



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

COMPROBACION EXPERIMENTAL DE INFLUENCIA DEL ALABE REGULADOR DE CAUDAL EN UNA TURBINA TIPO BANKI

Dario Mainini, Fabián Rojas, Ariel R. Marchegiani

Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (La.M.Hi.)
Depto de Mecánica Aplicada -Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
Buenos Aires 1400 - (8300) Neuquén
e-mail: marchegi@uncoma.edu.ar

RESUMEN

El inyector de una turbina Michell–Banki dirige el agua hacia el rotor a través de una sección denominada arco de admisión que toma una determinada cantidad de álabes del mismo, a fin de obtener el mayor aprovechamiento de la energía. Posee una sección transversal de forma rectangular que permite descargar el flujo sobre todo el ancho del rotor con una cara superior envolvente que guía el flujo.

La regulación de la potencia se realiza variando el caudal que ingresa a la máquina, mediante un álabe regulador que permite estrechar la sección de pasaje del agua a través de un movimiento sobre su eje. El agua entra al rotor con un ángulo que se supone constante en toda la admisión y tangente a la periferia del rotor. El flujo que abandona las paredes sólidas del inyector es definido como un chorro libre.

Como todo órgano canalizador de flujos, el inyector no está ajeno al problema de las pérdidas debidas al rozamiento contra sus paredes, a los choques y cambios de dirección del fluido que está escurriendo a través de él., y los choques o perturbaciones que puedan ocurrir, producto de la existencia del órgano regulador en el interior del mismo.

En este trabajo se pretende analizar la influencia del álabe regulador sobre el rendimiento de la turbina. Para ello se llevaron adelante ensayos experimentales que contemplaron el funcionamiento de máquina con y sin dicho álabe regulador.

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 este órgano regulador en la regulación del caudal de entrada. Una vez procesados los mismos se contrastaron con los resultados que arrojó el ensayo de la turbina para el caso sin regulación aguas arriba.

Palabras Claves: *Turbina Banki, Regulación de Caudal, Turbina de Flujo Transversal.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCION

Las Turbinas de flujo transversal son maquinas utilizadas para aprovechar pequeños cursos de agua en zonas aisladas o rurales. Estos pequeños aprovechamientos sufren gran variación de su caudal a lo largo de las distintas estaciones del año.

Para mantener las condiciones optimas de funcionamiento en las diferentes épocas y estaciones del año resulta primordial contar con una regulación del caudal, para esto la maquina cuenta con un dispositivo de regulación que consiste en alabe regulador ubicado en el inyector.

La turbina de flujo transversal consta de dos elementos básicos, el rotor y el inyector, ambos observados en la figura 1; el segundo de los cuales será el foco del presente análisis.

El rotor es el elemento que intercambia la energía cinética del chorro de agua con el eje de la maquina. Consta de una serie de álabes de sección circular unidos a dos discos que hacen a la vez de pared del rotor y acople al eje. Este recibe el agua en una fracción de su perímetro a través del denominado arco de admisión.

El Inyector posee una sección rectangular que acelera el agua hacia la cámara del rotor. A su vez en el interior de este se encuentra alojado un álabe regulador. Este elemento con forma de perfil hidrodinámico dirige y controla el flujo de agua hacia la máquina, esto es además importante, ya que la regulación de la potencia se realiza variando el caudal que ingresa a la máquina mediante un estrechamiento de la sección de pasaje del agua a través de un movimiento sobre su eje [1].

