Fig. 8.

Para las aperturas ensayadas de 20% y 40%, el rendimiento y la potencia caen significativamente. Esto es acompañado por una inestabilidad en el funcionamiento de la turbina y por una reducción en el rango de caudales utilizables.

En la Fig. 9 puede verse la variación de rendimiento en el punto de óptima eficiencia para cada apertura y en la Fig. 10 se observa el mismo comportamiento para la potencia de la turbina.

Además de este comportamiento, se analizó como influye la apertura de la válvula en la velocidad de rotación de la turbina. Aquí vuelve a evidenciarse el mismo comportamiento que en los otros parámetros, el número de revoluciones óptimo se mantiene prácticamente constante hasta un 50% de la apertura del regulador, para luego caer rápidamente, como se observa en la Fig. 11. Esto es problemático desde el punto de vista de la regulación ya que no se podrá mantener la frecuencia para aperturas menores.

Fig. 9. Rendimiento vs. apertura de la válvula A₀.Fig. 10. Potencia vs. apertura de la válvula A₀.Fig. 11. Velocidad de rotación vs. apertura de la válvula A₀.

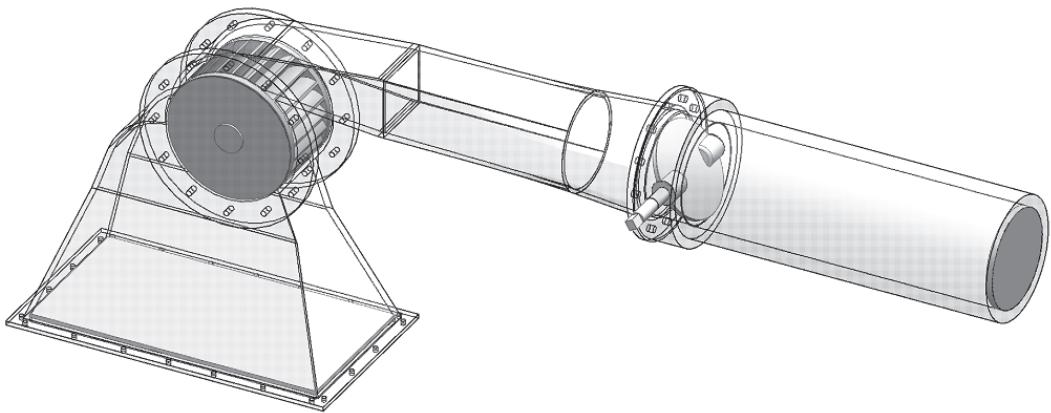


Fig. 12. Modelo utilizado en la simulación.

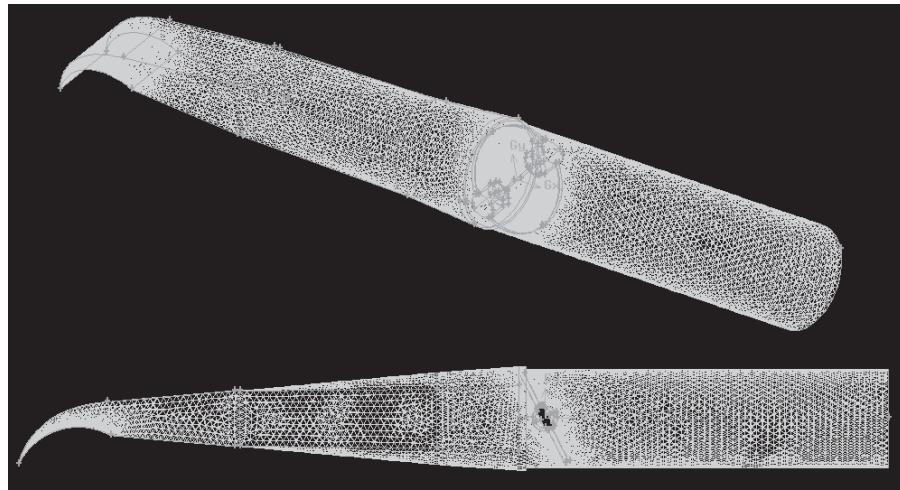


Fig. 13. Malla utilizada en la simulación numérica.

