

DISEÑO DE UN MODELO DE MICRO TURBINA HIDRAULICA PORTÁTIL

Dr. Ing. Dölling Oscar Raúl, Depto. Hidráulica de la UNSJ
Ing. Daroni, Sergio, Becario SECyT prov. San Juan.
Urquiza 91 Norte C.P. (5400) San Juan - Argentina
odolling@unsj.edu.ar Tel/Fax: 054-264-4230779

RESUMEN

Este trabajo ilustra las etapas de diseño matemático, fabricación y prueba en laboratorio de un modelo de micro turbina hidráulica portátil para poder ser acoplada a un generador asincrónico y adaptarse a las redes de riego existentes a través de elementos de fijación a los bordes de canales de agua.

La investigación centró la atención en el estudio de micro turbinas hidrodarrieus sumergibles con rotor de eje vertical. Los resultados de los ensayos hidráulicos del modelo en un canal vidriado inclinable concluyeron que: este tipo de micro turbinas es lenta; su introducción en el flujo de un canal puede producir un resalto hidráulico aguas abajo y una curva de remanso hacia aguas arriba cuyas dimensiones dependen de la condiciones del flujo, de las dimensiones del canal y del tamaño del rotor sumergido; la formación de este resalto puede producir perturbaciones en el régimen de funcionamiento de la turbina; la geometría y posición de los álabes del rotor afecta en forma muy significativa los valores de rendimiento de la micro turbina; los costos de fabricación unitaria es del orden de los \$1500/Kw. instalado, pudiendo alcanzar menores valores con una producción en serie.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta la descripción de las distintas etapas de un proyecto presentado a SECYT ley 23877/90 en el año 1993 y ejecutado por personal docente de la Cátedra de Hidráulica y Máquinas Hidráulicas del Departamento de Hidráulica de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina entre 1993 y 1996 que tuvo el objetivo de diseñar un modelo de micro turbina hidráulica que permitiera evaluar el comportamiento de distintas configuraciones de rotor, álabes y flujos a fin de diseñar una micro turbina hidráulica y realizar la transferencia de conocimientos al sector privado.

La investigación se centró en el estudio de los rotores hidrodarrieus (Davies, 1989); (Takamatsu et al, 1992). Las hipótesis de trabajo aplicadas se fundamentaron en la teoría aerodinámica de los rotores Darrieus de eje vertical de R.J. Templin (Strickland, 1976). En realidad la patente de los rotores Darrieus data de 1925 (Francia) y 1926 (Estados Unidos de Norteamérica) sin embargo recién en 1960 la National Research Council of Canada (NRC) comienza el desarrollo de esta tecnología. Una de las principales preocupaciones durante el diseño de estas turbinas, es el estudio de las cargas cíclicas dinámicas que reciben los álabes durante su rotación alrededor del eje del rotor. Dichas cargas son una función de la velocidad del flujo, de la velocidad de rotación de la turbina y del número de álabes en el rotor dado el efecto "sombra" que un álabe realiza sobre el otro durante su movimiento, este hecho influye significativamente en el rendimiento de la turbina durante su operación. Se espera entonces observar vibraciones en el rotor y fluctuaciones de rendimiento importantes durante el

funcionamiento de este tipo de micro turbinas aún cuando el régimen del flujo del canal donde está instalada haya encontrado su equilibrio.

Este trabajo aborda el análisis computacional de las fuerzas que el flujo libre ejerce sobre distintas geometrías de álabes y el diagrama de presiones que el flujo genera sobre el cuerpo sumergido. Se realizó un estudio del campo de velocidades en los alrededores del perfil sumergido y del diagrama de presiones resultantes sobre el contorno de los álabes del rotor para distintas posiciones en su recorrido y distintas condiciones de flujo.

Para determinar el campo de velocidades y el de presiones se utilizó el ambiente de simulación de elementos finitos ALGOR, en particular el módulo FluidFlow. Distintas geometrías de perfil NACA de 4 dígitos simétricas y no simétricas fueron generadas con un programa desarrollado en lenguaje LISP que permitió generar automáticamente distintos tipos de perfiles e introducirlos como contornos en el modelo matemático de ALGOR antes de generar la malla de elementos finitos con el módulo SUPERVIEW. La integración por capas de los diagramas de presiones en 2D calculados sobre los contornos de elementos finitos que representan los álabes, permiten obtener la potencia instantánea de cada tipo de rotor simulado (10 tipos diferentes) para distintas condiciones de operación (40 escenarios distintos). Este estudio permitió definir cuatro tipos de álabes favoritos para el diseño del rotor de la micro turbina.

