



FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Desarrollo de una aplicación computacional para la generación de rotores y distribuidores de picoturbinas hidráulicas de flujo axial de alto rendimiento

Javier Ramoska^{1*}, Adolfo Niederhauser², Pablo Varela³, Nelson Cotella⁴

^{1,2,3,4} **Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulicas – - Facultad de Ingeniería**
Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nacional 36 Km. 601 - 5800 Río Cuarto (Cba.) – Argentina
e-mail: jramoska@ing.unrc.edu.ar.

RESUMEN

En nuestro país se disponen de numerosos cauces aprovechables para la instalación de pico centrales hidráulicas para generación eléctrica aislada. Para una adecuada utilización de la energía hidráulica disponible es necesario fabricar pico turbinas hidráulicas de alto rendimiento en reducidos tiempos de diseño y ejecución. En base a experiencias anteriores y a desarrollos de otros investigadores [1], surgió la necesidad de elaborar una herramienta computacional que optimice el proceso de diseño de los componentes principales de las pico turbinas hidráulicas.

La herramienta computacional desarrollada se aplica al diseño de componentes de pico turbinas hidráulicas de flujo axial. Este aplicación se basa en la resolución de la teoría de Euler para turbo máquinas, el análisis de las velocidades del fluido a la entrada y salida de los componentes y el diseño hidrodinámico de los perfiles utilizados.

Las variables de entrada introducidas son los parámetros del salto hidráulico y de la turbina. La herramienta a través de un procedimiento de cálculo genera la geometría de las partes encargadas de la transformación energética y muestra detalladamente en Gráficos las diferentes variables del prototipo. Una vez aprobado el diseño la herramienta proporciona la geometría resultante en formato DXF el cual puede ser utilizado en programas (CAD), programas de estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD) y en programas de diseño y manufactura (CAD-CAM) para la creación del prototipo o máquina definitiva.

Con el desarrollo de esta herramienta se han conseguido reducir los tiempos de diseño de los componentes principales de turbinas hidráulicas de flujo axial, adaptando a las mismas a las necesidades de los diversos puntos de instalación. Mediante el ajuste de las variables en juego para el procedimiento de cálculo se consiguieron elevados rendimientos hidráulicos para este tipo de pico turbo máquinas, además de estandarizar los procedimientos de cálculo y fabricación.

Palabras Claves: Picoturbina hidráulica, generación aislada, diseño

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las Turbomáquinas Hidráulicas axiales se estudian aerodinámicamente, los álabes se consideran como perfiles alares inmersos en el flujo que experimentan la influencia mutua de todos ellos [2]. Basados en este concepto se desarrolla una herramienta computacional para dimensionar turbinas axiales de alto rendimiento.

2. DESARROLLO

2.1. Fuerza de Sustentación y Arrastre

Si tomamos un rotor de una turbina axial de un número finito de álabes y realizamos el desarrollo cilíndrico en uno de sus radios, el conjunto de álabes en el desarrollo cilíndrico forman un enrejado de perfiles como el mostrado en la Figura (1).

