

TURBINA AXIAL DE BAJAS CAIDAS, MODELACION POR COMPUTADORA Y PRUEBAS DE CAMPO

Por.: José Chiroque, Saúl Ramírez, Robert Simpson.

1. INTRODUCCION

El resultado de este trabajo investigación es el esfuerzo conjunto entre Soluciones Practicas - ITDG y la Universidad de Nottigham (Reino Unido). En 1998, Soluciones Prácticas - ITDG inició el desarrollo de una turbina axial de bajas caídas "Bajas caídas, Bajo costo y Bajo mantenimiento". Un prototipo de 25 kW fue instalada en el 2000 en el Centro Poblado de Las Juntas (Cajamarca), el cuál viene operando normalmente y suministrando energía eléctrica a cerca de 70 usuarios.

En los últimos 5 años, ITDG ha tenido solicitudes por la instalación de turbinas similares pero de baja potencia, alrededor de 5 kW, para satisfacer necesidades de energía a pequeños caseríos, empresarios privados rurales, y otros. Sin embargo, para estas potencias, el costo de fabricación de una turbina axial era relativamente costoso, por lo que se diseño un modelo simplificado de la turbina¹, tanto en la forma de la carcasa, como en el perfil de los alabes.

En el 2003, se instaló una versión de la turbina axial simplificada de 5 kW en el lugar denominado Magdalena (Cajamarca), el cuál ha sido objeto de la evaluación conjunta entre Soluciones Prácticas - ITDG y la Universidad de Nottingham a través del proyecto "Design, computer modelling and testing of low head turbines", y cuyos resultados se presentan en este documento.



Foto 1: Diseño original de la turbina axial de bajas caídas, MCH Las Juntas, 25 kW

2. OBJETIVOS

El **objetivo general** del proyecto es proporcionar un método adecuado para el diseño apropiado y de bajo costo de picoturbinas axiales de bajas caídas menores a 5 kW y que pueda ser utilizado en una rango variado de condiciones hidroenergéticas.

El **objetivo específico** es evaluar la pico turbina axial de Magdalena a través de una modelación en computadora, realizar ensayos de campo y la respectiva comparación de las curvas, del comportamiento de la maquina.

3. LA TURBINA AXIAL DE "MAGDALENA"

Una de las principales motivaciones por el desarrollo de este proyecto es el gran potencial hídrico existentes en diferentes lugares con caídas bajas (2 a 10 m), con que se puede proveer de energía eléctrica en zonas rurales, pero esto se ve limitado por la

¹ Este nuevo diseño se inicio el 2000 con la participación de Arhtur Williams de la Universidad de Nottingham (UK)

falta de una tecnología apropiada y de bajo costo, siendo esto un motivación para soluciones practicas- ITDG, de aprovechar el recurso local para la generación de energía.

3.1. Características antes del modelamiento

El modelamiento se realizó en base a la turbina axial de eje horizontal instalada en Magdalena y especificado para las siguientes condiciones de trabajo: altura, 3.8 m; caudal, 0.250 m³/s.

El accionamiento del generador es a través de un sistema de fajas y poleas a un generador de inducción de 5.6 kW. La carcasa es del tipo espiral con seis alabes directrices fijos. El rodete esta fabricado en planchas de acero curvadas tratando de simular un perfil aerodinámico. No tiene un cono a la salida del flujo de agua del rodete.

Las pruebas iniciales del equipo reportan que la turbina no esta produciendo la potencia de diseño, esto debido a: el nivel del agua en la cámara de carga se reduce rápidamente, la velocidad de giro de la turbina no era el apropiado, las obras civiles presentan deficiencias y el generador no llega a generar el voltaje nominal (220 V)



Foto 2 y 3: Turbina axial de Magdalena, rodete sin modelación en CFD

Para la mejora del sistema se evaluaron dos posibilidades: i) Fabricación de una nueva turbina para las condiciones existentes y ii) fabricar uno o dos rodetes. Se decidió la segunda alternativa previo análisis usando un programa computacional, CFD (Dinámica de fluidos Computacional), para determinar los posibles cambios o modificaciones en el rodete.