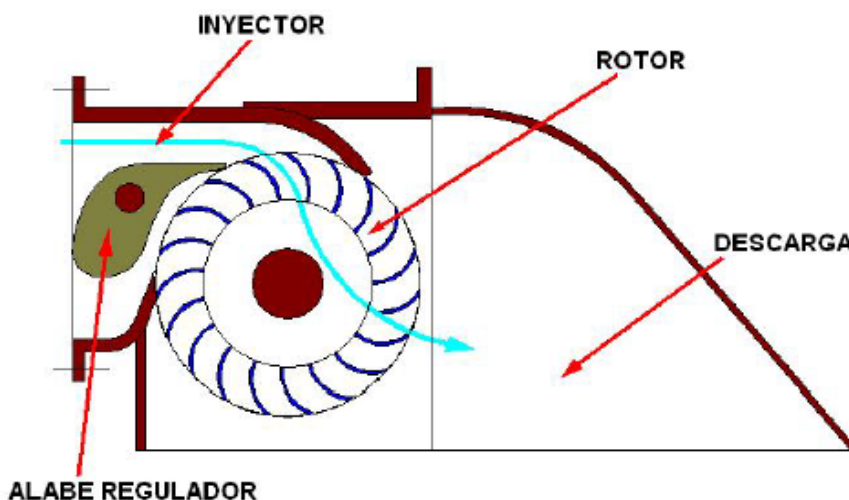


Figura 1- Componentes básicos de la turbina Michell-Banki.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1.1 Parámetros de funcionamiento y diseño.

La maquina ensayada fue diseñada para trabajar en un salto de 8.20 m, y en su punto óptimo de funcionamiento con un caudal de 80 l/s, velocidad de 530 rpm. En la tabla 1 se observan los parámetros geométricos y de operación de la turbina.

Tabla 1. Parámetros de diseño de la turbina ensayada

Altura Neta	[m]	8,20
Caudal	[m ³ /s]	0,08
Velocidad	[r.p.m]	530
Diámetro de Rodete	[m]	0,2
Ancho de Rodete	[m]	0,21
Numero de alabes	[-]	24
Angulo de admisión	[°]	90

1.2 Descripción del sistema de regulación

Si bien existen varias geometrías de inyectores y sistemas de regulación, en la maquina ensayada 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. Este alabe se ubica con su eje longitudinal paralelo al eje del rotor de la maquina, posee una sección variable de tal forma de direccionar correctamente el flujo. (Figura 2).



Figura 2: Mecanismo de regulación.

El comando se realiza en forma manual mediante un mecanismo de tornillo sin fin y manivela, por lo tanto la regulación del caudal será discreta y no responderá a una variación instantánea de la



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

potencia, sobre todo si se trata de una turbina de muy baja potencia donde no existe mecanismo de regulación automática (Figura 4).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Banco de Ensayos

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.

El banco de Ensayo es de circuito abierto y está conformado por un sistema de bombeo compuesto por dos bombas centrífugas que toman el agua de una cisterna de una capacidad media de 5 m^3 , para impulsarla a los circuitos de operación. Cada unidad de bombeo tiene una capacidad de 35 l/s y una altura estática en la descarga de 32 m . Están acopladas directamente a los motores eléctricos de 1500 RPM y una potencia de 35 kW , pudiéndose conectar en serie y paralelo. Los circuitos de ensayo están conformados por dos líneas: una principal de 8 pulgadas de diámetro y uno secundario de 6 pulgadas de diámetro [2].

En la figura 3 puede verse la instalación con los elementos principales que conforman al Banco de Ensayos.

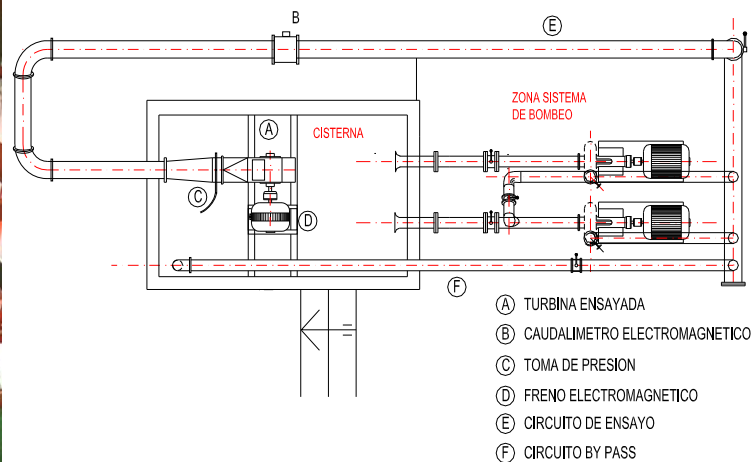


Figura 3: Imagen Fotográfica del Banco de ensayos.