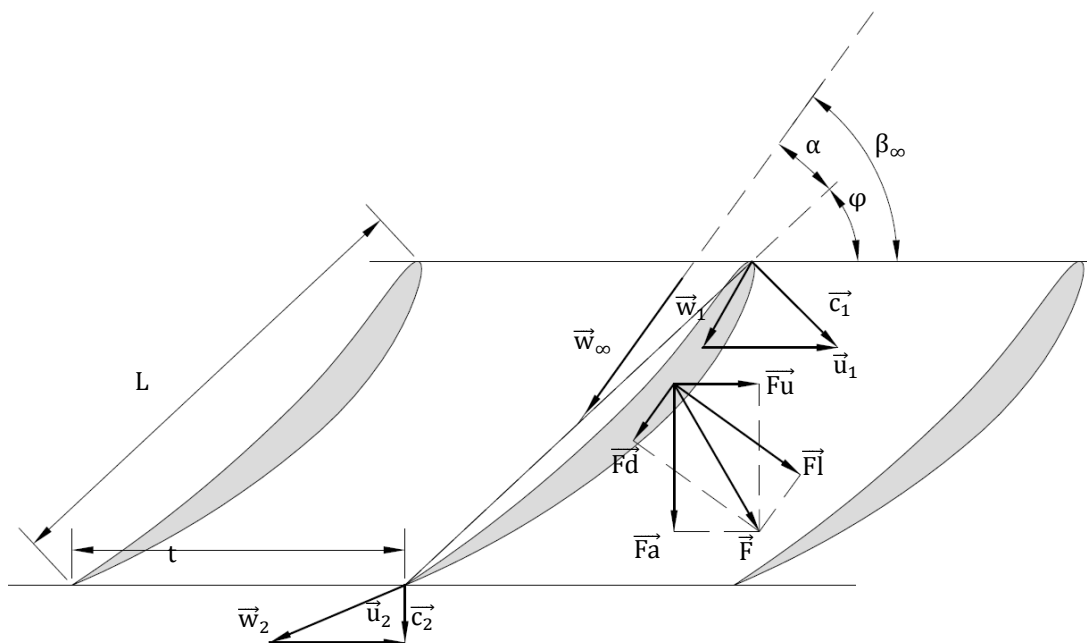


Figura 1 - Fuerzas actuantes sobre un perfil hidrodinámico en una corriente de fluido

En donde:

- L Es la longitud de la cuerda del ala.
- t Es el paso entre alas.
- \vec{c}_1 y \vec{c}_2 Son las velocidades absolutas del fluido a la entrada y salida del ala respectivamente.
- \vec{u}_1 y \vec{u}_2 Son las velocidades tangenciales a la entrada y salida del ala respectivamente.
- \vec{w}_1 y \vec{w}_2 Son las velocidades relativas del fluido a la entrada y salida del ala respectivamente con referencia a la dirección de la velocidad tangencial del ala.
- \vec{w}_∞ Es la velocidad relativa mediana del triángulo formado por \vec{w}_1 y \vec{w}_2 .
- α Es el ángulo de ataque del ala con respecto a la dirección del fluido.
- β_∞ Es el ángulo que forma la dirección del fluido y la dirección de la velocidad tangencial del ala.
- φ Es el ángulo que forma la cuerda del ala con la dirección de la velocidad tangencial del ala.

Sobre cada perfil actúa una fuerza \vec{F} con sus componentes \vec{F}_l y \vec{F}_d , normal y paralela respectivamente de \vec{w}_∞ , la cuerda del perfil forma el ángulo α (ángulo de ataque) con la dirección de la velocidad relativa mediana del fluido \vec{w}_∞ . Por conveniencia descomponemos \vec{F} en las direcciones periférica \vec{F}_u y axial \vec{F}_a .

La componente axial \vec{F}_a produce empuje y la componente periférica \vec{F}_u produce par. Si tenemos en cuenta que la potencia entregada por la máquina depende directamente del Par producido por \vec{F}_u y la velocidad de giro de la máquina un álabe diseñado para una turbina hidráulica de alto rendimiento deberá producir un par máximo con un mínimo empuje. Para encontrar dicha relación es necesario determinar las características hidrodinámicas del conjunto de perfiles que forman el rotor, para lo cual es necesaria la determinación de la configuración de corriente alrededor de cada perfil.

Llamando \vec{w}_∞ , a la mediana del triángulo formado por \vec{w}_1 y \vec{w}_2 de componentes $w_{\infty a}$ y $w_{\infty u}$ y β_∞ al Ángulo que forma \vec{w}_∞ con la dirección negativa de \vec{u} según la figura 2

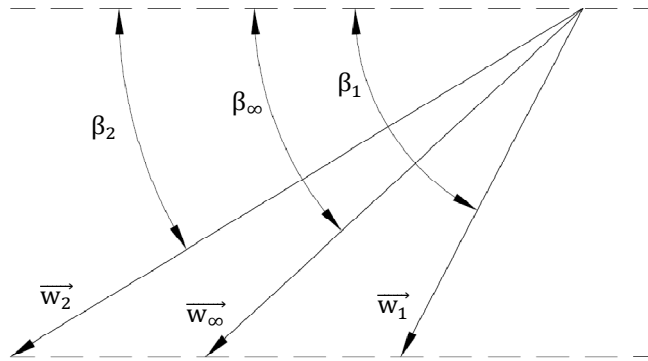


Figura 2 – Velocidades Relativas a la entrada y salida de un perfil hidrodinámico