La aplicación de las leyes de semejanza hidráulica parcial, utilizando el número de Froude, permitió realizar el pre diseño mecánico del modelo físico de la turbina a una escala de 1:5 y de todos sus componentes auxiliares. Se seleccionaron los materiales mas aptos para la construcción y comportamiento bajo las condiciones de presión calculadas por medio del modelo matemático. La construcción de los modelos hidráulicos se realizó en base a resina epóxica para los álabes y acero inoxidable para el resto de los componentes.

El proyecto incluyó además, el diseño y construcción de un canal con sector vidriado especial para el ensayo de la micro turbina, el cual tiene un largo útil total de 11 mts. y posee un fondo inclinable que permite cambiar la pendiente y las condiciones del flujo de entrada al modelo, posee un vertedero a la entrada que entrega el caudal que ingresa al canal. Se instaló un sistema de adquisición de datos que permite medir el caudal de entrada, presiones dinámicas y estáticas, torque, y número de revoluciones del rotor a tiempo real y almacenar esta información en una computadora.

Los ensayos sobre los modelos físicos de micro turbinas candidatas consistieron en la obtención de las curvas de potencia generada. Se establecieron los diversos estados de funcionamiento, los cuales dependieron de la pendiente del fondo del canal, posición de los álabes, número de vueltas del rotor y la posición de elementos auxiliares. El rodete de la turbina se diseñó de modo tal que pudieran cambiarse con facilidad la cantidad de álabes, el tipo de álabe, el diámetro del rotor y la posición relativa de los álabes dentro del rotor.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El informe “Ensayos de Laboratorio de modelos hidráulicos de micro turbina” presentado a CICITCA (UNSJ) (Dölling, 1997) describe las etapas de desarrollo y ensayo de los modelos hidráulicos desarrollados dentro del marco del proyecto “Diseño, estandarización y

funcionamiento 2) generar gráfica de contornos NACA de 4 dígitos (Abbott, 1959), 3) descomponer el medio continuo en un número finito de elementos, para ello se construye una malla de elementos finitos alrededor del perfil debiendo realizar una selección de la forma y la densidad de la malla 4) establecer las condiciones de flujo y de contorno, 5) aplicar una solución aproximada del fenómeno al interior de cada elemento, en este caso la solución de las ecuaciones diferenciales de Navier Stokes para flujos incompresibles. 6) ensamblar los elementos introduciendo las condiciones de borde en una matriz global, 7) seleccionar los parámetros de integración de Euler y de intervalo de tiempo (utiliza el método de integración de tiempo por diferencias finitas trapezoidales) que garanticen la convergencia del método de elementos finitos de Galerkin a la solución (Gallagher et al, 1978) 8) resolver el campo de velocidades en cada nodo del campo estudiado y en los contornos (perfil y bordes del campo) previa transformación del sistema de ecuaciones a un sistema de ecuaciones lineales, lo que permite resolver el sistema de ecuaciones por Newton Raphson (Gerald y Weatley, 1992) 9) transformar los valores de velocidad alrededor del perfil a valores de presión (figura 2),

