

DISEÑO DE UN ROTOR DE TURBINA HIDROELÉCTRICA CONFORMADA EN MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ REFORZADA CON FIBRAS DE CARBONO

Ing. Oller Aramayo, Sergio A.⁽¹⁾; Dr.Ing. Nallim, Liz G.⁽¹⁾; Dr.Ing. Oller Martínez, Sergio⁽²⁾

⁽¹⁾ **INIQUI – CONICET -Facultad Ingeniería
Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150 Salta – Argentina**

Tel/Fax: +54-3874258615 - E-mail: sergio.oller.aramayo@gmail.com , lnallim@unsa.edu.ar

⁽²⁾ **UPC-CIMNE – Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería
Universidad Politécnica de Cataluña.**

c/ Gran Capitán s/n, Campus Nord (UPC) Barcelona, España

Tel/Fax: +34-934017401 - E-mail: sergio.oller@upc.edu

RESUMEN

El presente trabajo presenta el conformado de un rotor de turbina hidroeléctrica mediante materiales compuestos. Las partes involucradas en el diseño de este rotor están conformadas por una matriz reforzada con fibras y se estudia, su disposición, orientación, secuencia de apilamiento, espesor y número de capas. Conseguido el diseño del material y su aplicación en el rotor, se presenta la modelación numérica de la estructura mediante elementos finitos [1], simulando la presión aplicada sobre los álabes y el comportamiento del rotor frente a dichas acciones (tensiones generadas y límites en el diseño).

El objetivo es lograr un rotor cuya inercia rotacional sea relativamente baja, y así disponga de rápidas reacciones a los cambios al flujo, y más importante aún, pocas pérdidas energéticas en el eje del rotor. Las aplicaciones de este material compuesto optimiza la turbina que actualmente está siendo estudiada por los autores para aplicaciones de paso fluvial sin represas, en donde es muy importante aprovechar al máximo la energía cinética del fluido.

Para la simulación de la respuesta mecánica a través del análisis de las tensiones y resistencias a roturas en la estructura del rotor conformado en material compuesto, se usa una herramienta de cálculo de simulación numérica por elementos finitos ComPack-Aero [2], desarrollado por CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería), en Barcelona (España).

También se analiza el comportamiento del mismo rotor conformado en acero y se comparan los resultados referidos a la rigidez y los estados tensionales del rotor conformado en acero, con las distintas formas de apilamientos de material compuesto. Todo ello permite construir una comparativa de datos para valorar si la elección de un rotor conformado en material compuesto es viable dentro de estas condiciones de trabajo.

Palabras Claves: Turbina, Rotor, Material compuesto, Simulación numérica.

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento hidroeléctrico suele hacerse a partir del concepto de embalsar agua para aumentar su energía potencial y transformarla en eléctrica mediante máquinas tradicionales (turbinas Pelton [3], Francis [4], Kaplan [4], etc). En este trabajo se propone utilizar una turbina de paso axial que permite el aprovechamiento de la energía cinética del cauce fluvial. Concretamente se estudia el emplazamiento de esta turbina en un tramo del cauce del río Pilcomayo (provincia de Salta, Argentina). Las características de este río en la zona de emplazamiento se detallan más adelante.

La energía cinética en los ríos ($V = 2\text{ m/s}$) no es comparable a la energía potencial que genera un salto de agua de 80 metros de altura, la solución propuesta en estas turbinas (en desarrollo en la Tesis doctoral del primer autor) es incrementar la velocidad del flujo mediante compresores axiales solidarios a un rotor de turbina, el cual no es el mismo que el rotor turbinado usado para la generación eléctrica (ver Figura 1).



Figura 1 – Diseño esquemático de la turbina de paso para aprovechamiento energético en cauces fluviales.

En este trabajo se presenta un pre-diseño del rotor, con la finalidad de establecer la viabilidad sobre la utilización de este material compuesto en estas aplicaciones. En trabajos a realizar próximamente se procederá al diseño hidrodinámico detallado, que permitirá obtener las velocidades y presiones en cada punto del interior de los rotores a través del acoplamiento “débil” (unidireccional) entre este programa de elementos finitos, con el cual se analiza el comportamiento estructural, con otro programa de fluido que permita estudiar el fluido en la turbina. Detalles de esto se comentan en el apartado sobre líneas futuras de desarrollo e investigación.