Analizando el triángulos de velocidades se tiene que:

$$w_{\infty u} = \frac{w_{2u} + w_{1u}}{2} \quad (1)$$

$$w_{\infty a} = w_{1a} = w_{2a} \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \beta_\infty = -\frac{w_{\infty a}}{w_{\infty u}} \quad (3)$$

Según el teorema de sustentación de Kutta-Joukowski en un fluido ideal potencial el empuje ascensional F_l viene dado en modulo y dirección por:

$$F_l = \rho w_\infty \Gamma \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \beta_\infty = -\frac{w_{\infty a}}{w_{\infty u}} = -\frac{F_a}{F_u} \quad (5)$$

La ecuación (5) demuestra que la fuerza que el fluido ejerce sobre el perfil es normal a \vec{w}_∞ . La velocidad \vec{w}_∞ , juega el mismo papel en las turbinas axiales que la \vec{c}_∞ en la aerodinámica. Notar que en un perfil aislado la corriente no sufre desviación alguna, \vec{c}_∞ es la misma antes y después del perfil, mientras que en un enrejado sí. Es decir un álabe aislado reacciona sobre el fluido circundante con una fuerza igual y de sentido contrario, pero como la masa del fluido circundante es infinita la desviación que esta produce en las líneas de corriente a una distancia suficientemente alejada antes y después del perfil es nula. En cambio en el enrejado la masa es finita y se produce una desviación. Antes del enrejado la velocidad es \vec{w}_1 y después del enrejado es \vec{w}_2 ; pero con relación a la fuerza de sustentación todo sucede en el enrejado como en un perfil aislado en que la velocidad en el infinito antes y después del perfil fuese \vec{w}_∞ , por lo tanto el empuje ascensional de la ecuación (4) es normal a \vec{w}_∞ . Este es uno de los conceptos utilizados por la herramienta para seleccionar los perfiles hidrodinámicos.

2.2 Ecuación fundamental de diseño de turbinas axiales

Partiendo de las ecuaciones (4) y (5) válidas para todas las turbinas axiales se deduce la fórmula fundamental para el diseño aerodinámico de los álabes de las turbinas axiales.

$$C_a L w_\infty = cte \quad (6)$$

Esta relación debe ser constante de la base a la punta del álabe. Si analizamos el triángulo de velocidades podemos observar que:

$$w_\infty = \sqrt{\left(u + \frac{\Delta c_u}{2}\right)^2 + c_a^2} \quad (7)$$

Si se mantiene constante la velocidad axial c_a , la ecuación (7) demuestra que w_∞ aumenta de la base a la punta del álabe ya que u aumenta y Δc_u disminuye, aun que más lentamente que u . Si se diseña un álabe con la ecuación (7) se tendrá que disminuir C_a de la base a la punta. Esto puede lograrse disminuyendo progresivamente L , también puede lograrse disminuyendo C_a , por lo cual hay que variar de la base a la punta el ángulo de ataque o la geometría del perfil o ambas cosas a la vez. Este es otro de los conceptos utilizados por la herramienta para seleccionar los perfiles hidrodinámicos.

2.3 Triángulos de Velocidades

La herramienta de cálculo determina los triángulos de velocidades a la entrada y salida del rotor para un número finito radios cuya cantidad es elegida por el usuario en función de la precisión requerida.

Para el cálculo de los triángulos la herramienta tiene en cuenta las siguientes hipótesis:

1. Se utiliza la ecuación de Euler para Turbomáquinas.
2. La velocidad meridional será constante para todos los radios que abarca el rodete.
3. La altura teórica **Hu** será constante para todos los radios, lo que equivale a decir que todos los hilos de corriente que atraviesan el rodete transmiten la misma energía por lo cual la relación $C_a L w_\infty$ también será constante.

