

ESTUDIO DEL MODELAMIENTO MATEMATICO DE UN ALABE PARA UNA
TURBINA DE FLUJO BIDIRECCIONAL

PAOLA GONZALEZ RAMOS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA MECATRONICA

BOGOTA D. C.

2010

ESTUDIO DEL MODELAMIENTO MATEMATICO DE UN ALABE PARA UNA
TURBINA DE FLUJO BIDIRECCIONAL

PAOLA GONZALEZ RAMOS

Proyecto de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecatronico

Asesor

ING. Jorge Aponte

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA MECATRONICA

BOGOTA D. C.

2010

Nota de Aceptación

Por medio de la presente me permito poner en consideración el proyecto de grado titulado: "MODELAMIENTO MATEMATICO DE UN ALABE PARA UNA TURBINA DE FLUJO BIDIRECCIONAL" como requisito de grado a Paola González Ramos del programa de Pregrado en Ingeniería Mecatronica.

Ing. Jorge Aponte

Bogotá D. C., Enero de 2010

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|-------------------------------------|------|
| LISTA DE TABLAS | i |
| LISTA DE FIGURAS | ii |
| LISTA DE ANEXOS | iii |
| NOMENCLATURA | 1 |
| INTRODUCCION | 2 |
| 1. OBJETIVOS | 5 |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL | 5 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS | 5 |
| 2. MARCO TEORICO | 6 |
| 2.1. COLUMNA DE AGUA OSCILANTE | 6 |
| 2.2. TURINAS WELL | 6 |
| 3. DESARROLLO MATEMATICO | 8 |
| 4. ALGORITMO DEL SOFTWARE | 14 |
| 5. VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO | 19 |
| 6. CONSTRUCCIÓN | 22 |
| 7. CONCLUSIONES | 23 |
| 8. RECOMENDACIONES | 24 |
| BIBLIOGRAFIA | 25 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1 Coeficientes de sustentación y arrastre | 20 |
| Tabla 2 NACA 0021, #Pts=71, Re=12178.69 | 27 |
| Tabla 3 NACA 0022, #Pts=71, Re=12178.69 | 27 |
| Tabla 4 NACA 0023, #Pts=71, Re=12178.69 | 28 |
| Tabla 5 NACA 0024, #Pts=71, Re=12178.69 | 28 |
| Tabla 6 NACA 0025, #Pts=71, Re=12178.69 | 29 |
| Tabla 7 NACA 0026, #Pts=71, Re=12178.69 | 29 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Distribución de la energía media de las ondas en Kw/m[12] | 3 |
| Figura 2. Instalación de columna oscilante[16] | 6 |
| Figura 3. Diagrama de velocidad ideal en la. Turbina Well [15] | 8 |
| Figura 4. Diagrama de velocidad real en la. Turbina Well [15]. | 8 |
| Figura 5. Relación de ángulos entre el diagrama de velocidades y el diagrama de fuerzas sobre el perfil de un álabe[15]. | 9 |
| Figura 6. Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil de un álabe [15] | 10 |
| Figura 7. Diagrama de flujo con el algoritmo Implementado | 15 |
| Figura 8. Interfaz Gráfica del Software | 19 |
| Figura 9. Modelo de Sistema | 20 |
| Figura 10. Resultado de la Simulación del Sistema | 21 |
| Figura 11. Piezas diseñadas | 22 |
| Figura 12. Unión de las piezas | 22 |
| Figura 13. Grafica del comportamiento de los coeficientes de sustentación y arrastre de los perfiles NACA | 30 |
| Figura 14. Características del perfil NACA seleccionado | 31 |
| Figura 1. Poster publicado en la Universidad Militar Nueva Granada en el IV Encuentro de Investigaciones | 36 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|-----------------------|------|
| ANEXO 1 Tablas | 27 |
| ANEXO 2 Tablas | 28 |
| ANEXO 3 Tablas | 29 |
| ANEXO 4 Figura | 30 |
| ANEXO 5 Figura | 31 |
| ANEXO 6 Ficha tecnica | 32 |
| ANEXO 7 Plano | 33 |
| ANEXO 8 Plano | 34 |
| ANEXO 9 Plano | 35 |
| ANEXO 10 Poster | 36 |
| ANEXO 11 Articulo | 37 |