Para la medición del salto o la altura se dispone de un manómetro diferencial de columna de mercurio, con escala calibrada para tal fin. El rango de medición es de 0 a 4000 mmHg . El caudal es medido con un caudalímetro electromagnético instalado sobre la tubería de diámetro $8''$. A fin de medir la cupla mecánica, la instalación cuenta con un freno electromagnético de 30 CV y $250\text{-}3000 \text{ r.p.m.}$ equipado con controlador-variador electromagnético de 90 volts c.c. y celda de carga de 50



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

kg, 2mv/v y 350ohm, donde es acoplada la turbina. La velocidad de rotación de la turbomáquina se mide por medio de un taquímetro digital y leída sobre el tablero en r.p.m. La medición se realiza con un sensor inductivo de 400 mA, 10-60BDC y un taquímetro CUB5 p/uso c/DPI 24 VC.

2.2 Procedimiento de Ensayo

Con la máquina acoplada directamente al freno electromagnético de tal manera de medir simultáneamente el torque y la velocidad de rotación en el eje de la turbina. Las mediciones se llevan a cabo para diferentes caudales manteniendo el salto constante en el valor nominal o de diseño en forma semejante a lo que sucede en el aprovechamiento real.

A su vez dicho procedimiento se repite para una secuencia de aperturas del alabe regulador. Esta secuencia consta de 8 aperturas correspondientes al 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 y 20%, con una serie de 15 a 20 mediciones en cada una de ellas de tal forma de obtener el comportamiento en todo el espectro de caudales operativos.

En la Figura 4 puede observarse la turbina durante el ensayo. En cada apertura y para el salto nominal se midieron los valores de Caudal, Altura Neta, Torque y Velocidad de rotación.



Figura 4: Elementos montados sobre el banco hidráulico, a la izquierda dinamómetro.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

2.1 Resultados obtenidos

Una vez recopilados los valores experimentales se calculan los parámetros representativos de funcionamiento de la máquina, a saber, potencias y rendimiento. Las Potencias obtenidas del banco de ensayos pueden ser divididas en dos grupos:

La potencia entregada a la turbina o Potencia Hidráulica " P_{hid} " [W] dada por [3]:

$$P_{hid} = \rho \cdot g \cdot H_n \cdot Q \quad (1)$$

donde ρ : Densidad del agua [Kg/m^3]; g : Aceleración de la gravedad [m/s^2]; Q : caudal [m^3/s]; H_n : Altura neta [m].

La potencia en el eje de la turbina " P_{eje} " [W], dada por:

$$P_{eje} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot T \quad (2)$$

donde; n : Velocidad de rotación de la maquina [r.p.m.]; T : Torque medido en el eje de la maquina [Nm].

La performance de una turbina hidráulica es medida por su rendimiento. En general el rendimiento es una indicación de qué porcentaje de la potencia entregada por el agua a la turbina es transformada en potencia mecánica en el eje, es decir:

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_{hid}} \quad (3)$$

Tanto la Potencia en el eje como el rendimiento para las distintas aperturas fueron graficados y analizados contra el caudal turbinado. En la figura 5 se observa el grafico para uno de los ensayos, es decir para determinada apertura (80% en este caso), donde se aprecia el comportamiento del rendimiento para todo el rango de caudales operativos.

El procedimiento anterior se repitió como explicamos antes para una gama de aperturas; obteniendo una serie de puntos como el mostrado en la figura 6 y reflejando el comportamiento global de la turbina.