- Los triángulos de velocidad a la salida de los álabes para todos los radios que abarca el rodete son rectángulos.

2.4 Geometría de los perfiles hidrodinámicos

El estudio sistemático de perfiles aerodinámicos más completo realizado por el NACA ha sido el de la serie de 4 dígitos, cuyos resultados se condensan en el Reporte 460 del NACA [3].

En esta serie la línea media está formada por dos parábolas de segundo orden que son tangentes en el punto de la luz máxima. La variación de la línea media se obtiene variando solamente la posición y la magnitud de la luz máxima. La nomenclatura es un número de 4 cifras: la primera (**m**) expresa magnitud de la luz máxima en % de cuerda; la segunda (**p**) expresa la posición de la luz máxima en decimas de la cuerda a partir del borde de ataque, y las dos últimas cifras expresan el espesor máximo en % de la cuerda. Para la selección del perfil óptimo la herramienta toma las ecuaciones que conforman el perfil NACA de 4 dígitos y resuelve las mismas para que las tangentes de las líneas medias coincidan con la direcciones de las velocidades relativas de los triángulos de velocidades calculados para todos los radios de la máquina. Resolviendo las ecuaciones de los perfiles NACA de 4 dígitos para **m** y **p** en función de los ángulos de entrada y salida de la línea media se tiene:

$$p = \frac{\tan(\theta_2)}{(\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1))} \quad (8)$$

$$m = \frac{1}{2} \frac{\tan(\theta_1) * \tan(\theta_2)}{(\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1))} \quad (9)$$

Donde θ_1 y θ_2 son los ángulos formados por la tangente de la línea media a la entrada y a la salida del perfil.

Al seleccionar perfiles cuya tangente de línea media coincida con las direcciones de entrada y salida del triángulo de velocidades calculado se minimizan las pérdidas por choque o desprendimiento a la entrada y se garantiza que la componente tangencial de la velocidad absoluta a la salida del álabe sea nula por lo cual se aprovecha al máximo la energía disponible.

El espesor máximo en % de la cuerda debe ser especificado por el usuario, de acuerdo a nuestros ensayos los perfiles con mejores comportamientos para este tipo de aplicaciones son los que tienen un espesor entre un 4% y 12% de la longitud de la cuerda.

3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

3.1 Variables de entrada

Para comenzar con el cálculo la herramienta solicita los parámetros de entrada, que son los siguientes:

- Parámetros del Salto Hidráulico.
 - Caudal Disponible del Salto.
 - Altura Disponible del Salto.

- Parámetros de Cálculo.
 - Resolución Angular: Se refiere a la cantidad de puntos tomados para generar un perfil. A mayor resolución mejor precisión en los resultados.
 - Resolución Radial: Se refiere a la cantidad de perfiles radiales que generara la herramienta, al igual que la resolución angular, este parámetro mejora la precisión de los resultados.
- Parámetros de la Máquina.
 - Rendimiento Esperado.
 - Diámetro Interior.
 - Diámetro Exterior.
 - Velocidad de Giro.
 - Numero de álabes.

En la figura 2 se observa la interface de la herramienta, las variables de entrada y los resultados obtenidos.