2. CÁLCULO DE PRESIONES SOBRE EL ROTOR DE LA TURBINA

El objetivo de este apartado es obtener en forma simplificada las presiones que actúan sobre el rotor de la turbina como consecuencia de la cinemática del fluido, que permitan analizar su comportamiento y, consecuentemente, la viabilidad de un conformado en material compuesto de matriz reforzado con fibras. Dichas presiones son consecuencia de la oposición, de la estructura del rotor, a la velocidad del fluido (agua en este caso). Dicha presión provoca dos sollicitaciones en el rotor:

-Carga 1: Fuerzas de rotación aplicadas sobre las superficies de los álabes provocadas por la diferencia de presiones entre las superficies superior e inferior del ala (ver Figura 2). Esta reacción se estudiará más adelante, dentro de un capítulo de la tesis doctoral del primer autor dedicado específicamente a la fluido dinámica de la máquina, mediante un código de CFD (Computacional Fluid Dynamics) para obtener la velocidad de rotación, los ángulos de ataque correctos de cruce de álabes, diagramas de presiones sobre las superficies alares, etc.

-Carga 2: Fuerzas provocadas por las presiones aplicadas directamente sobre el borde de ataque del álabe, que provocan la deformación del mismo y que tienden a romper el rotor en dirección perpendicular al plano del rotor. Esta reacción se estudia y analiza en este trabajo mediante el programa de elementos finitos ComPack-Aero [2].

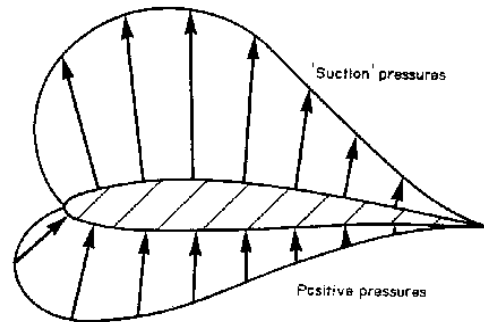


Figura 2 – Distribución simplificada del perfil de presiones de un álabe.

A continuación se presenta la ecuación de Prandtl [5], la cual permite obtener como resultado la velocidad del cauce fluvial a una altura determinada sobre el lecho de un río, en el caso de este ejemplo, se ha adoptado a 1m de altura sobre el fondo del cauce (ver Figura3).



Figura 3 – Distribución simplificada del perfil de velocidades en el lecho del río Pilcomayo (Salta-Argentina).

El río Pilcomayo en la zona de emplazamiento tiene una profundidad del lecho $h = 2.00m$, una pendiente $S_b = 0.002$, una velocidad en superficie $v_{superficie} = 2.1m/s$ y una viscosidad cinemática $\nu = 1.01 \times 10^{-6} m^2/s$.

Considerando la aceleración de la gravedad $g = 9.8m/s^2$, se obtiene la velocidad a una altura $z = 1.00m$ sobre el lecho, donde se emplazará la turbina, mediante la siguiente expresión de Prandtl,

$$v_{lecho} = u_{adimensional} \left[\left(\frac{1}{0.4} \right) \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] = 2.073 \frac{m}{s} \quad (1)$$

$$\text{donde } u_{adimensional} = \sqrt{g \cdot h \cdot S_b}, \quad z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_{adimensional}}$$

Una vez obtenida la velocidad del agua en el cauce a $z = 1.00m$ y con tirante de agua de $h = 2.00m$, se obtiene la presión cinemática existente en esa profundidad mediante la siguiente expresión:

$$p_{lecho} = \rho v_{lecho}^2 = 4.238 \times 10^3 Pa \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del fluido y la velocidad del cauce (v_{lecho}) a una altura $z = 1.00m$ sobre el lecho (ec. (2)). Posteriormente, el flujo pasa por diversos apéndices mecánicos tales como tubos venturi [6], bombas compresoras, etc, donde se producen cambios de presión y cuyo cálculo ajustado a realidad excede al objetivo del trabajo que aquí se presenta. No obstante, y para resolver el pre-diseño del rotor de la turbina Oller Aramayo, Sergio A.; Nallim, Liz Graciela; Oller Martínez Sergio / Diseño de un rotor de turbina hidroeléctrica conformada en materiales compuestos de matriz reforzada con fibras de carbono.

en material compuesto, objeto de este trabajo, se utiliza la presión calculada en la entrada del rotor de la turbina $p_{\text{turbina}} = 1.724 \times 10^5 \text{ Pa}$, luego de superar las sucesivas cámaras de compresión (bomberos axiales) y el efecto Venturi [6] provocados en la máquina. De aquí, se obtiene en forma simplificada una fuerza en la superficie $A_{\text{ataque-alabe}} = 2.325 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ del bordes de ataque de cada álabe de último rotor (turbina), donde la presión es más alta que en los otros rotores de la máquina. De esta manera se obtiene la fuerza F_{Rotor} que actúa sobre el rotor con n_{alabes} y que permite analizar el comportamiento estructural del mismo, tanto se conforme en materiales compuestos como en acero.