Sobre cada uno de los conjuntos de puntos se ajustaron curvas de tendencia para cada apertura. Superponiéndolas en un mismo grafico como el de la figura 7, se observa que el máximo rendimiento se obtiene para una apertura del 80% lo cual no concuerda con lo esperado.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

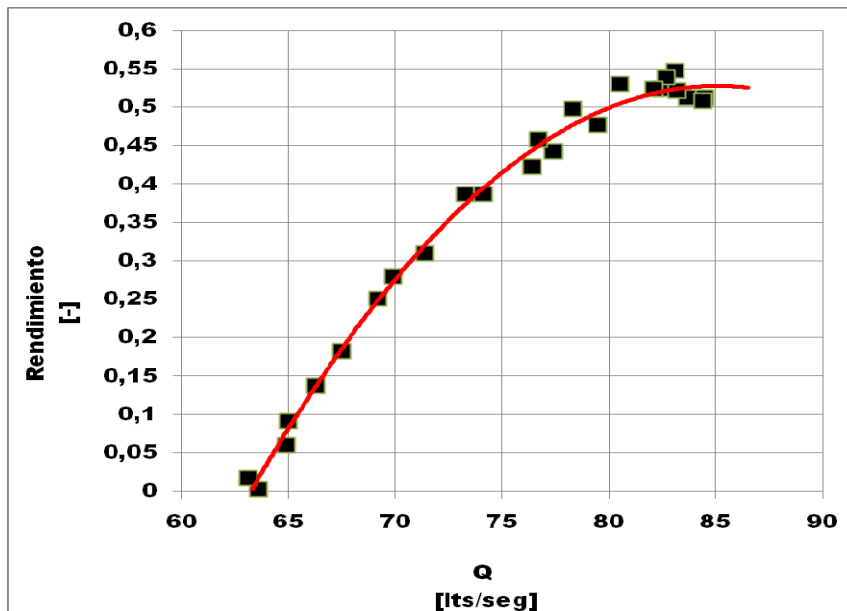


Figura 5- Curva de rendimiento caudal para una apertura de 80%.

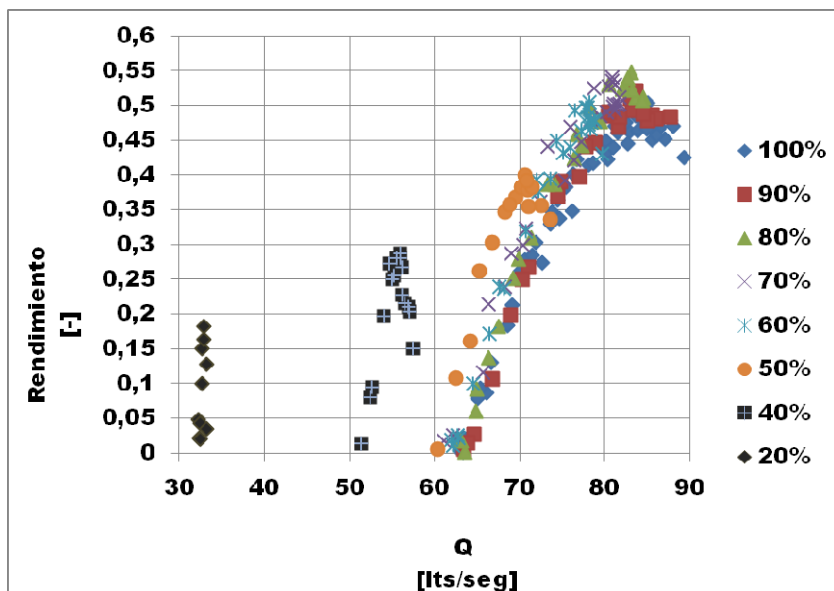


Fig 6: Datos obtenidos de los ensayos para distinto grado de apertura.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