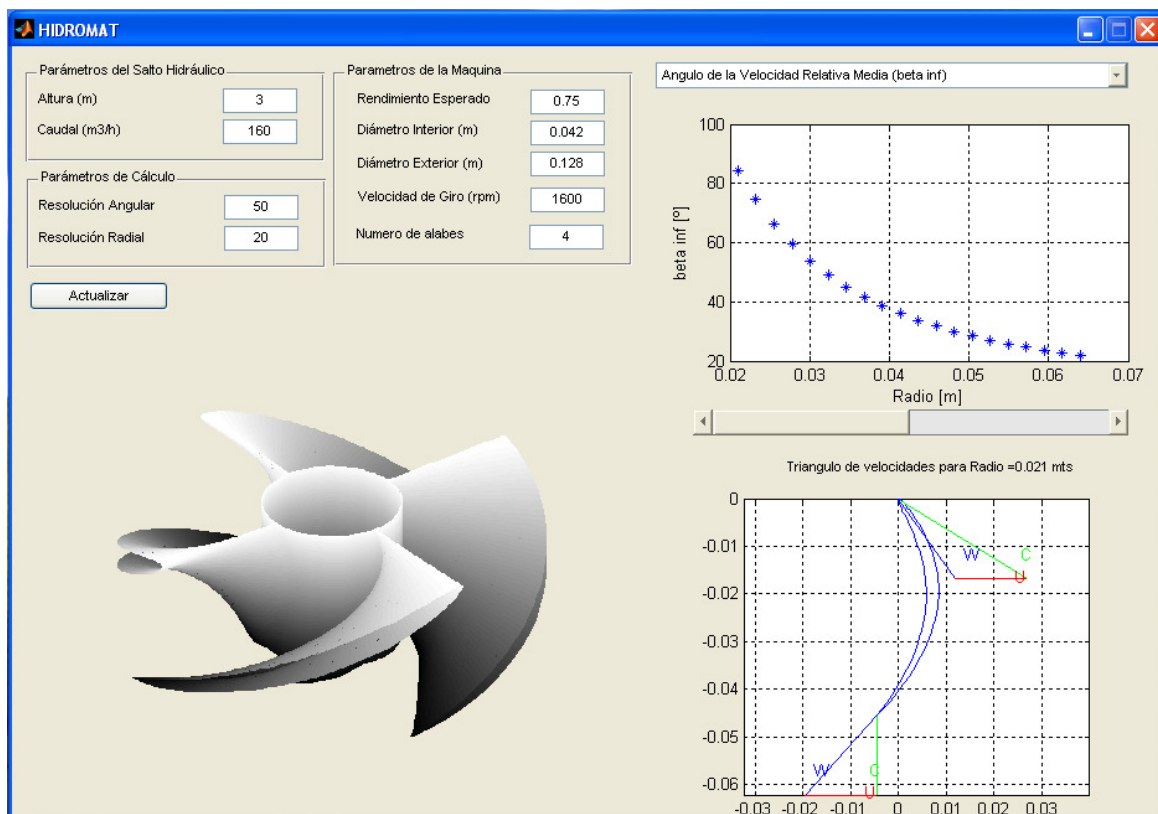


Figura 3 –Interface de la Herramienta de cálculo para Turbinas Hidráulicas Axiales

3.2 Cálculo de Parámetros

Con los parámetros de entrada la herramienta calcula los triángulos de velocidades para cada radio de la turbina de acuerdo a las hipótesis descritas en el punto 2.3

Determinados los triángulos de velocidades para cada radio, el programa busca perfiles hidrodinámicos de longitud de cuerda unitaria cuya tangente de la línea media a la entrada y a la salida coincida con la

dirección de la velocidad relativa de entrada y de salida del triángulo de velocidades calculado para cada radio de acuerdo al procedimiento descrito en el punto 2.4.

Determinados los perfiles hidrodinámicos la herramienta calcula los coeficientes de sustentación y arrastre para cada perfil y busca una longitud de cuerda que cumpla con la ecuación (3).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

A partir de los cálculos realizados la herramienta genera tres tipos de resultados:

4.1 Gráfico de variables en función del radio del rodete

- Ángulo de la Velocidad Absoluta de Entrada (α_1)
- Ángulo de la Velocidad Absoluta de Salida (α_2)
- Ángulo de la Velocidad Relativa de Entrada (β_1)
- Ángulo de la Velocidad Relativa de Salida (β_2)
- Ángulo de la Velocidad Relativa Media (β_∞)
- Velocidad Absoluta de Entrada (C_1)
- Velocidad Absoluta de Salida (C_2)
- Velocidad Relativa de Entrada (W_1)
- Velocidad Relativa de Salida (W_2)
- Velocidad Relativa Media (W_∞)
- Velocidad Tangencial (U)
- Coeficientes de Empuje Ascensional (Cl).
- Coeficientes de Arrastre (Cd)
- Longitud de la Cuerda (L)
- Paso Relativo (t/L)
- Fuerza de Empuje Ascensional.(F1)
- Fuerza de Arrastre (Fd)
- Fuerza Tangencial (Fu)
- Relación $C_\alpha L W_\infty$