$$F_{\text{Rotor}} = p_{\text{turbina}} \cdot (n_{\text{alabes}} \cdot A_{\text{ataque-alabe}}) = 1.162 \times 10^3 \text{ N} \quad (3)$$

3. FORMULACIÓN UTILIZADA PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO.

La regla clásica de mezclas, o la teoría de mezclas, se ocupa de los materiales compuestos utilizando un enfoque fenomenológico basado en la mecánica de medios continuos en la macro-escala. El comportamiento mecánico de los materiales compuestos se obtiene a partir de las ecuaciones constitutivas de sus componentes, siendo posible incluir el comportamiento no-lineal de cada uno de los componentes (elasticidad, daño, plasticidad, etc.). Este enfoque representa una mejora sustancial en comparación con otras formulaciones existentes, desarrolladas para estudiar el comportamiento de los materiales compuestos. Otra ventaja de la teoría de mezclas es que puede utilizar todos los procedimientos existentes para simular materiales continuos para modelar el comportamiento de los componentes de compuestos. La forma clásica de la teoría de mezclas ha sido originalmente desarrollada por Trusdell and Toupin (1960) [7]. Esta considera que en un punto del material compuesto, sus componentes interactúan de acuerdo a las siguientes hipótesis: (i) cada volumen infinitesimal del compuesto contiene un número finito de componentes de material, (ii) la contribución de cada componente al comportamiento global del compuesto es proporcional a su participación volumétrica, (iii) todos los componentes están sometidos a la misma deformación, (iv) el volumen de cada componente es significativamente menor que el volumen compuesto. En el caso de deformaciones pequeñas, la tercera hipótesis se puede escribir como (ver Figura 4):

$$\boldsymbol{\varepsilon} = {}^1\boldsymbol{\varepsilon} = {}^2\boldsymbol{\varepsilon} = \dots = {}^k\boldsymbol{\varepsilon} = \dots = {}^n\boldsymbol{\varepsilon}$$

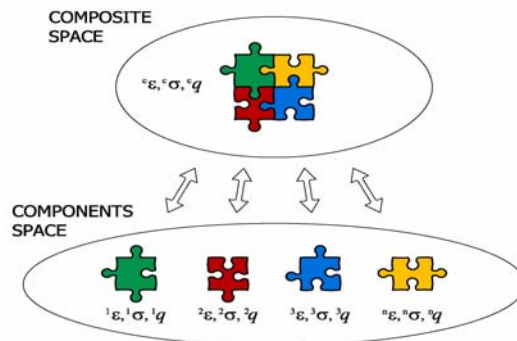


Figura 4 – Teoría de mezclas entendida como un modelo constitutivo implícito, resultante de la interacción de varios modelos constitutivos.

donde, $\boldsymbol{\varepsilon}$ es la deformación del compuesto y ${}^k\boldsymbol{\varepsilon}$ la deformación del $k^{\text{ésimo}}$ componente.

Según la segunda hipótesis y el concepto de aditividad de la densidad de energía interna, la tensión en el compuesto puede ser calculada como la suma proporcional de cada componente, en función de la participación volumétrica de cada componente [8, 9], así:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}^S \boldsymbol{\varepsilon}^e = \sum_{k=1}^n k \cdot {}^k\boldsymbol{\sigma} = \sum_{k=1}^n k \cdot {}^k\mathbf{C}^S \cdot {}^k\boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (4)$$

Siendo ${}^k\mathbf{C}^S$ el tensor constitutivo secante del componente k , cuya participación volumétrica se define como,

$${}^k k = \frac{dV_k}{dV_0}, \quad \text{con} \quad \sum_{k=1}^n k = 1 \quad (5)$$

Para una explicación más detallada, se aconseja consultar las referencias [8] y [9].

4. ANÁLISIS DEL ROTOR DE LA TURBINA.

En este apartado se realiza el análisis de la estructura del rotor de la turbina, mediante la técnica de elementos finitos (programa *ComPack-Aero* [2]). El material compuesto de matriz reforzada con fibras ha sido simulado numéricamente mediante la teoría de mezclas presentada anteriormente, mientras que para el acero se utiliza un modelo constitutivo isótropo. En todo momento se ha tratado de mantener ambos materiales dentro del límite de comportamiento elástico.

4.1. Geometría y condiciones de contorno del rotor

El rotor consta de un anillo interno solidario al eje de la turbina y un anillo externo usado para darle mayor rigidez estructural (ver Figura 5). Los 29 álabes constan de perfil alar con un ángulo de ataque de 0° .