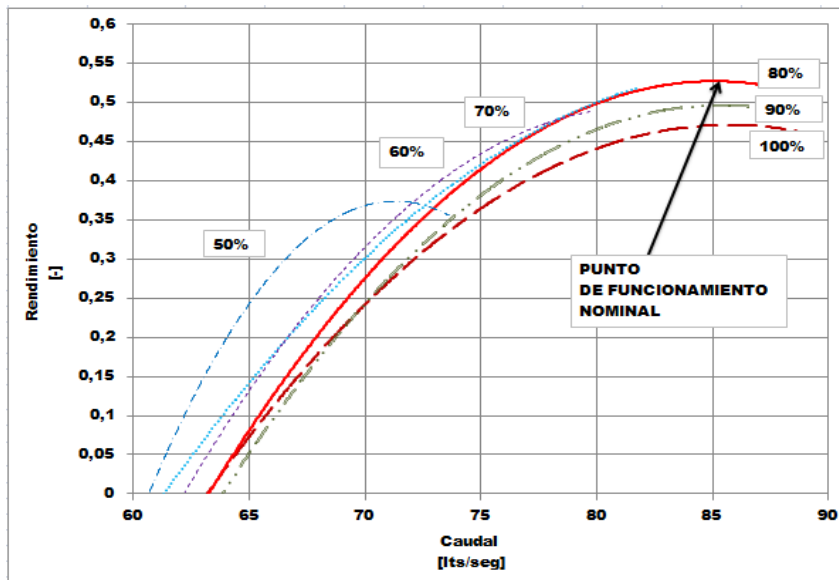


Figura 7: Curvas de rendimientos para las diferentes aperturas.

Al interpolar los puntos de funcionamiento nominal para cada apertura se obtiene la curva de rendimientos correspondientes como se muestra en la figura 8. En la misma se observa que el régimen de funcionamiento aceptable se encuentra, desde el punto de vista del rendimiento de la turbina, entre el 60% y 100% de apertura. Fuera de este rango el desempeño cae abruptamente.

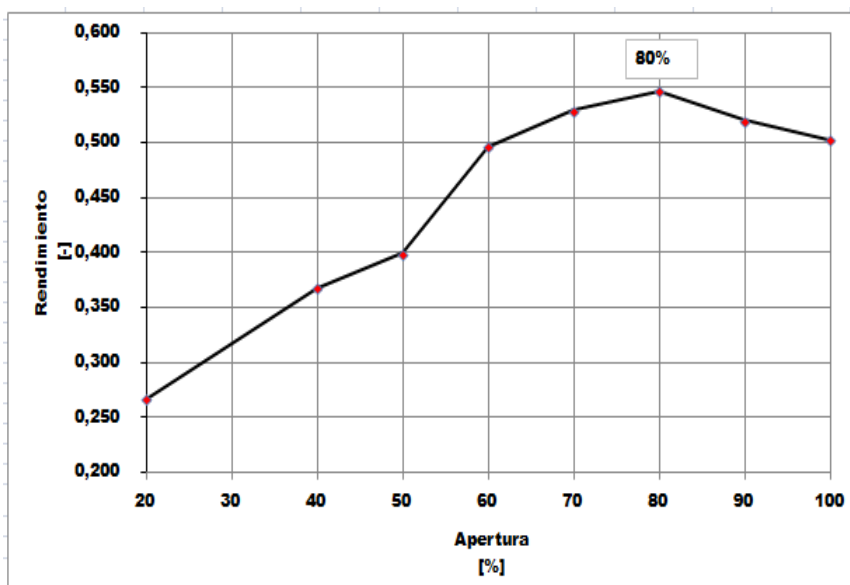


Figura 8: Rendimiento vs. Apertura.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Desde el punto de vista de la regulación de caudal a través del grado de apertura se observa (Figura 9) que el álabe proporciona una regulación significativa en rangos por debajo del **80%** de apertura. En cambio para grados de apertura superiores el caudal no varía apreciablemente.