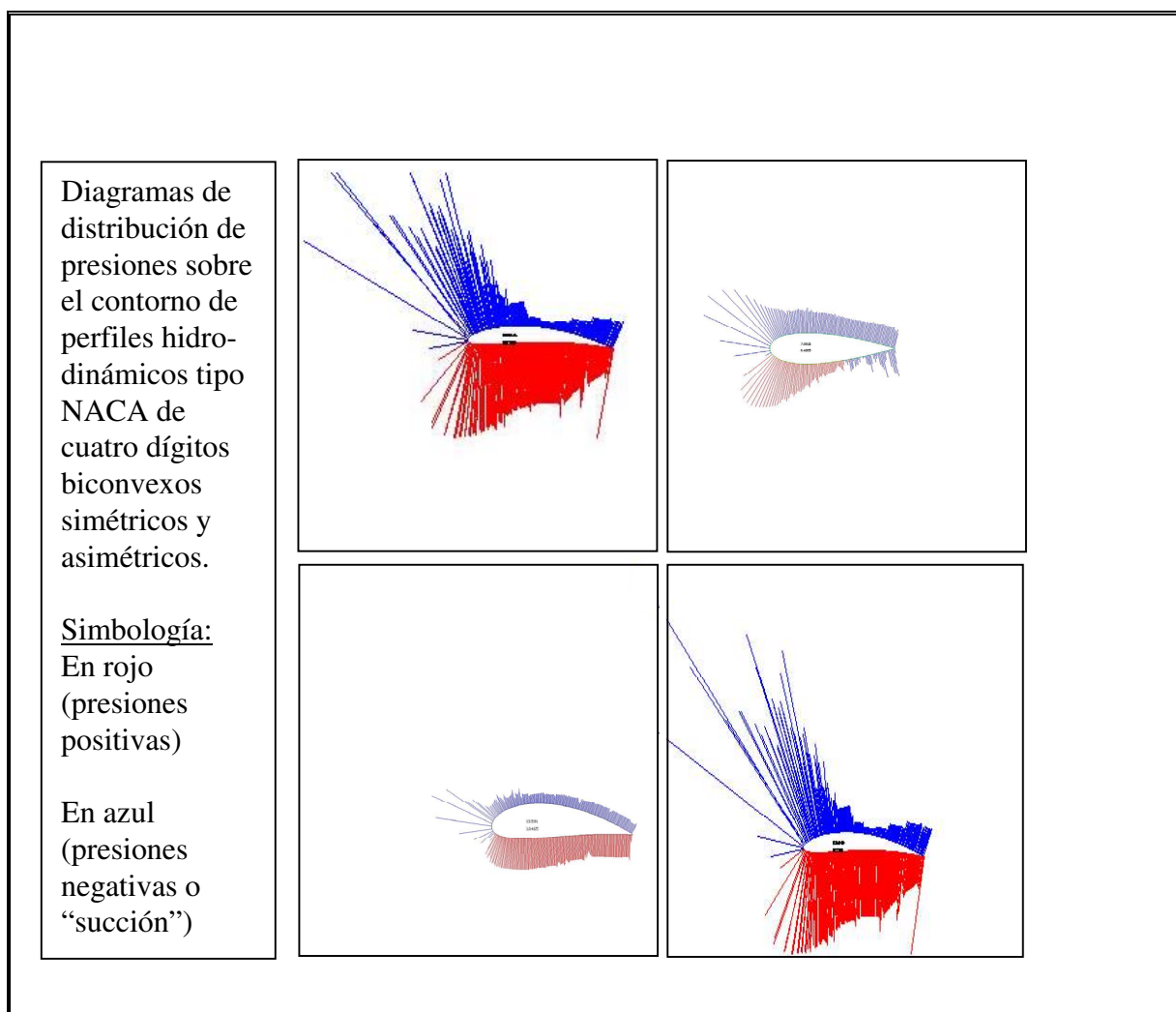


Figura 2: Diagrama de presiones para cuatro perfiles distintos interpuestos en un flujo no estacionario para una velocidad de magnitud y ángulo de ataque respecto del perfil definida. Los diagramas fueron calculados solucionando las ecuaciones diferenciales de Navier Stokes para flujos incompresibles, planteadas alrededor del perfil para un contorno finito, utilizando el método aproximado de elementos finitos propuesto por Galerkin.

10) calcular en base a las fuerzas resultantes de las presiones un valor de potencia para cada alabe y cada posición en su trayectoria de rotación alrededor del eje del rotor para distintos

escenarios (un escenario está determinado por una velocidad de rotación del rotor y una velocidad del flujo en el canal) analizado, 11) analizar las curvas de potencia entregada por cada perfil a lo largo de su trayectoria de rotación para seleccionar la geometría y cantidad de álabes óptima (figura 3 y 4). Este proceso de cálculo permitió seleccionar aquellos perfiles NACA con mejor comportamiento para los escenarios de flujo analizados, es decir aquellos alabes que entregaran el mayor valor de torque integrado a lo largo de una vuelta completa alrededor del eje de la turbomáquina. Los perfiles así seleccionados fueron utilizados para la construcción de los alabes del modelo hidráulico.