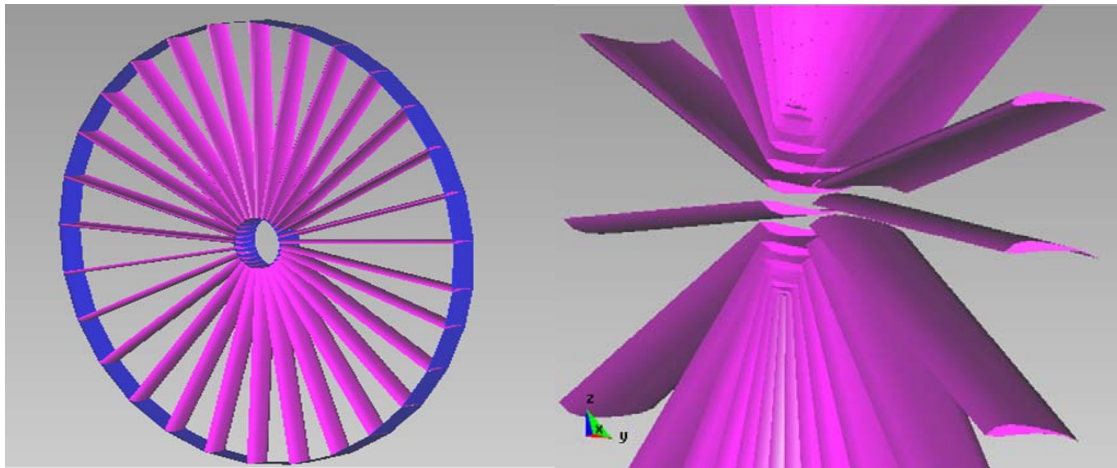


Figura 5 – a) Vista del rotor de la turbina. b) Detalle del perfil alar de los álabes.

En la Figura 6 se muestra las dimensiones del rotor que se han utilizado para la generación de la malla de elementos finitos.

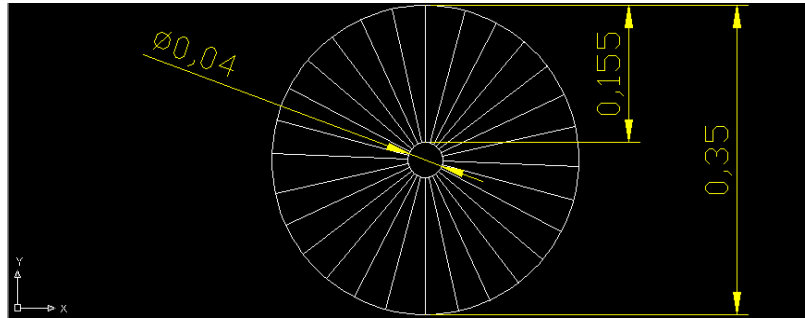


Figura 6 – Dimensiones del rotor, en unidades del sistema internacional SI (m).

A partir de las dimensiones del rotor se genera una malla de 11.680 elementos finitos triangulares de lámina (elementos de lámina libre de rotación [10]), con 5.722 nodos (Figura 7).

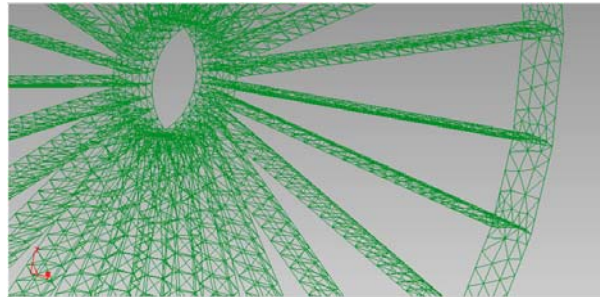


Figura 7 – Parte de la malla de elementos finitos del rotor.

Una vez generada la malla, se aplican las restricciones de movimiento a los nodos correspondientes al anillo interno, esto representa la unión solidaria al eje de la turbina. Asimismo, se aplican sobre todos los bordes de ataque de los 29 álabes la fuerza puntual de 1.162N calculada en el apartado 2. Esta fuerza se divide entre todos los nodos que conforman los bordes de ataque, creando así una carga repartida proporcional que simula la presión hidráulica (ver Figura 8).