4. Metodología y herramientas para la evaluación

La metodología de la evaluación comprende dos aspectos: el diseño y modelación del comportamiento de la turbina por computadora y las pruebas de campo del prototipo

4.1 Diseño y modelación por computadora

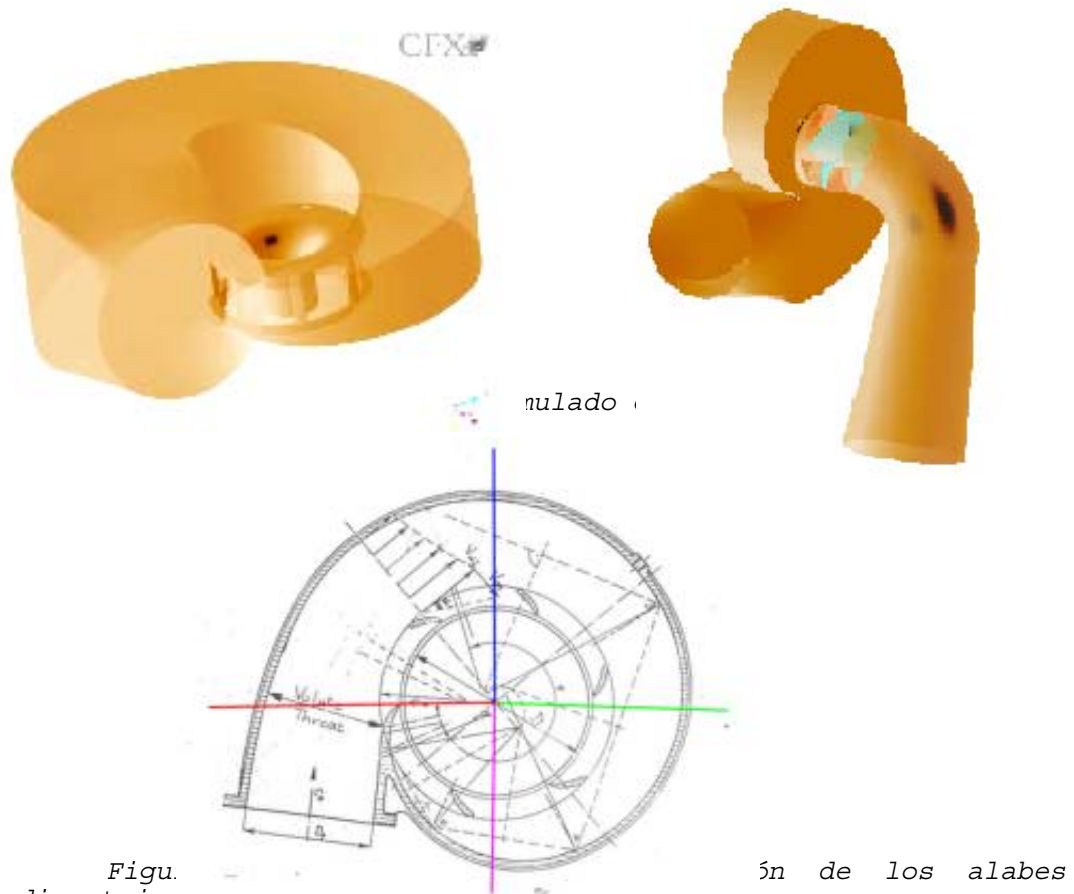
La literatura existente sobre el tema es limitada y no ayuda a entender en totalidad el diseño de pico turbinas de flujo axial, por lo que en este trabajo se ha desarrollado simulación y modulación por computadora de la turbina en general así como de los componentes auxiliares, carcasa, tubo de descarga, alabes directrices.

El procedimiento por lo general involucra los siguientes pasos:

- Modelar la geometría del problema
- Dividir la geometría del flujo en pequeñas subregiones discretas de tamaño finito formando una malla o rejilla computacional (elementos finitos).
- Establecer condiciones de limite e interfaces dominantes

Para obtener una solución se puede llevar varias horas o días dependiendo del tamaño y la complejidad del problema, obteniéndose mucha información, velocidades presión, fuerza torques, etc. La finalidad de la simulación con el CFD de la turbina de Magdalena, es determinar el comportamiento de los componentes, eficiencia de la carcasa espiral, la direccionalidad del fluido que proporcionan los alabes directrices y diseñar un nuevo rodete que trabaje con las características de los componentes existentes y de los recursos del lugar.