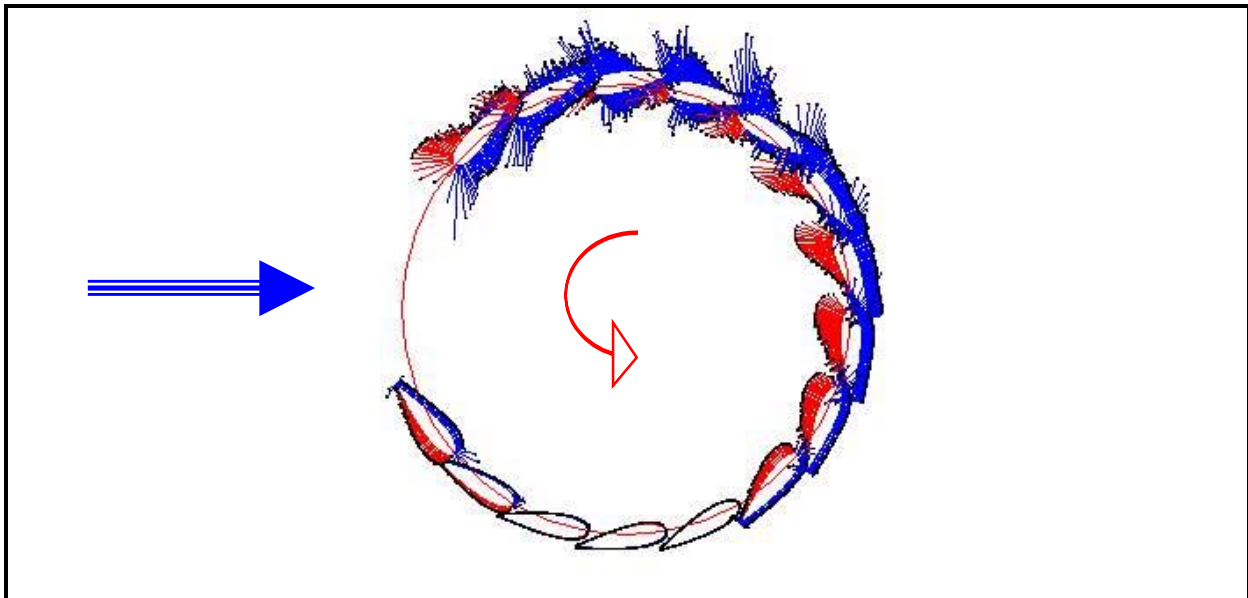


Figura 3: Diagrama de presiones para un alabe con perfil simétrico biconvexo ubicado en 20 posiciones distintas alrededor de su trayectoria respecto al eje del rotor, para una magnitud y velocidad de flujo en el canal y para una velocidad de rotación determinada. El diagrama de presiones se obtuvo como resultado de las ecuaciones de Navier Stokes por el método de elementos finitos. La flecha azul indica el sentido del flujo en el canal, la roja el sentido de rotación de la microturbina.

DISEÑO DEL MODELO HIDRÁULICO

Una vez seleccionados los perfiles hidrodinámicos de mejor comportamiento a través del análisis computacional realizado con el modelo de elementos finitos de rotores Darrieus (Dölling, 1993), se procedió al diseño y construcción del modelo hidráulico de micro turbina (rotor y componentes auxiliares). Se construyó el modelo físico de la micro turbina, que consta de: un sistema de soporte, sistemas auxiliares especialmente diseñados para guiar el flujo de agua hacia el rotor (Dölling, 1997) y tres rodetes de distinto diámetro desmontables y con posibilidad de: variar la posición de los alabes girando sobre su propio eje (probar distintos ángulos de ataque de los perfiles), armar rodetes con 2,3,4,6, 8 y 10 alabes y variar la posición de los elementos orientadores del flujo. Los alabes fueron construidos: dos series con resinas epoxi y una tercera en bronce (figura 5).