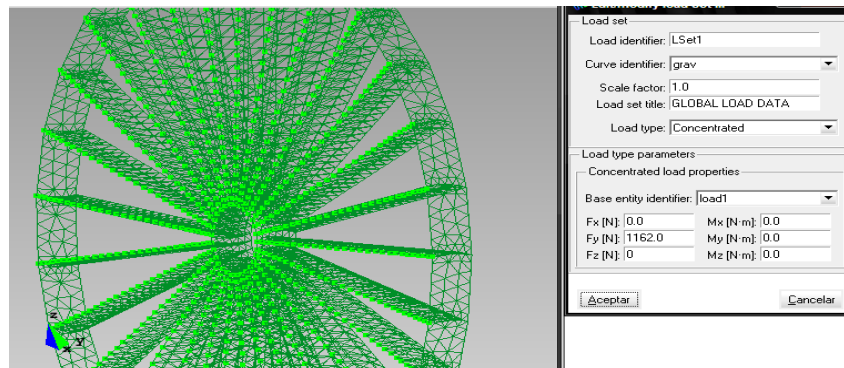


Figura 8 – Aplicación de las cargas en el frente de ataque de los álabes.

Finalizada la descripción geométrica, la generación de la malla de elementos finitos y aplicadas las condiciones de contorno, se procede a la caracterización de los materiales a utilizar. Concretamente, se utilizan dos materiales (uno compuesto y otro en acero), para comparar la respuesta estructural de cada uno de ellos.

A continuación se describen los detalles sobre cada material y los resultados obtenidos.

4.2. Simulación N°1: Material compuesto

En esta simulación el material es un laminado de material compuesto de espesor $t = 1.8mm$. En el caso de los álabes, son láminas que envuelven un alma volumétrica de espuma sin resistencia estructural. Es decir, almas usadas únicamente para copiar las formas y dimensiones correctas del material compuesto, como por ejemplo poliuretano expandido. El material compuesto que se utiliza en esta simulación, se compone a través de la teoría de mezclas previamente citada. Uno de sus componentes es matriz epoxy isotrópica de densidad $\rho = 1200kg/m^3$, y módulo elástico $E = 4.0 \times 10^9 Pa$, con un coeficiente de Poisson $\nu = 0.353$. El material de refuerzo es fibra de carbono, cuyas características son densidad $\rho = 1800kg/m^3$, módulo de elasticidad $E = 242.1 \times 10^9 Pa$ y coeficiente de Poisson $\nu = 0.22$. Con estos dos componentes se conforma un apilado de 6 capas de $e = 0.30mm$ de espesor, con fibra orientadas $\pm 45^\circ$. Las propiedades de conjunto del compuesto obtenido resultan en forma implícita a través de la utilización de la teoría de mezclas. Con respecto a la duración temporal de la simulación, se aplica la carga durante 0,1s con una curva Fuerza vs. tiempo casi instantánea (Figura 9), es decir que con $t = 1 \times 10^{-5} s$. se dispone del 100% de la carga aplicada sobre el rotor.

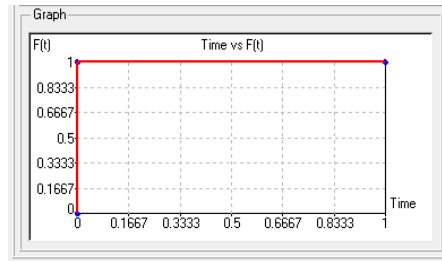


Figura 9 – Curva carga Vs. Tiempo.

En cuanto a los resultados de la simulación se puede observar que el máximo desplazamiento se consigue en el anillo externo con valores máximos de $3.6 \times 10^{-4} m$ ($0.36 mm$) a 0.1s después de la aplicación de la carga (Figura 10).

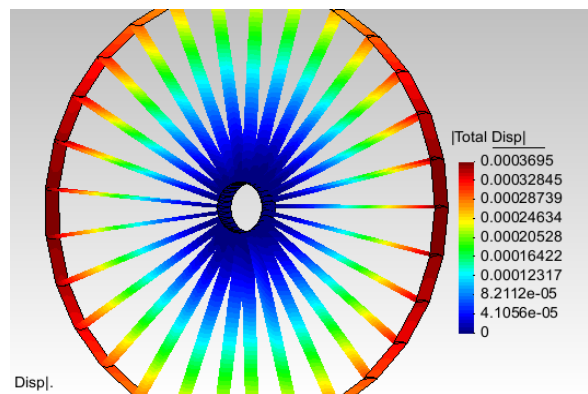


Figura 10 – Desplazamientos de los puntos del rotor de Material Compuesto

Otro resultado que interesa conocer incumbe al estado tensional de la pieza, y para el caso del material compuesto se alcanzan tensiones de $\sigma = 24077 \text{ Pa}$ (Figura 11) en los bordes de ataque pertenecientes a los álabes y situados en la cercanía del anillo solidario al eje . (Figura 12).