Estos Gráficos son útiles para hacer una comprobación preliminar del diseño adoptado, dicha comprobación se realiza cargando los parámetros del salto hidráulico (altura y caudal) y los parámetros de la máquina (diámetros, velocidad de giro y número de álabes). Una vez ingresados los parámetros la herramienta calcula todos los parámetros necesarios para generar los gráficos mencionados anteriormente.

Por ejemplo en la figura 4 se observa el ángulo β_∞ para todos los radios, dicho gráfico sirve para comprobar los ángulos que son más favorables para maximizar F_u y por consiguiente mejorar el torque transmitido al eje de la turbina.

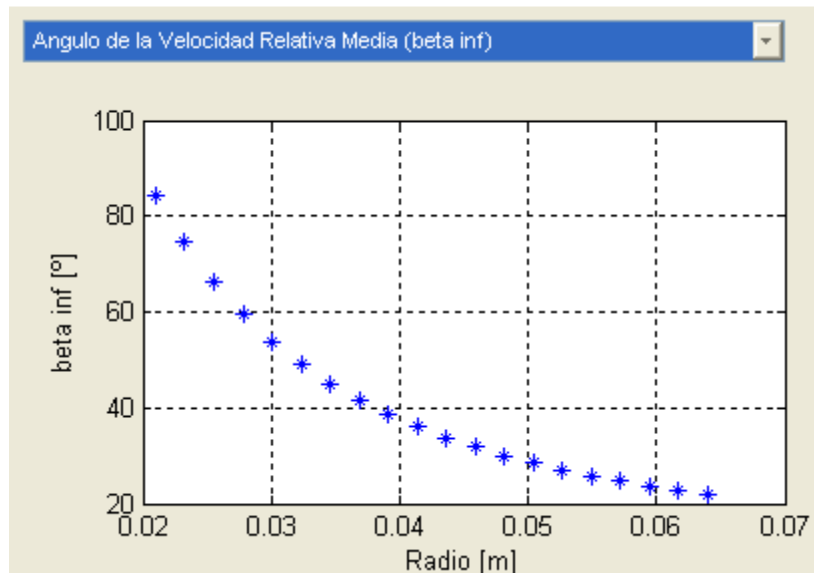


Figura 4 – Grafico del Ángulo de Velocidad Relativa Media en función del Radio del Rodete

4.2 Gráficos de triángulos de velocidades

La herramienta traza en el plano para cualquier radio seleccionado el perfil hidrodinámico y sobre el mismo el triángulo de velocidades a la entrada y salida del mismo perfil, en el ejemplo mostrado en la figura 5 se aprecian que las tangentes de entrada y salida de la línea media del perfil calculado coinciden con la dirección de la velocidad relativa del triángulo de velocidades calculado para el mismo radio.

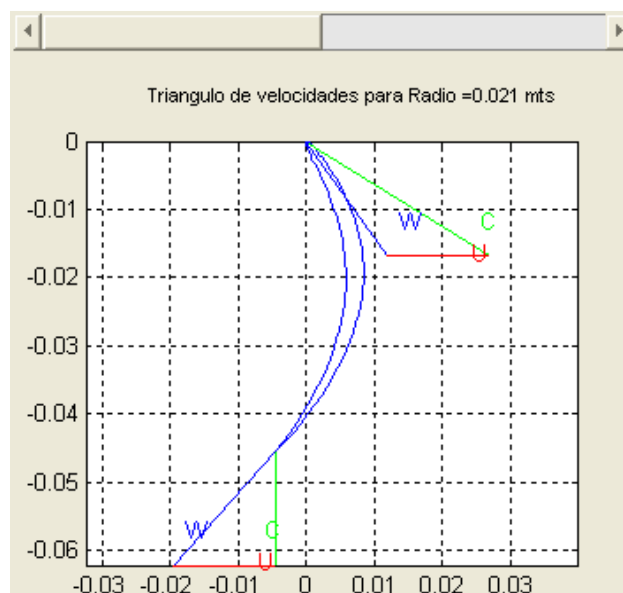


Figura 5 – Grafico del perfil y los triángulos de velocidades para un radio determinado