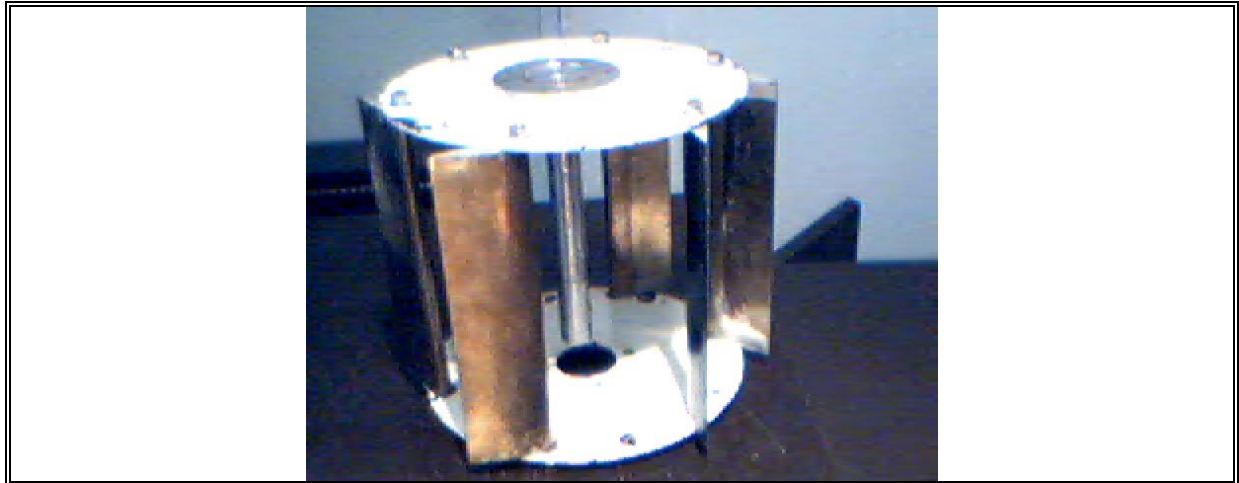


Figura 5: Fotografía de una de las posibles configuraciones de modelo hidráulico ensayadas. Se construyeron tres discos de distintos diámetros (15, 20, 30 cmts.) con 12 orificios ubicados de tal manera de poder ensayar rodetes con distintos números de álabes uniformemente distribuidos. Los álabes (de 5cmts de cuerda por 20 cmts. de altura) pueden girar sobre su propio eje lo que permite ubicarlos con distintos ángulos de ataque.

ENSAYOS DEL MODELO HIDRÁULICO EN LABORATORIO.

Los ensayos del modelo hidráulico se realizaron en los laboratorios de Hidráulica de la Universidad Nacional de San Juan ubicado en el Departamento de Rivadavia e incluyeron las siguientes etapas: **1)** Diseño de un canal vidriado de fondo inclinable y sistemas de ingreso de caudales al canal y de restitución al sistema. El sistema se alimenta de agua por gravedad proveniente del sistema de riego de la provincia de San Juan, los cuales ingresan a una cámara de nivel constante, una válvula de derivación y regulación de caudal y otra cámara de nivel constante con salida a un vertedero de tipo triangular, la restitución se realiza a través de un canal de fuga central del Laboratorio que devuelve el agua al canal de riego **2)** construcción e instalación del canal vidriado en el laboratorio de la Universidad Nacional de San Juan. **3)** Diseño e instalación de un sistema de adquisición de datos a tiempo real integrado por un juego de plaquetas ADQ12-B y conversor analógico digital de 12 bits con oscilador de 4 Mhz conectado a un PC-80486. Desarrollo de un software de adquisición de datos en lenguaje C++. El sistema adquiere los datos de velocidad y torque entregados a través de una interfaz RS-232 por los siguientes sensores: a) sensor de carga acoplado al sistema de medición del torque (Freno de Prony) medido en el eje de la turbina con precisión de 10 grs. y rango de 0,01 Kg a 30Kg y velocidad de transferencia de 9600 Baudios y b) un Encoder incremental con resolución de 360 pulsos por vuelta (1 grado). Los datos fueron respaldados en una unidad ZIP portátil. Además se contó con un estroboscopio óptico digital con rango de 1 a 5000 rpm y precisión de $\pm 0,5$ rpm.

Los ensayos de cada modelo hidráulico a estudiar incluyeron las siguientes etapas:

- 1) Calibración del instrumental de medición y comprobación del sistema de adquisición de datos
- 2) Obtención de las curvas características de funcionamiento.
- 3) Análisis del sistema de regulación de velocidad (orientadores de flujo hacia el rotor).

La etapa 1) es un paso obligado previo a cada sesión de ensayos dada la sensibilidad, especialmente del sensor de carga, a las variaciones de temperatura lo cual requiere la puesta a cero o tarado del equipo previo al ensayo.

La etapa 2) se dividió en tres actividades específicas:

2.a) Obtención de la velocidad de escape máxima para: un caudal de ensayo definido, distintos números de alabes, distintos tipos de alabes, distintas posiciones de los alabes, distintas posiciones de los elementos de regulación del flujo, distintos diámetros de rodetes, distintas posiciones verticales de la turbina.

2.b) obtención de la potencia máxima instantánea vs. velocidad de rotación para: un caudal de ensayo definido, dos configuraciones de rotor con la mayor velocidad de escape seleccionadas en la actividad anterior.

2.c) obtención de las curvas características de potencia para distintos caudales de ensayo en el canal para las dos configuraciones óptimas elegidas en las actividades anteriores (Figura 6).