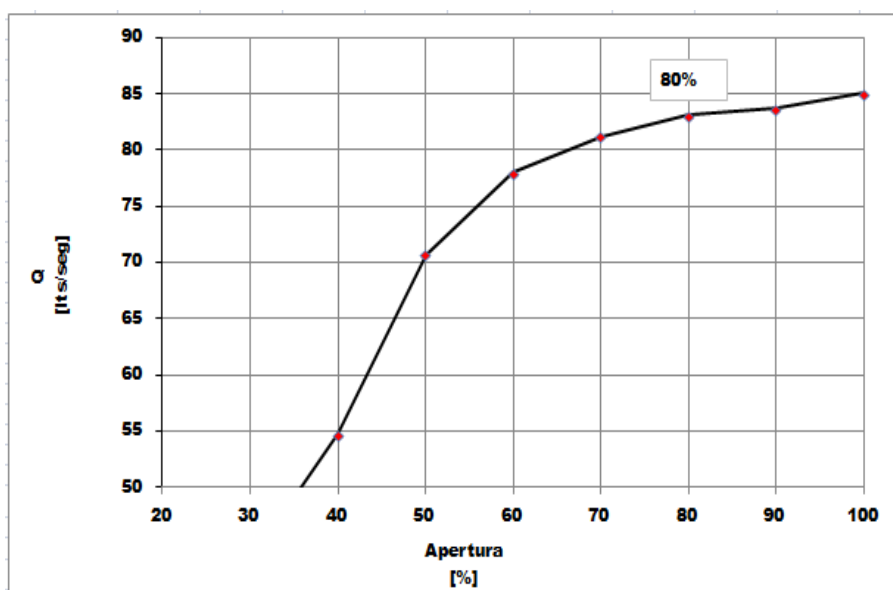


Figura 9: Caudal vs. Apertura.

Como es de esperar, en aperturas menores al 60% el álabe se encuentra en una posición hidrodinámica no favorable, lo que propicia la aparición de choques y recirculaciones, y esto explicaría la pronunciada caída del rendimiento.

En la figura 10 y figura 11 se observa el rango de potencias que cubre la maquina con el alabe distribuidor. Además se pone de manifiesto la capacidad de adaptación de la maquina a las distintas condiciones del aprovechamiento. Garantizando el suministro de potencia para épocas de bajo caudal. Superando el 80% de apertura hacia valores menores el desempeño decrece, confirmando lo observado en la **Figura 8**. Es importante resaltar que sin el alabe regulador la máquina solo funcionaría para un limitado rango de caudales aproximadamente entre 60 y 85 l/s correspondientes al rango de 45% a 100% de apertura.

3. CONCLUSIONES

La incorporación de un álabe regulador de caudal en las turbinas de flujo transversal permite administrar mejor los recursos estacionales, permitiendo obtener una mayo potencia en presencia de caudales menores al caudal de diseño.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Se observa que la regulación de potencia a través del caudal es efectiva hasta valores de aproximadamente 80% de apertura, este resultado se evidencia también en las graficas de caudal apertura que marcan la tendencia del alabe a no variar el caudal significativamente al superar valores de aproximadamente 80 % de apertura.