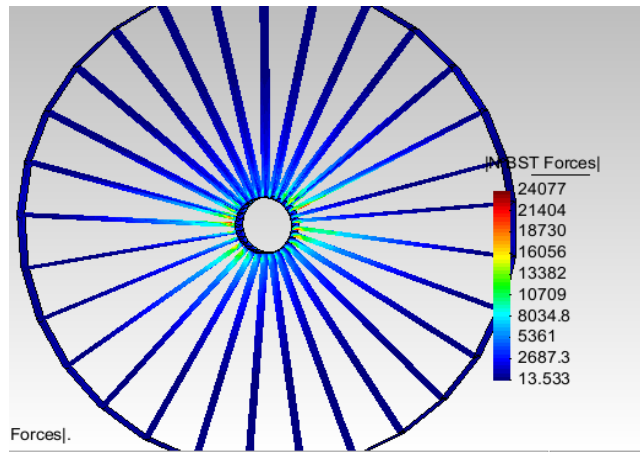


Figura 11 – Magnitud de tensiones del rotor de Material Compuesto

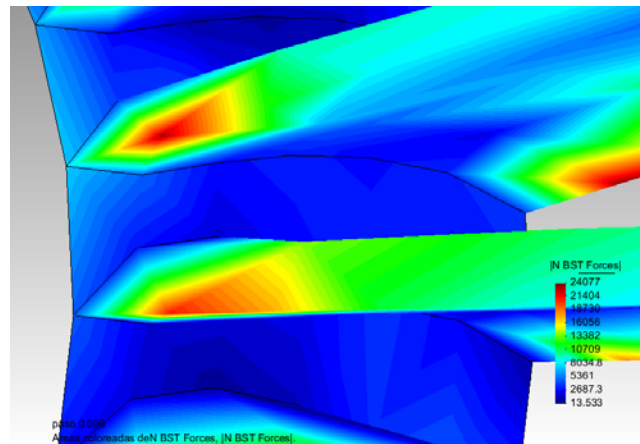


Figura 12 – Detalle de las concentraciones de tensiones del rotor de Material Compuesto

4.3. Simulación nº2: Acero

En esta simulación el material se compone de una lámina de acero de espesor $e = 1.2 \text{ mm}$, sin almas volumétricas con resistencias adicionales. Las características mecánicas de este material isotrópico son densidad $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, módulo de elasticidad $E = 210.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ y coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$. Se utiliza este material tanto en los álabes como en los anillos. Con respecto a los parámetros temporales, se utilizan las mismas curvas que en el apartado 4.2

En cuanto a los resultados de la simulación se puede observar que el máximo desplazamiento se consigue en el anillo externo con valores máximos de $6.5 \times 10^{-5} \text{ m}$ (0.06 mm) a 0.1s después de la aplicación de la carga (Figura 13).

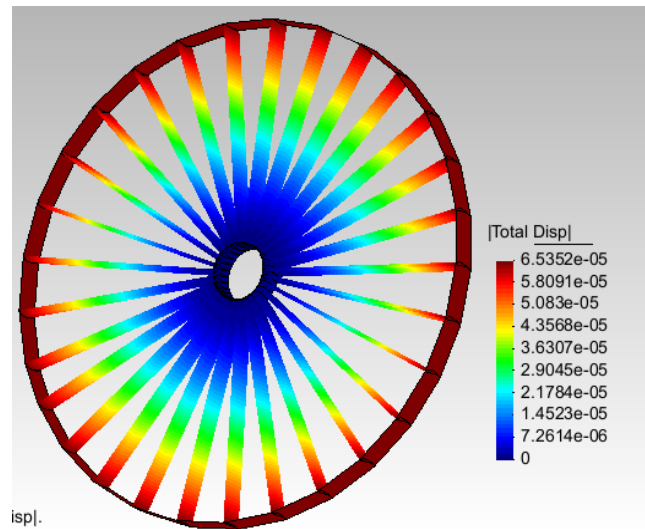


Figura 13 – Desplazamientos de los puntos del rotor de Acero

Otro resultado que interesa conocer, incumbe al estado tensional de la pieza. Para el caso del acero se alcanzan tensiones $\sigma = 28523$ Pa (Figura 14) en los bordes de ataque pertenecientes a los álabes y situados en la cercanía del anillo solidario al eje (Figura 15).