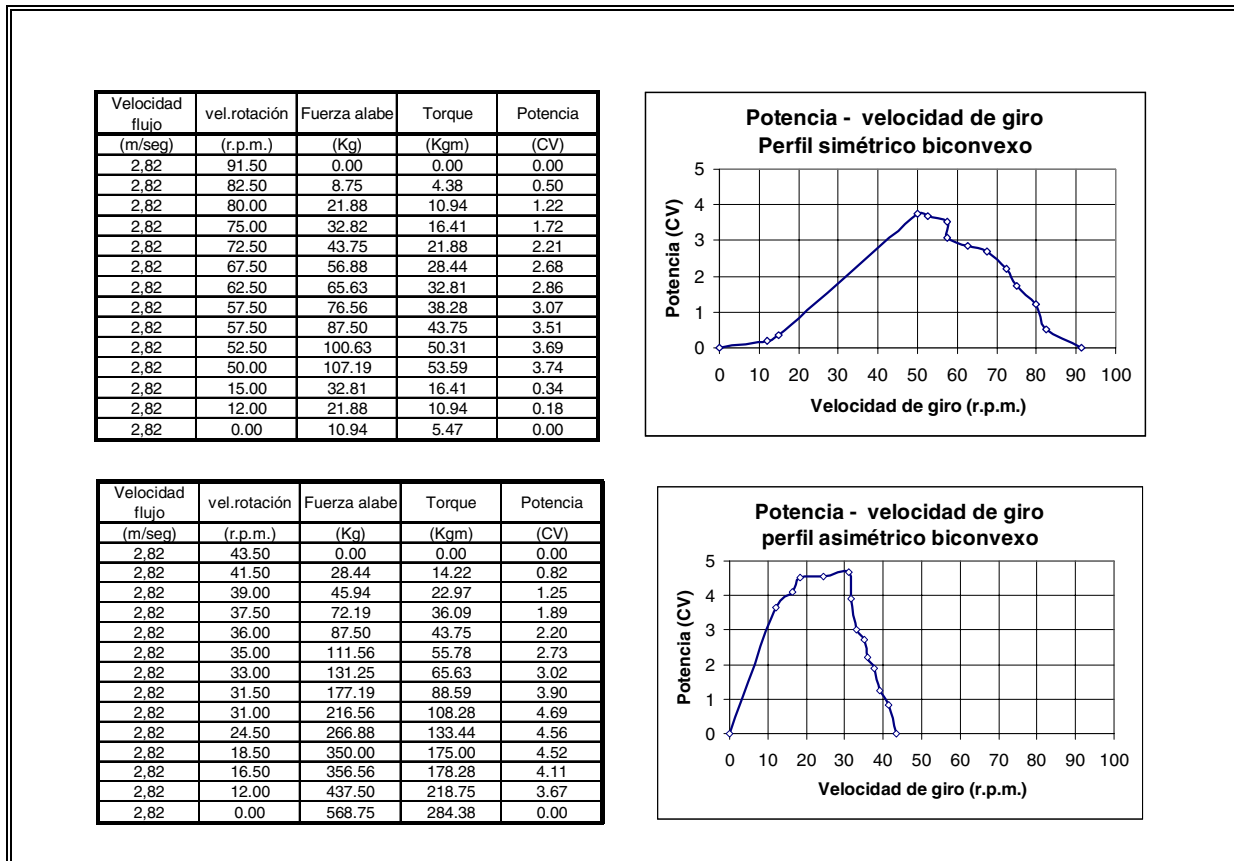


Figura 6: Comparación entre curvas de potencia vs. r.p.m. para dos tipos de rotores de seis alabes diferenciados por el tipo de perfil hidrodinámico. Arriba resultados de un rotor con 6 perfiles NACA de cuatro dígitos simétrico biconvexo y abajo resultados de un rotor con 6 perfiles NACA de cuatro dígitos asimétrico biconvexo. Tanto el modelo matemático de elementos finitos como el ensayo en laboratorio del modelo físico hidráulico coinciden en que el perfil asimétrico permite alcanzar mayores valores de potencia dentro del rango de velocidades de flujo ensayado. Las curvas representan los valores para un rotor de 1mt. de diámetro por 1 mt. de altura extrapolando los resultados de los ensayos del modelo hidráulico aplicando semejanza parcial basada en el N° de Froude.

La etapa 3) incluyó el estudio de distintas geometrías y posiciones de elementos orientadores de flujo hacia el rotor que permitió obtener el mejor comportamiento de cada tipo de rotor ensayado y lograr los datos necesarios para diseñar un regulador automático de velocidad de rotación.