3. MODELACIÓN NUMÉRICA

A fin de observar la influencia de la válvula en la distribución de presiones y velocidades se la modeló numéricamente. En la Fig. 12 se puede observar el modelo utilizado en la presente simulación.

3.1. Metodología de resolución, condiciones de contorno y validación

A fin de realizar las simulaciones numéricas del problema planteado se utilizaron el software SolidWorks, para el planteo y generación de la geometría; GAMBIT, para el mallado y asignación de las condiciones de borde y entidades y FLUENT, para la asignación de valores numéricos a las condiciones y para la realización de los cálculos y post procesamiento de los resultados.

Las mallas fueron construidas de elementos tetraédricos. Se generó una función de crecimiento de los elementos, imponiendo los valores mínimos y máximo de lado del elemento como así también, fueron tratados de manera especial las zonas particulares de cada una de las geometrías, como por ejemplo, pequeñas secciones de paso o de un interés particular. La malla utilizada finalmente contó con 484202 Celdas y 92331 Nodos, y puede apreciarse en la Fig. 13.

El sistema de leyes de conservación para analizar el escurrimiento de un fluido permanente e incompresible en el inyector suele expresarse mediante las ecuaciones de Navier Stokes, que matemáticamente representan un sistema de ecuaciones a derivadas parciales de primer orden acoplado y no lineal, de la forma:

$$\nabla \cdot u = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \rho f + \rho g + \mu \nabla^2 u$$

Para la modelación de flujo turbulento se utilizó un modelo del tipo *eddy viscosity* (hipótesis de Boussinesq) donde la viscosidad turbulenta se obtiene a partir de dos cantidades, la energía cinética turbulenta y la disipación turbulenta resueltas mediante dos ecuaciones en derivadas parciales (κ - ϵ). Las condiciones de contorno a aplicar sobre estos campos en las inmediaciones de contornos sólidos responden a la ley de pared.

Para la imposición de las condiciones de contorno, que fijan los valores de ciertas variables en los límites del dominio se utilizó en todos los casos, presión a la entrada y a la salida. A la entrada se impuso la presión dada por el salto que aprovecha la turbina. A la salida se impuso una presión relativa igual a cero. Las velocidades sobre las paredes sólidas se asumen igual a cero (Marchegiani *et al.*, 2003).

En cuanto a condiciones iniciales se impuso una cierta velocidad a la entrada, producto de la relación entre el caudal medio de diseño y el área de la tubería de entrada.

Se especificaron las propiedades del fluido, tales como la viscosidad y la densidad. El Control de los parámetros que afectan a la resolución numérica del problema, se realizó mediante la contrastación de las simulaciones con datos experimentales.

Se simularon las distintas aperturas que se ensayaron experimentalmente desde 100% a 20% obteniéndose en cada una de ellas el desarrollo del flujo dentro del inyector y la transición.

La distribución de presión y velocidad fue calculada en cada punto de la malla computacional. El campo de presión resultante en el inyector ayuda a predecir el comportamiento del flujo frente a una maniobra de la válvula.

Una vez obtenidos los resultados, se procedió al post procesamiento; el mismo consistió en la comparación con resultados experimentales y la construcción de las curvas características de cada uno de los casos en estudio

En las Figuras 14, 15 y 16 se observan los campos de presiones, velocidades y líneas de corriente para una apertura del 60%, y en la Fig. 17 para una apertura de 20%