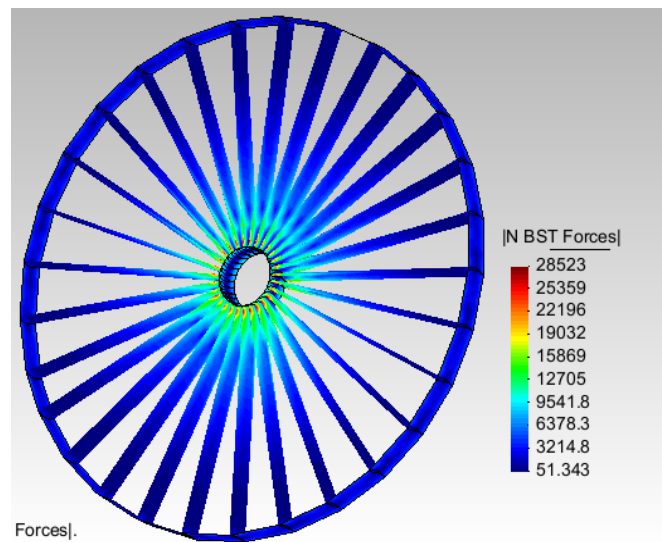


Figura 14 – Magnitud de tensiones del rotor de Acero

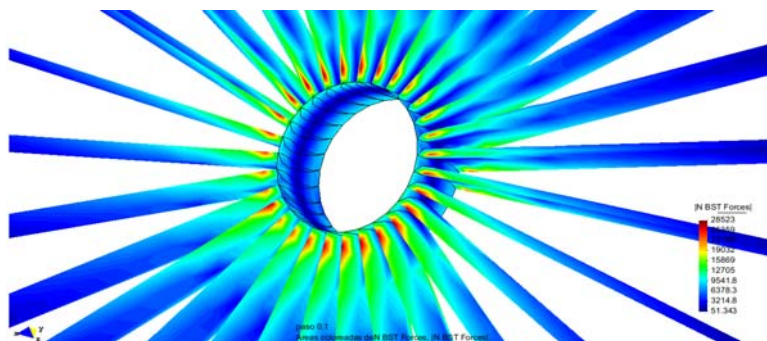


Figura 15 – Detalle de las concentraciones de tensiones del rotor de Acero

5. INERCIAS

Oller Aramayo, Sergio A.; Nallim, Liz Graciela; Oller Martínez Sergio / Diseño de un rotor de turbina hidroeléctrica conformada en materiales compuestos de matriz reforzada con fibras de carbono.

Uno de los principales objetivos que se espera lograr en el rotor aquí estudiado, es mejorar el rendimiento de la turbina axial propuesta por los autores (ver Figura1), y ello se consigue disminuyendo en forma notable la inercia del rotor y por consiguiente el par que necesita para poder arrancar. Cabe aclarar que la inercia es la propiedad de los cuerpos de resistirse al cambio del movimiento, es decir, es la resistencia al efecto de una fuerza que se ejerce sobre ellos. El descenso en la inercia es posible gracias a la utilización del material compuesto, en este caso una matriz reforzada con fibras de carbono.

La fibra de carbono de 1.8 mm de espesor se compone de una matriz con densidad $\rho_{matriz} = 1200 \text{ kg/m}^3$ en este caso con una proporción del 60%, y un 40% de fibra con densidad $\rho_{fibra} = 1800 \text{ kg/m}^3$. Considerando la teoría de mezclas presentada en el Apartado 3 (ecuaciones 8 y 9), se obtiene la densidad del compuesto $\rho_{FibraDeCarbono} = 1440 \text{ kg/m}^3$. Teniendo en cuenta dicha densidad y el volumen del rotor de compuesto $V_{RotorCarbono} = 4.991 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, se obtiene la masa del rotor $m_{RotorCarbono} = 0.719 \text{ Kg}$, de donde resulta una inercia rotacional de $I_{RotorCarbono} = 0.022 \text{ Kg m}^2$. Con esta inercia se obtiene que el par necesario para el arranque o puesta en marcha es de $Par_{ArranqueRotorCarbono} = 100.7 \text{ N m}$.