La figura 7 presenta las curvas de igual potencia para distintas velocidades de rotación del rotor de la micro turbina y para distintas velocidades de ataque del flujo de agua en el canal (0.5 a 3 m/s). Se puede observar que la velocidad de rotación coincidente con el rango de potencias máximas (máxima registrada 4.2 C.V.) está comprendida entre 40 y 60 r.p.m. Los resultados presentados corresponden a una extrapolación de los resultados del modelo hidráulico de escala 1:5 a través de la semejanza parcial de Froude para el cálculo de las escalas de velocidades y de fuerzas.

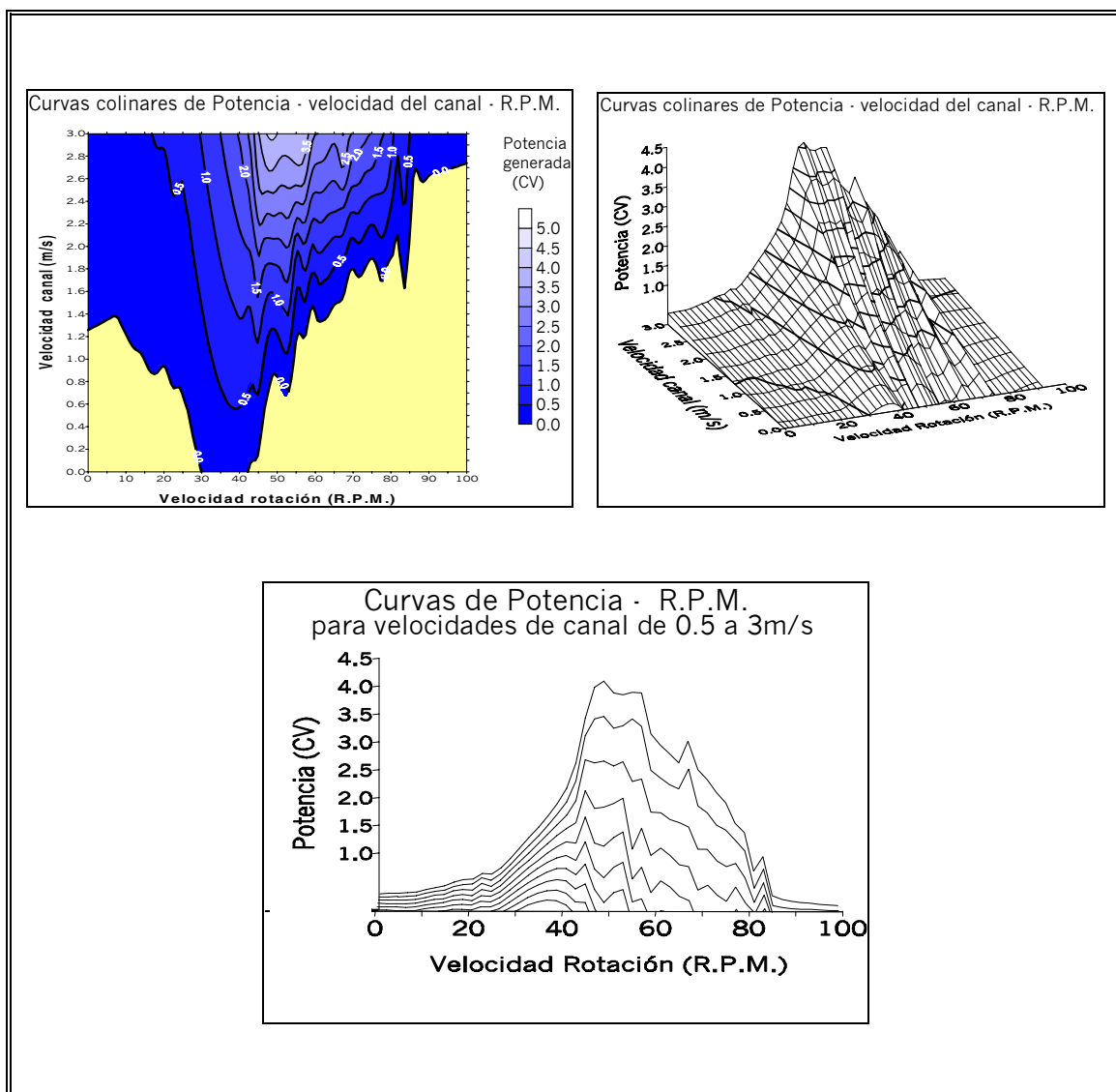


Figura 7: Curvas de Potencia–Velocidad de Rotación–Velocidad flujo de canal para un rotor de un metro de diámetro por un metro de altura provisto de seis alabes simétricos biconvexos