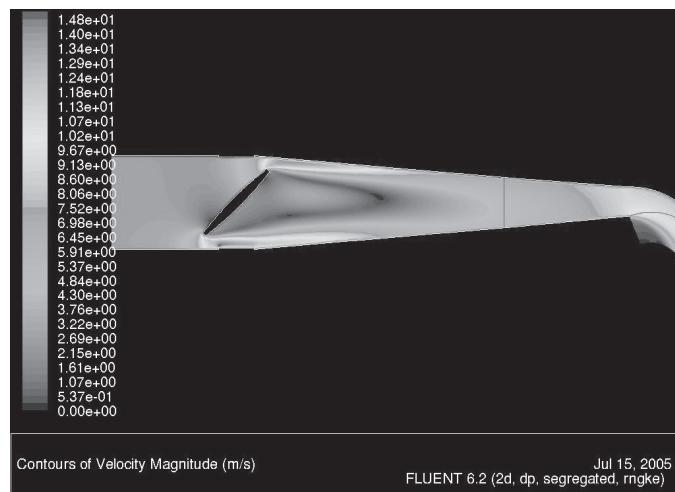
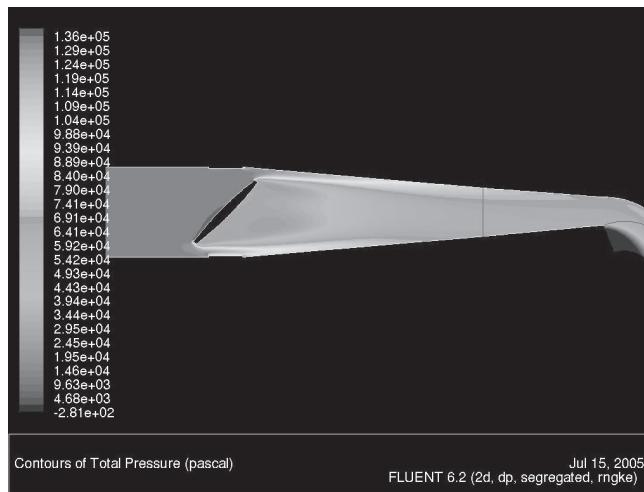
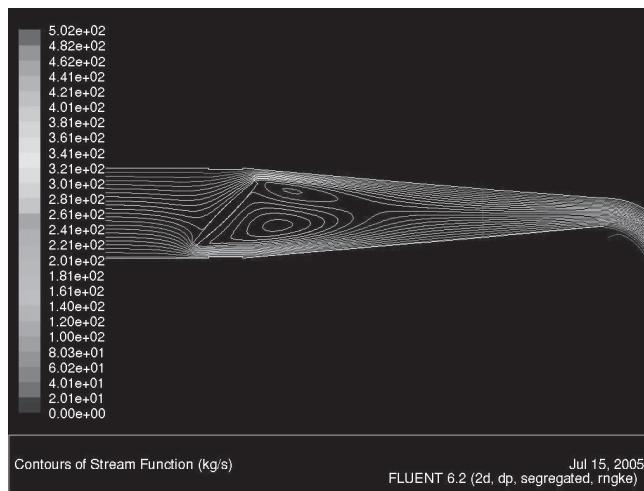
Puede observarse que el flujo se estabiliza antes de llegar a la entrada del inyector, es decir que la longitud de la transición permite que el desarrollo del flujo se estabilice, como lo demuestran las líneas de corriente.

La comparación de los valores experimentales con los resultados de la simulación arroja buenos ajustes para las aperturas hasta el 60%. Para aperturas menores el caudal medido, por ejemplo, es mayor al caudal calculado, como se aprecia en la Fig. 18. Tanto los resultados experimentales como los caudales calculados por simulación computacional dan cuenta de una brusca disminución a partir del 50 % de apertura de la válvula.

En el caso de las presiones dentro del inyector también se evidencia una marcada disminución a partir de la misma apertura. En la Fig. 19 puede verse el desarrollo de las presiones a la entrada del inyector

Este patrón de disminución vuelve a repetirse en los perfiles de velocidades a la entrada del inyector, donde, para aperturas desde el 100% hasta el 50%, los perfiles son similares, decreciendo en magnitud en forma gradual como se observa en la Fig. 20. A partir de este porcentaje la disminución de las velocidades se produce en forma rápida.

Desde el punto de vista de los esfuerzos interviniéntes en la regulación, la utilización de la válvula mariposa presenta torques elevados para pequeñas valores de apertura A_0 , disminuyendo considerablemente a medida que se acerca a la apertura total. En la Fig. 21 se han representado los valores de momento en el eje de la válvula para las diferentes aperturas de ésta.