NOMENCLATURA

| | |
|---|---|
| B: Número de Aspas | u: Velocidad de la corriente de aire |
| c: Longitud de cuerda | u_t : Velocidad inducida |
| C_L : Coeficiente de sustentación | v_{efec} : Velocidad efectiva |
| C_D : Coeficiente de arrastre | v_{geo} : Velocidad geométrica |
| D: Fuerza de arrastre | W: Potencia |
| F_x : Componente de fuerza axial | ΔP_o : caída de presión |
| F_T : Componente de fuerza tangencial | ΔP_o^* : coeficiente de presión |
| h: Envergadura | α : Angulo de ataque |
| L: Fuerza de sustentación | φ : Angulo de velocidad geométrica |
| P: Presión | φ_o : Angulo de velocidad efectiva |
| Q: Caudal | η : Eficiencia |
| Re: Reynolds | ρ : Densidad del aire |
| re: Radio externo | σ : Solidez de la turbina |
| ri: Radio interno | Ω : Velocidad rotacional angular |
| T*: coeficiente de par | Ωr : Velocidad rotacional angular X radio externo |
| T: Torque | v: Viscosidad cinemática del fluido |
| U*: coeficiente de flujo | |

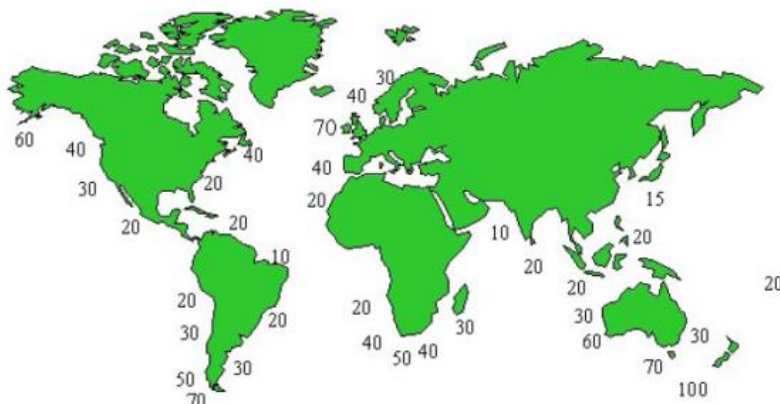
INTRODUCCION

En busca de combustible, el hombre ha empleado durante décadas recursos no renovables como el petróleo, causando daños devastadores al medio ambiente[1], es por ello que la mayoría de empresas y entidades gubernamentales responsables de la producción energética en nuestro país y en el mundo se han interesado en la búsqueda de energías limpias y renovables, siendo estas la respuesta racional a los futuros problemas de abastecimiento energético[2].

El recurso fotovoltaico, eólico, hidráulico, solar térmico y los biocombustibles, entre otros, son las fuentes de energía alternativa más estudiados actualmente.[1] El recurso mareomotriz, es un área que ha sido estudiada, por la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), determinando que actualmente existen 1004 patentes, desde el año 2000 al 2007, entre las que se destaca: Intallation and method for harnessing wave energy using gyroscope, consistiendo ésta en una instalación para el aprovechamiento de la energía de las olas del mar[3], como este sistema existen muchos que mediante diferentes tecnologías convierte este recurso en energía útil, con las mismas características de corriente voltaje y potencial que actualmente se utilizan[4].

Sin embargo para el aprovechamiento de dicha energía se requiere el uso de un dispositivo fundamental como es la turbina que permita la conversión del viento generado por el movimiento de las olas del mar a energía mecánica, que será traducida finalmente a energía eléctrica. La turbina comúnmente utilizada para dicha aplicación son las turbinas Well, quienes fueron inventadas en 1976 [5-9], esta permite el accionamiento en un solo sentido de giro sin importar, que la ola ascienda o descienda. Para la explotación óptima de este mecanismo se requiere la implementación de una columna oscilante de agua [10-13], resaltando que ella se deben instalar en zonas costeras que registren los valores mayores de energía, en la figura 1, se muestra la distribución de la energía media de las ondas en Kw/m, en donde se aprecia el gran potencial de este recurso.