Para el caso del rotor de acero de 1.2 mm de espesor, los cálculos son análogos y teniendo en cuenta una densidad de acero de $\rho_{acero} = 7850 \text{ kg/m}^3$ y un volumen de $V_{acero} = 3.327 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, se obtiene una masa de $m_{RotorAcero} = 2.612 \text{ Kg}$, una inercia de $I_{RotorAcero} = 0.08 \text{ Kg m}^2$. De esto resulta un par de arranque o puesta en funcionamiento $Par_{ArranqueRotorCarbono} = 365.9 \text{ N m}$, es decir 3,63 veces mayor que el par de arranque que necesita el rotor construido con material compuesto.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realiza un análisis estructural del pre-diseño del rotor de una turbina. Se comparan los resultados obtenidos con la utilización de material compuesto y también con acero. De esto resulta que el material compuesto constituye una opción muy válida, pues en cuanto a resistencia, trabaja a tensiones más bajas (4446 Pa menos) y rigidez un poco menor manteniendo valores del orden del acero, pero tiene la gran ventaja que la inercia rotacional del rotor de compuesto es 3.6 veces más baja que la del acero, haciendo posible una máquina con mejores rendimientos, mayor facilidad de arranque a bajas velocidades de flujo y más ligera para su manipulación (reparaciones, mantenimientos, transportes, etc.).

7. LINEAS FURTURAS

El trabajo aquí presentado, corresponde a una de las partes de una investigación más amplia, más concretamente los desarrollos que se están llevando a cabo en la tesis doctoral del Ing. Sergio A. Oller Aramayo, en la cual se simulará la fluido-dinámica, mediante CFD (Computational Fluid Dynamics), del rotor de turbina aquí expuesta. De esta forma, se realizará un estudio acoplado débil unidireccional (fluido-sólido), mediante un procedimiento en "stagger" entre la simulación mediante CFD del diagrama de presiones fluido-dinámicas en las superficies alares de los álabes y el proceso mecánico de comportamiento de la turbina simulado mediante un código de elementos finitos. Así, se analizará el comportamiento fluido-dinámico y luego se introducirá mediante el "stagger", a través de una comunicación informática de datos entre los dos Oller Aramayo, Sergio A.; Nallim, Liz Graciela; Oller Martínez Sergio / Diseño de un rotor de turbina hidroeléctrica conformada en materiales compuestos de matriz reforzada con fibras de carbono.

códigos, todas las presiones nodales alares en el código mecánico para el mismo instante de tiempo Δt . De esta forma se conseguirá una simulación completa entre dos campos distintos: la fluido-dinámica, simulada mediante el código *Fluent* (CFD) [11], y el campo estructural, cuyo comportamiento se analiza mediante el código de elementos finitos *ComPack-Aero*.

7. REFERENCIAS

- [1] Zienkiewicz, O. C., Taylor, L.R., *The finite element method*, McGraw-Hill, London, England 1991
- [2] CIMNE and Quantech. *ComPack-Aero*. Innovative finite element methods for non linear analysis of composite structures, Explicit finite element, code developed by CIMNE & Quantech ATZ. www.cimne.com; www.quantech.es/QuantechATZ/Stampack.html. 2008
- [3] Agar,D., Rasi,M., *On the use of a laboratory-scale Pelton wheel water turbine in renewable energy education*. *Renewable Energy* 33 (2008) 1517–1522
- [4] Kumar, Pardeep., Saini, R.P., *Study of cavitation in hydro turbines—A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 374–383
- [5] Raquel Durana Moitaa, Henrique A. Matosa, Cristina Fernandes, Clemente Pedro Nunesa, Mário Jorge Pinhob. *Dynamic modelling and simulation of a heated brine spray system*. *Computers and Chemical Engineering* 33 (2009) 1323–1335
- [6] D. Giddings, B.J. Azzopardi, A. Aroussi, S.J. Pickering. *Absolute measurement of pneumatically conveyed powder using a single long throat venturi*. *Powder Technology* 172 (2007) 149–156
- [7] Trusdell C., Toupín, R. *The classical field theories, Handbuch der physic iii/l*, Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany 1960
- [8] Car, E., Oller, S., Oñate, E. *An anisotropic elasto-plastic constitutive model for large strain analysis of fiber reinforced composite materials*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.185, No 2-4, pp. 245-277. (2000)
- [9] Car, E., Oller S., Oñate, E. *A Large Strain Plasticity for Anisotropic Materials – Composite Material Application*, *International Journal of Plasticity*, Vol. 17, No. 11, pp. 1437-1463. (2001)
- [10] Flores F., Oñate E. *A rotation-free shell triangle for the analysis of kinked and branching shells*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 69 Issue 7, Pages 1521 - 1551. Feb. 2007.
- [11] ANSYS.Inc. *FLUENT, Computational Fluid Dynamics* <http://www.fluent.es/>

Agradecimientos

Los autores agradecen a las siguientes instituciones, por el soporte económico obtenido para esta investigación: Proyecto AECID (A/024063/09), España; Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), España; Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), España; Aula-CIMNE de la Universidad Nacional de Salta, Argentina; Consejo Nacional de Investigación Científica y Técnica (CONICET) de Argentina y al Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa), Argentina.