El modelo de simulación está basado en el diseño de la turbina axial de "Magdalena" el cual consta de una carcasa espiral de sección rectangular y diámetro decreciente (figuras 1 y 2) obteniéndose con la simulación la direccionalidad del flujo dentro de la carcasa con relación al radio. El tubo difusor acodado de forma cónica elíptica una característica de este tipo de maquinas, el difusor va unido una parte con soldadura a la carcasa y otra parte después de rodete, unida con pernos, lo que permite su construcción y facilita el transporte. Los alabes directrices ubicados en forma circular de paso fijo que direccionan el fluido al rodete (figura 3), estos seis alabes son ensamblados empleando un disco y una corona circular



La simulación de estos componentes permitió determinar la eficiencia hidráulica, del espiral y de los alabes guías siendo estas perdidas de un aproximado del 10% del total de la altura para un caudal de 0.180 m³/s.

4.2 Pruebas de campo del prototipo

Realizado el modelamiento del prototipo y del analisis de los resultados, se corrigió y rediseño las partes que podrían limitar una adecuada performance de la turbina, y con estas nuevas características se rediseño, fabrico e instalo un nuevo rodete en el lugar seleccionado- Magdalena.

El objetivo de las pruebas de campo es determinar las principales características de operación de la turbina axial simplificada y su campo de aplicación, que a su vez serán comparadas por los resultados obtenidos en la simulación por computadora.

4.3. Turbina después del modelamiento con "nuevo rodete"

El rediseño de la geometría del perfil del alabe esta basado en propiedades de la aerodinámica, la teoría del ala, siendo esta características el coeficiente de sustentación, resistencia y de momento, que combina las diferentes variables que permiten darle una curvatura al alabe. Sin embargo, en este caso por razones de costo y facilidad de fabricación, el alabe del rodete de "Magdalena" ha sido fabricado en plancha de acero curvada, simulándole diseño aerodinámico original.

La siguiente ecuación de Nechleba², en combinación con la ecuación de Euler, involucra estos parámetros, x/l , C_L , M , que son obtenido de graficas experimentales y son en función de las características del perfil de alabe a diseñar.

$$\frac{2gH \eta_h x/l}{uw_\infty} \approx M C_L$$

Donde: H= altura (m)