Figura 2. Distribución de la energía media de las ondas en Kw/m[12]



Actualmente algunos países como Escocia han operado una OWC experimental de 75 kV en la costa de la isla de Islay durante 11 años, que ahora ha sido reemplazada por un modelo de 500 kV, llamado Limpet, frente a las olas que vienen a romperse en las rocas desde 5.000 kilómetros del Atlántico. El mismo grupo de investigadores está planeando un dispositivo de alta mar de 2 MV llamado Osprey. Otro modelo escocés, Pelamis, consiste en una serie de cilindros conectados por juntas con bisagras y motores hidráulicos que impulsan los generadores, Portugal ha estado trabajando durante varios años en una OWC en la isla de Pico en las Azores. Los neerlandeses han inventado el llamado Columpio de Olas Arquímedes (Archimedes Wave Swing), un “flotador” lleno de aire que se balancea en las olas mientras su “planta baja” está fija en el lecho marino. Una empresa norteamericana está trabajando en un sistema de 10 MV basado en boyas instaladas a 3 kilómetros fuera de la costa sur de Australia. India, China, Suecia y Japón se cuentan entre otros países en los cuales la energía de las olas está floreciendo [14].

La mayoría de estas instalaciones son a pequeña escala, sin embargo debido al alto costo, no han sido implementadas a gran escala, desaprovechando el potencial energético.

Por esta razón el grupo de investigación Volta, del programa de Ingeniería Mecatronica de la Universidad Militar “Nueva Granada”, ha estudiado un modelo matemático que permita aprovechar dicho recurso, mejorado el perfil de los alabes para una turbina de flujo bidireccional, en condiciones establecidas de acuerdo a las zonas donde se ubique el sistema. Para abordar el problema, se inicia con una revisión bibliográfica, se planteó el modelo matemático del comportamientos de las fuerzas que actúan sobre los alabes, esta etapa se implemento un software que calcula los parámetros fundamentales del comportamiento aerodinámico de la turbina, el ángulo de ataque, el numero de Reynolds y el rendimiento aerodinámico a partir de parámetros como diámetros, velocidades, entre otros, facilitando así la selección del perfil para la turbinas en condiciones específicas, una vez obtenidos estos parámetros, éste se diseño en SolidWorks, y posteriormente se simuló en FlowSolid, visualizando condiciones de presión y velocidad sobre la turbina, para finalmente validar el modelo matemático planteado anteriormente.

1. OBJETIVOS

1.1.OBJETIVO GENERAL

Obtener un modelo matemático para el diseño de alabes para turbinas de flujo bidireccional.

1.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1.2.1. Estudiar los modelos existentes para modelamiento de turbinas y seleccionar el que más se ajuste.
- 1.2.2. Proponer un modelo matemático para el diseño de alabes para turbinas de flujo bidireccional.
- 1.2.3. Elaborar el diseño de un alabe
- 1.2.4. Validar el diseño utilizado un método experimental o una simulación con herramienta CFD.

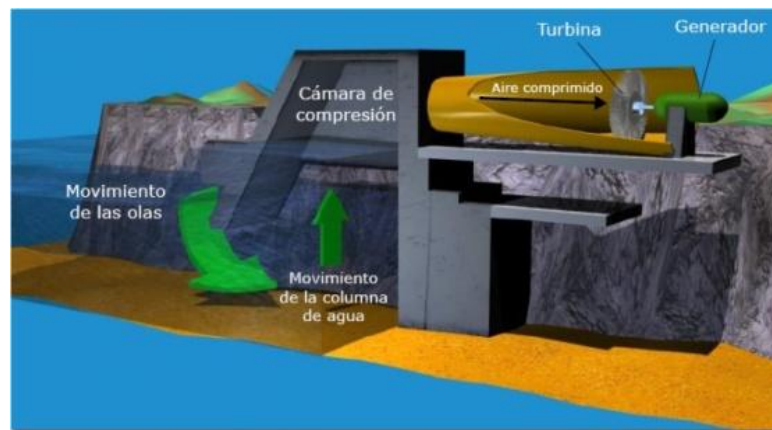
2. MARCO TEORICO

2.1. COLUMNA DE AGUA OSCILANTE

Este sistema hace parte de una estructura metálica o en concreto parcialmente sumergida en el océano, abierta debajo de la superficie del agua oceánica conteniendo una columna de agua. El aire es atrapado sobre la superficie de la columna de agua. Las olas entran y salen del colector debido al movimiento natural ocasionado por el viento, la columna de agua se mueve hacia arriba y hacia abajo de modo oscilatorio, actuando así como un pistón que mueve el aire adelante y atrás[15].