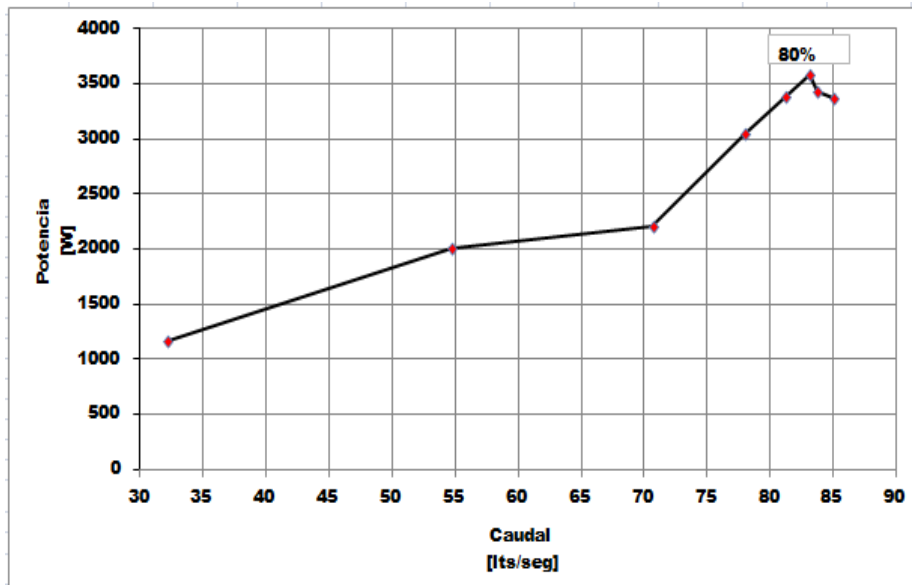


Figura 10: Potencia vs. Caudal.

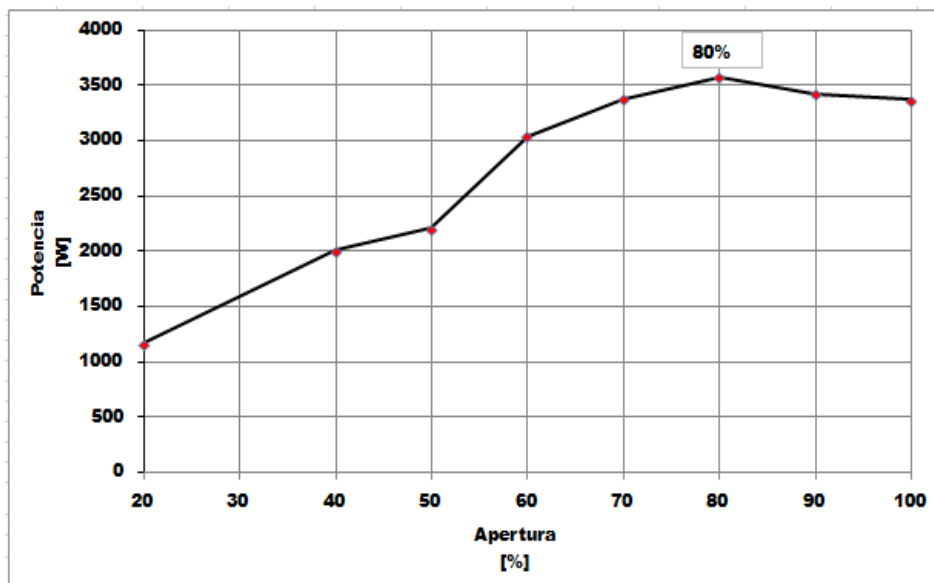


Figura 11: Potencia vs. Apertura.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Como se dijo anteriormente, la presencia del alabe regulador permite adaptar las condiciones de funcionamiento, para obtener potencia con diferentes caudales aun cuando el mismo sea inferior a la mitad del caudal nominal. Esto lo torna relevante ya que extiende el campo de funcionamiento de la turbina a épocas del año en donde los caudales sean restringidos.

Una cuestión interesante derivada del presente trabajo es la obtención del mejor rendimiento para una apertura del 80%, contrariamente a lo que se supone cuando se diseña un elemento de estas características y es que el mejor rendimiento se encuentra para la máxima apertura como lo indica la bibliografía consultada [4].

4. REFERENCIAS

[1] Marchegiani A., Varela M., "Regulación De Caudal Mediante Válvula Mariposa En Una Turbina Hidráulica De Flujo Transversal", Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol.17, 2013.

[2] Marchegiani A., Audisio O., " Ensayo de una Turbina de Flujo Axial de Fabricación Local", E&D - Energía & Desarrollo. Nro.15 CINER Centro de Información en Energías Renovables. Cochabamba, Bolivia, 1999.

[3] Mataix C., "Turbomaquinas hidráulicas", ed. ICAI, Madrid, 1975.

[4] Marchegiani A, Montiveros M., "Efecto de la geometría del inyector en una turbina tipo Banki", XII ELPAH, Quito, Ecuador, 2011.