CONCLUSIONES

Los datos entregados por el sistema de adquisición de datos fueron sometidos a test estadístico de homogeneidad y consistencia. Se construyeron las curvas de potencia contra número de revoluciones del rotor para cada una de las geometrías de rodets ensayados y cada estado de flujo del canal, el análisis de dichas curvas concluye que: la micro turbina diseñada es un turbina lenta por lo que debe incluirse un multiplicador de velocidad antes de ser acoplada a generadores asincrónicos estándar; la introducción de la micro turbina en el flujo del canal produce un resalto hidráulico cuya geometría depende de la condiciones del flujo y el tamaño del rotor sumergido, la perturbación del flujo se extiende hacia aguas arriba y aguas abajo en una magnitud dependiente del flujo y de las condiciones de operación de la máquina; la geometría y disposición de los álabes en el rotor afecta en forma muy significativa los valores de rendimiento de la micro turbina fundamentalmente debido al fenómeno de desprendimiento de la vena fluida detrás de los álabes; los perfiles asimétricos, a pesar de ser más lentos, entregan una mayor potencia y mantienen dicha potencia máxima para un rango de velocidades mayor que los perfiles simétricos, en contraposición los perfiles asimétricos presentan una curva de potencia-r.p.m. más esbelta que los simétricos; se logró comprobar una buena correspondencia entre los resultados entregados por la modelación matemática y los entregados por los ensayos del modelo físico; la respuesta de rotores hidrodarrieus, especialmente en flujos abiertos, depende muy fuertemente del tipo de perfil hidrodinámico, número y posición de los perfiles, ángulo y magnitud de la velocidad de ataque en cada posición; el análisis de semejanza hidráulica permitió realizar una estimación de costos de fabricación unitaria de la micro turbina de mejor comportamiento, del orden de los \$1500/Kw. instalado, considerando que este tipo de turbo máquina puede llegar a convertirse en una interesante alternativa energética dada la alta probabilidad de reducir este valor para una escala de producción de la micro turbina en lotes, o en serie, en aquellos lugares en que las condiciones de operación permitan su instalación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott Ira H. y Doenhoff Albert E. Von (1959) “Theory of Wing Sections” *Dover Publications, Inc. New York. 2da ed.*
- Davies B. V. (1989) “Vertical Axis Hydro Turbine for off grid instalations” *Canadian National Research Council Hydraulics and Energy, Mines and Resources, ed. Quebec.*
- Dölling, Oscar R. (1992) “Diseño, estandarización y fabricación de una micro turbina hidráulica portátil para su utilización en microcentrales hidroenergéticas a implantar sobre cursos adecuados de agua” Proyecto aprobado por *Secretaría de Ciencia y Técnica – Gobierno de San Juan, Argentina ley 23877/90 Acta N° 02 del 27/11/92 del Consejo Consultivo provincial y Resolución N° 014/ (30-11-1992). Expte. N° 2.622/92.*
- Dölling, Oscar R. (1993) “Informe de Avance Técnico N° I, proyecto: Diseño, estandarización y fabricación de una micro turbina hidráulica portátil para su utilización en microcentrales hidroenergéticas a implantar sobre cursos adecuados de agua” *Secretaría de Ciencia y Técnica – Gobierno de San Juan, Argentina. (21-06-1994).*

- Dölling, Oscar R. (1997) “Ensayos de laboratorio de modelos hidráulicos de microtubina” *Informe Técnico de avance a CICITCA – UNSJ – proyecto Resolución N° 111/93 Decanato Facultad Ingeniería UNSJ- San Juan Argentina.*
- Gallagher R.H., Oden J. T., Taylor C. y Zienkiewicz O.C. (1978) *Finite Elements in Fluids – Volumen I y II – John Wiley & Sons – ed. Bristol Great Britain.*
- Gerald, Curtis F. y Weatley, Patrick O. (1992) *Applied Numerical Analysis* Addison Wesley Publishing Company 5ª ed. California.
- Strickland, J.H. (1976) “Aerodynamics of the Darrieus Turbine” *Proceedings of the Vertical Axis Wind Turbine Technology Workshop, Sandia laboratories, SAND 76-5586, p il 29-58 (May 17-20, 1976).*
- Takamatsu, Yasuo, Furukawa, et al (1992) “Studies on cavitation occurring on the runner blade of a Darrieus-type water turbine”. *Informe técnico de la Kyushu University, Fukukoa, Japón.*