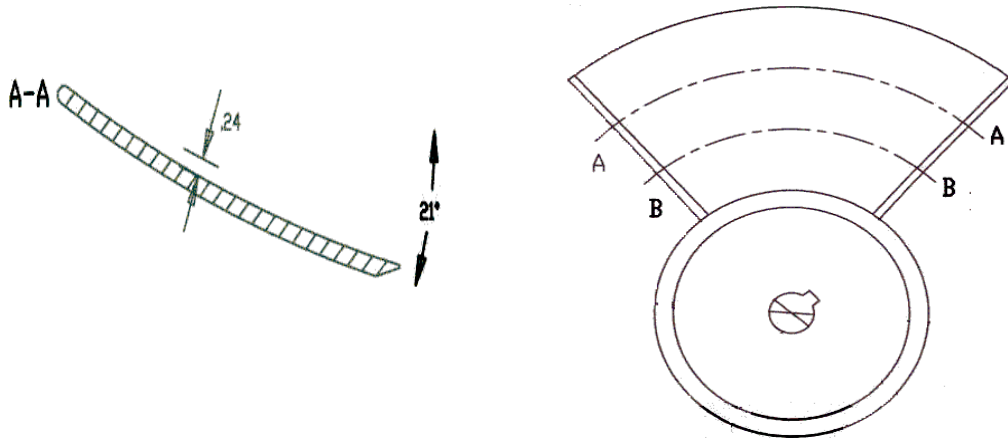
$M = f(l, x, \alpha, \beta)$

η_h = eficiencia hidráulica (90%)
sustentación

C_L = coeficiente de

l = longitud de la cuerda del perfil x = máximo espesor del alabe

g = gravedad



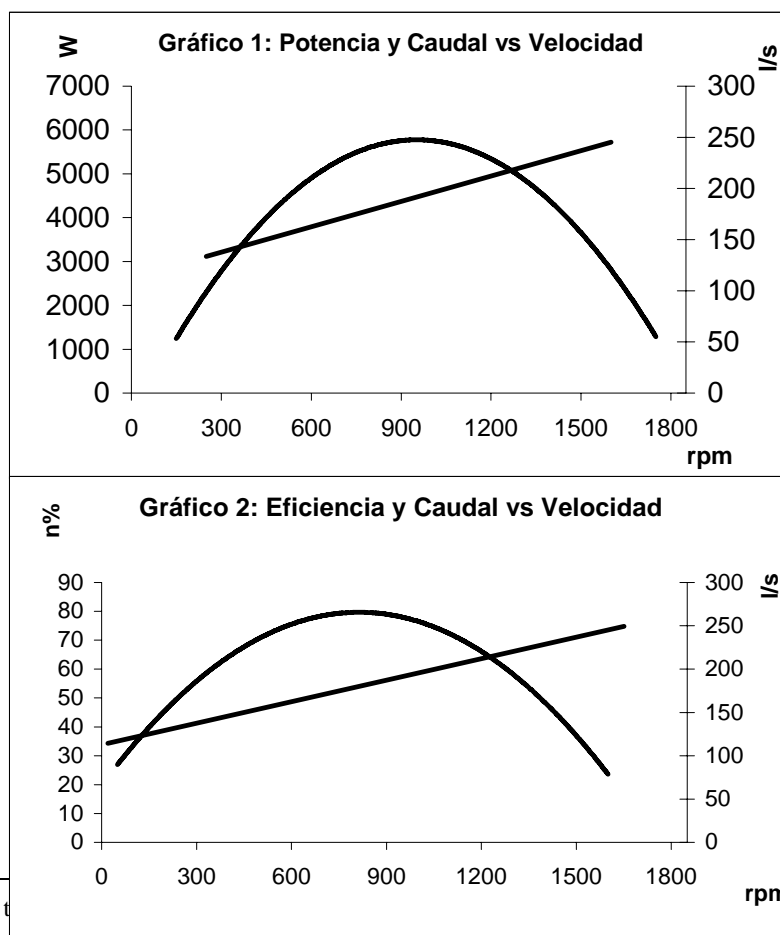
Figuras 3 y 4: Perfil del alabe y rodete



Foto 4: Nuevo rodete para "Magdalena"

4.3. Modelamiento de la turbina axial con "nuevo rodete"

La modelación permitió tener las características de un nuevo rodete, y las curvas de trabajo. Este nuevo diseño incluye un cono que permite mejorar las líneas de flujo a la salida del rodete e influir en la mejorar de la eficiencia. Los gráficos 1 y 2 muestran la simulación del comportamiento de la nueva turbina de Magdalena y los que se esperan contrastar con las pruebas de campo.



5. PRUEBAS DE CAMPO

El desarrollo de las pruebas de campo ha tenido lugar denominado Pungurume, distrito de Magdalena, Departamento de Cajamarca, lugar de propiedad del Sr. Luis Sangay y donde se ha instalado la turbina axial.

Con la finalidad de controlar las dos principales variables que intervienen para generar la potencia mecánica, caudal y altura, se acondiciono la infraestructura que permitieron el control y registro de la altura para un determinada apertura de válvula o compuerta.

Para la medición del caudal se diseño y construyo un vertedero de cresta ancha aguas abajo, en el canal que transporta las aguas turbinadas, para el diseño del vertedero se uso el software WINFLUME, donde se debe tener en consideración cierto parámetros recomendados en la literatura de vertederos.

Para la medición de potencia mecánica se diseño y construyo un freno, que permitía aplicar diferentes fuerzas de frenado para una determinada apertura de válvula y la vez el registro de la velocidad de giro de la turbina en cada fuerza aplicada. Ver fotos 5 y 6.