Fig. 14. Campo de presiones – $A_0=60\%$.Fig. 15. Campo de velocidades – $A_0=60\%$.Fig. 16. Líneas de corriente – $A_0=60\%$.

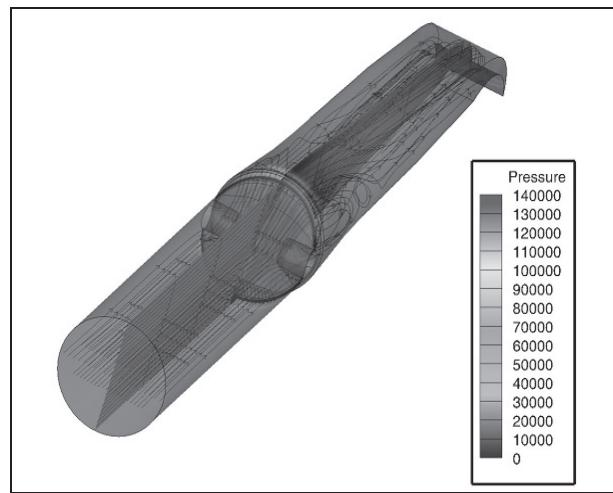
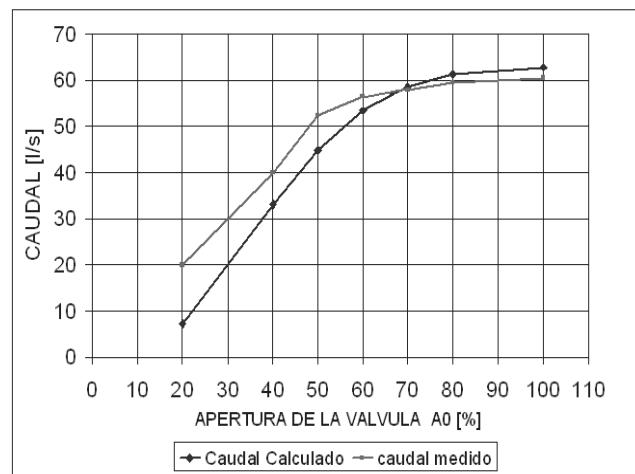
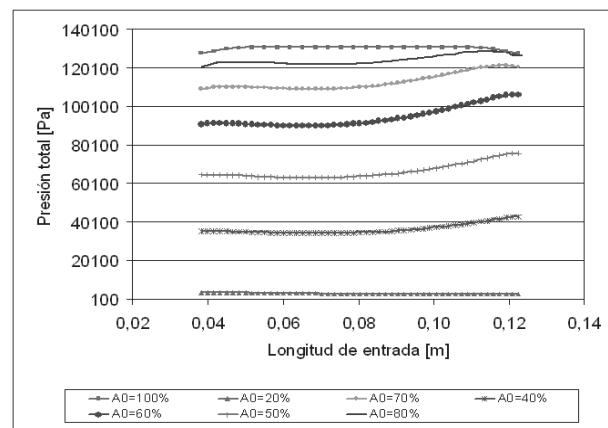
Fig. 17. Líneas de corriente 3D y presiones – $A_0=20\%$.Fig. 18. Campo de velocidades – $A_0=60\%$.

Fig. 19. Presiones a la entrada del inyector.

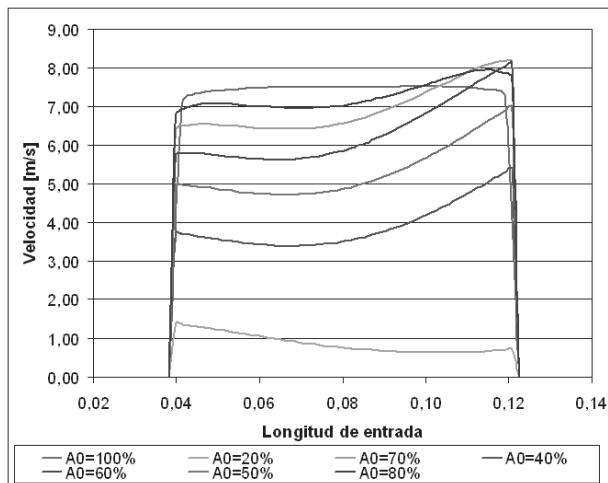


Fig. 20. Perfiles de velocidad a la entrada del inyector.