4.3 Geometría Tridimensional de los Componentes de la Turbina

El programa genera la geometría tridimensional de los componentes de la turbina, a la vez se puede exportar la geometría al formato DXF el cual puede ser utilizado en programas de diseño asistido por computadora (CAD), programas de estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD) y en programas de diseño y manufactura (CAD-CAM) para la creación del prototipo o máquina definitiva.

En la figura 6 se muestra el rotor calculado para los parámetros de entrada mostrados en la figura 2.

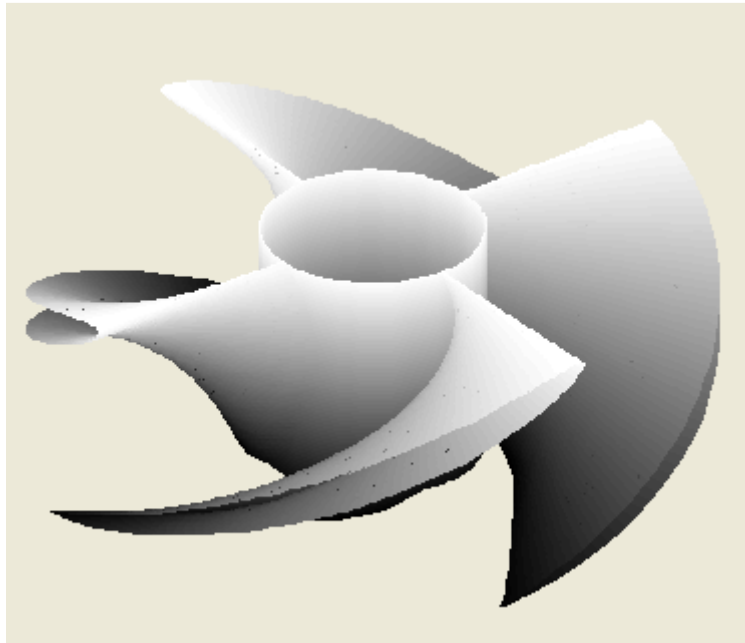


Figura 6 Geometría tridimensional del Rotor de la Turbina Axial calculada

5. CONCLUSIONES

La herramienta computacional desarrollada utiliza como método de cálculo una búsqueda de perfiles hidrodinámicos con el objetivo de maximizar la fuerza que produce par en el rotor de la turbina, minimizar las pérdidas por choque y desprendimiento a la entrada de rotor y optimizar el aprovechamiento de energía hidráulica minimizando velocidades tangenciales a la salida del rotor.

Las variables utilizadas para la optimización de las turbinas son la geometría de los perfiles hidrodinámicos y las velocidades relativas del fluido alrededor de dichos perfiles, estas variables son mostradas por la herramienta en forma de gráficos que permiten analizar y comprobar los diseños propuestos.

Con esta herramienta se han conseguido reducir los tiempos de diseño de los componentes principales de turbinas hidráulicas de flujo axial además de estandarizar los procedimientos de cálculo y fabricación [4].

6. REFERENCIAS

- [1]Orlando Anibal Audisio, Universidad Nacional del Comahue, XI ELPAH - Chile – 2005 - TURBINAS HIDRAULICAS PARA BAJOS SALTOS: DESARROLLO COMPUTACIONAL.
- [2] Mataix Claudio; Turbomáquinas Hidráulicas, ICAI, Madrid, 1975
- [3]Jacobs, Eastman N Ward, Kenneth E Pinkerton, Robert M, The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel, naca-report-460, 1933
- [4] Cotella N. G., Antonelli S. F., Varela P. G., Manelli A. H., Ramoska J. A. Propuestas Para La Reducción De Costos En La Fabricación De Picturbinas Destinadas A Generación Eléctrica Aislada. Hyfusen. Posadas. 2007.