Foto 5 (izq.): Vertedero, medidor de caudal



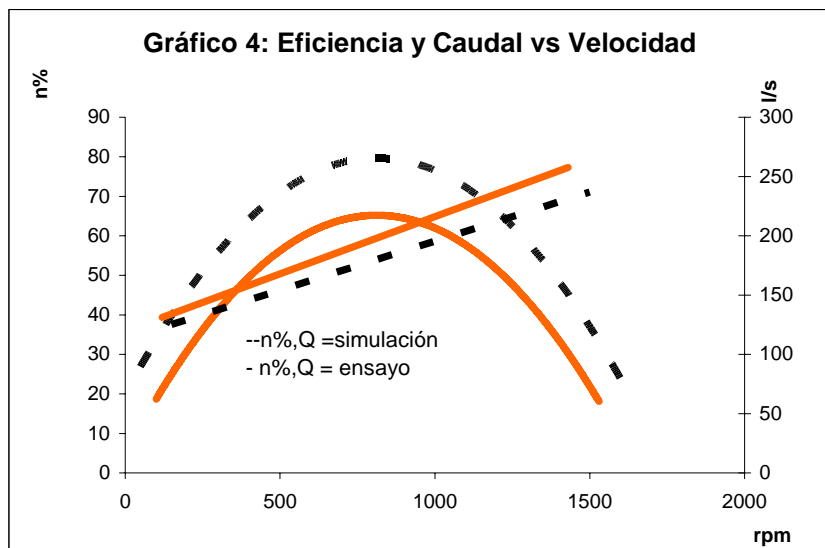
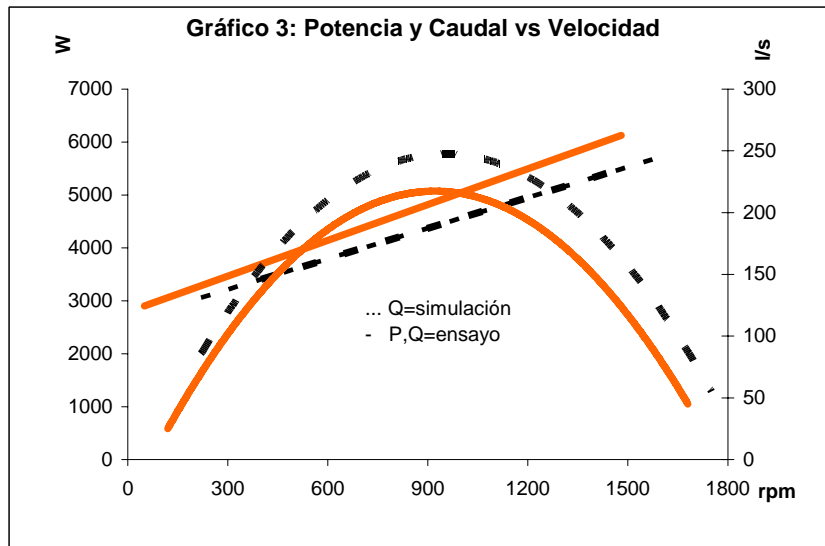
Foto 6 (der.): Características del Freno

6. RESULTADOS

Se han ensayo la turbina para cuatro diferentes apertura de válvula, 23%, 48%, 71%, 94% que permitieron encontrar el mejor comportamiento de la máquina para un apertura de válvula de 71%. La zona de mejor operación, según los resultados mostrados en el gráficos N° 3 y 4, se obtiene para un caudal de $Q_1 = 160$ a 200 l/s, con una velocidad de rotación de $n = 600$ a 800 rpm, para una altura neta de 4 m, teniéndose una potencia mecánica máxima $P_1 = 5.0$ kW, con una máxima eficiencia mecánica en el eje de 65%.

El comportamiento de la maquina para menores aperturas de válvula tiene una influencia en la eficiencia, y para una apertura mayor de 94% el comportamiento estuvo influenciado por la excesiva carga con se realizo el ensayo, por lo que la maquina no trabaja en a las condiciones de diseño, por lo que presenta menor performace.

Las graficas también muestran la comparación de las curvas del comportamiento de la maquina obtenidas por la simulación por computadora, con las obtenidas en los ensayos de campo, donde se



muestra una diferencia en la eficiencia de un 15%, y por lo consiguiente la generación de menor potencia del prototipo.