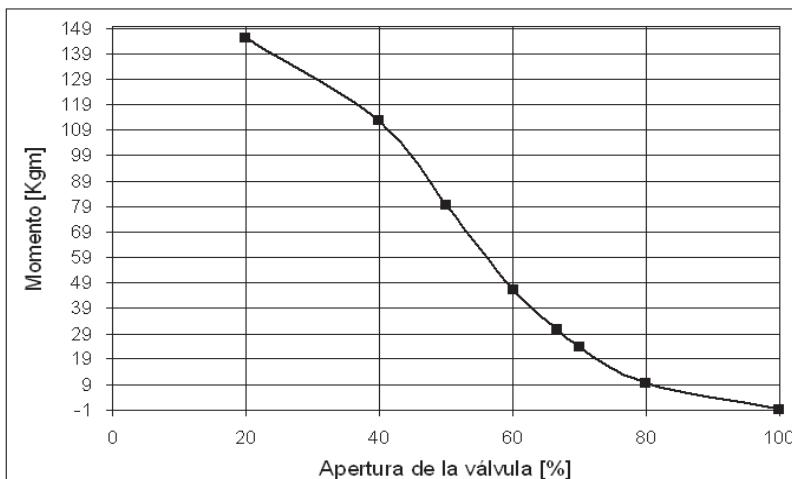


Fig. 21. Torque en eje de la válvula (distintas aperturas).

4. INFLUENCIA DE LA VÁLVULA EN APERTURA TOTAL

Otra de las comparaciones realizadas es el comportamiento de la turbina con válvula instalada y sin ella. Se pudo observar una disminución del rendimiento para una apertura del 100% del orden del 0.05%. Como consecuencia de esto también se produce una disminución de la potencia, lo que se puede observar en las Figuras 22 y 23.

5. CONCLUSIONES

A lo largo este trabajo, se ha analizado el comportamiento de una válvula mariposa como elemento regulador del caudal en una turbina de flujo transversal o Michell-Banki.

Se ha podido constatar que la regulación realizada mediante dicha válvula tiene un comportamiento aceptable para aperturas superiores al 50%. Para estas aperturas, el flujo dentro de la turbina no es perturbado en gran medida, con lo que los rendimientos y las potencias correspondientes no se ven afectados de manera significativa. De las simulaciones numéricas surge que el flujo se estabiliza después de la válvula, en la transición que une la tubería con el inyector. Los resultados numéricos arrojan, a la entrada del in-

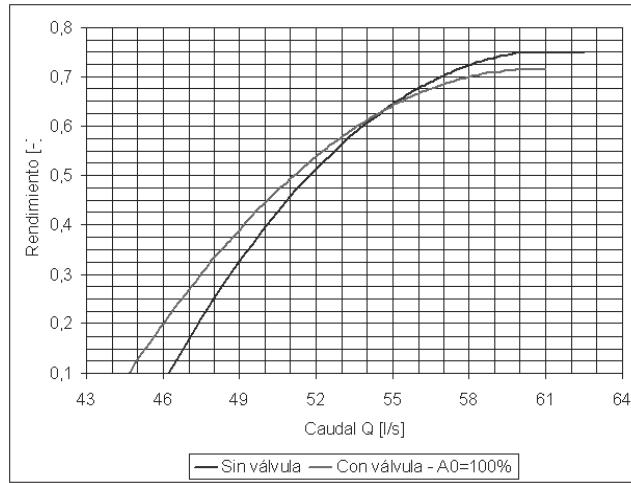
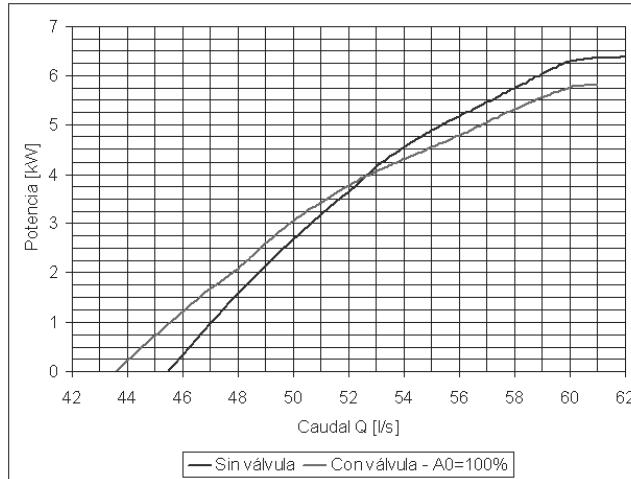
Fig. 22. Comparación de rendimientos – $A_0=100\%$.

Fig. 23. Perfiles de velocidad a la entrada del inyector.

vector, un perfil de velocidades y un perfil de presiones acorde con un funcionamiento normal esperado en este tipo de máquinas.

A partir del 50% de apertura, y para aperturas menores se evidencia un marcado descenso del rendimiento y consecuentemente una reducción de la potencia. Todo esto es acompañado por una inestabilidad en el funcionamiento de la turbina, lo que se pudo constatar en el banco de ensayos.

Es significativo comprobar que hasta un 50% de la apertura de la válvula, la velocidad de rotación de la máquina se mantiene bastante estable en valores próximos a los de diseño, para luego caer bruscamente, cuando se reduce la apertura de ésta.

Como conclusión del mismo se puede mencionar que el comportamiento de esta válvula utilizada como regulación primaria de caudal en una turbina de flujo transversal, es bastante aceptable y que, dada la gama de potencias de aplicación en el rango de las pico turbinas, se puede inferir que si la misma es acoplada en un punto del circuito que permite una buena readecuación de las líneas de corriente al ingreso del inyector, prácticamente no tendrá influencia en el rendimiento global de la turbina. Esta conclusión nos lleva a decir, que para una "regulación gruesa o primaria" del caudal, es factible utilizar válvulas mariposas de características standard y muy accesibles en el mercado.

REFERENCIAS

- [1] Arter, A., Widmer, R., Nakarmi, K., *The T3M Cross Flow Turbine*, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT) (1993)
- [2] Marchegiani, A., Audisio, O., "Diseño, Construcción y Ensayo de una Turbina de Flujo Transversal para Generación Eléctrica en Sitios Aislados", X Encuentro Latinoamericano y del Caribe sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos (X ELPAH), **37**, 254-259 (2003)

FLOW REGULATION THROUGH A BUTTERFLY VALVE IN A CROSS-FLOW HYDRAULIC TURBINE

Abstract - This paper presents the results of research on the flow regulation in a cross flow turbine. Based on the development carried out in this laboratory, a small hydro generator, we worked on some of the most important aspects of the turbine: the flow regulation. The work program was developed in order to quantify experimentally and numerically the influence on the efficiency of the turbine, by using a butterfly valve in the primary regulation of the inflow. The machine used is a cross-flow turbine with a diameter of 200 mm that was coupled upstream with a 6 inches diameter Waffer type butterfly valve. Another goal was to study how these results can be used in the design of electronic control equipment that works under the referral system loads. The work routine consisted in making the regulation of the flow enter the turbine by operating the valve. From this its reveals the various resulting parameters, and once process the data, were compared with results of an unregulated turbine and a conventional controller. As a result we can mention the same behavior of this valve as primary regulator, acceptable and, given the range of powers that are working, we can infer that the same if it is docked at a point in the circuit to allow a good adaptation of streamlines the entry of the nozzle, has practically no influence on the overall performance of the turbine. Therefore we can say that for a "primary control" of the flow, it is achievable to use these standards and elements of features available on the market.

Keywords – Regulation, Hydráulic turbine, Banki turbine, Butterfly valve.