7. CONCLUSIONES

- El ensayo realizado en campo con un sistema de aprovechamiento energético con todos sus componentes de obras civiles y mecánicas, tal como son requeridas para el servicio y alejado de kms de la ciudad difiere en algunos aspectos de los que se realizan en laboratorio, donde los componentes construidos escala se pueden adecuar o modificar con relativa facilidad al requerimiento del ensayo, lo que no es posible en un sistema de dimensiones reales de trabajo. En laboratorio las variables a medir se pueden registrar con mayor exactitud.
- Los resultados obtenidos en el ensayo a la turbina de Magdalena donde las diferentes curvas muestran el comportamiento final de la maquina con todas las características de los componentes

auxiliares simplificados en un sistema de pico hidro. Las características nominales de la turbina de Magdalena son:

- Diámetro nominal del rotor 285 mm
 - Numero de alabes directrices 6
 - Numero de alabes del rotor 4
 - Potencia Mecánica en el eje 5 k W.
 - Altura de diseño 4 mt
 - Caudal de diseño 180 lts/seg
 - Velocidad de giro 800 rpm
 - Eficiencia de la turbina en punto de diseño 65%
- El modelamiento y simulación por computadora permitió tener las características geométricas del componente básico en una turbina, el rodete, y sus curvas características del comportamiento de trabajo para diferentes rangos de velocidades y altura, mostrando su mejor eficiencia de aproximadamente de 80%, para una altura neta de 4 metros, 180 l/s y 800 rpm., de la evaluación de campo la máxima eficiencia global obtenida es de 65% para similares condiciones de trabajo.
 - De los resultados también muestran que el mejor comportamiento se tiene para una apertura de válvula de 71%, que la maquina trabaja dentro las condiciones de diseño, para una apertura de válvula mayor 94%, se observa un rendimiento promedio ligeramente menor, como un menor caudal, esto es posible a una mayor carga aplicada, que influye en la velocidad de giro rotor y que no permite que la maquina trabaja a las condiciones de diseño.
 - La diferencia del comportamiento de la maquina, encontrados en la simulación por computadora y el ensayo de campo, tiene varias interrogantes e hipótesis que se evaluarán y tendrán un análisis en detalle en laboratorio, estos serían los posibles factores que podrían influir en la eficiencia de maquina ensayada.
 - La simulación con el CFD, no considera la eficiencia mecánica total del sistema real con que se evaluó la turbina.
 - Las operaciones realizadas por el software son para un flujo estable que esto no se presenta en el sistema real.
 - Pequeñas diferencias entre las características geométrica de curvatura del alabe usado en el modelamiento y el ensayo de campo, debido a detalles de construcción.
 - Falta de precisión en la construcción del vertedero y su influencia en la medición del caudal, esto influenciado por las topografía de terreno.
 - Posibles errores en la toma de datos en los dinamómetros, vertedero.
 - Como resultado final se tiene una tecnología apropiada que a mostrado un buen comportamiento en los ensayos, que se encuentra generando energía eléctrica y potencia mecánica a un molino de granos cuando este es requerido, en beneficio a un empresario rural.

8. BIBLIOGRAFIA

- Miroslav Nechleba, Hidraulic Turbine.
- Manuel Polo Encinas, Turbomáquinas Hidráulicas, Limusa - México 1976.

- Teodoro Sanchez, Behaviour of Centrifugal Pumps, Running as Turbines, Thesis submitted as part of the requirement for the Master of science degree, Reading England - 1988.
- L Quantz, Motores Hidráulicos, cuarta edición, Editorial Guastavo Gili, S.A.
- Bibliografía interna de Soluciones Practica - ITDG.
- CFD, Computational Fluids Dinamics.
- Tony L. Wahl, Winflume, Software para diseño y calibración de vertederos de cresta ancha, Water Resources Research Laboratory D- 8560

Mayores informes:

Saúl Ramírez y José Chiroque

saul@itdg.org.pe, jchiroque@itdg.org.pe

Programa de Energía, Infraestructura y Servicios Básicos, ITDG

www.itdg.org.pe