En la figura 2 se detalla el esquema completo de una instalación de columna oscilante, en donde el aire es acanalado hacia una turbina Wells que es forzada a girar. Esta turbina esta a su vez acoplada a un generador.

Figura 3. Instalación de columna oscilante[16]



2.2. TURINAS WELL

La Turbina Wells fue diseñada por Alan A. Wells, en conjunto con un proyecto de investigación llevado a cabo por la Universidad de Queens. Su principal objetivo era desarrollar una turbina que permitiera flujo bidireccional, mientras ésta giraba en una sola dirección[17], innovando así en el diseño del aspa, caracterizándose particularmente por su simetría con respecto al eje horizontal, es por ello que este tipo de turbinas utilizan perfiles NACA 00XX.[15, 18, 19].

Su principal característica es que utiliza la fuerza de sustentación y arrastre para conseguir su propio movimiento unidireccional. Entre más delgado sea un perfil aerodinámico su relación sustentación arrastre aumenta para un determinado número de Reynolds,[18] considerando la dirección de giro de las aspas única, oscilante dependiendo del flujo de aire y por lo tanto no requiere de un sistema de válvulas de retención[17].

3. DESARROLLO MATEMATICO

Para el estudio aerodinámico del alabe con geometría simétrica se debe conocer las características del medio como la variación de presión en función de la velocidad del aire, ya que a partir de estos constantes cambios, el rendimiento de la turbina varia. La generación del momento en el rotor de la turbina implica un cambio en la dirección de la corriente de aire[15], lo que provoca un componente de energía rotacional, denominada también como velocidad inducida (U_t), la cual tiene un efecto aerodinámico en la turbina.

Figura 4. Diagrama de velocidad ideal en la. Turbina Well [15]

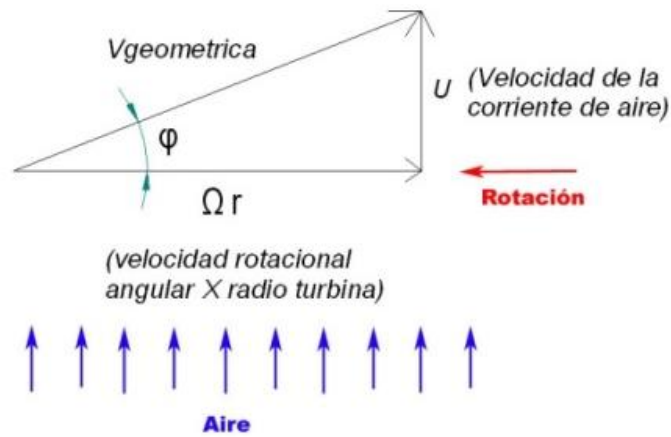
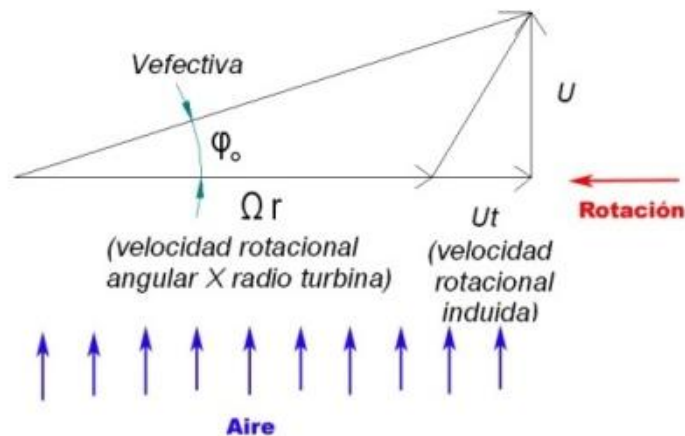
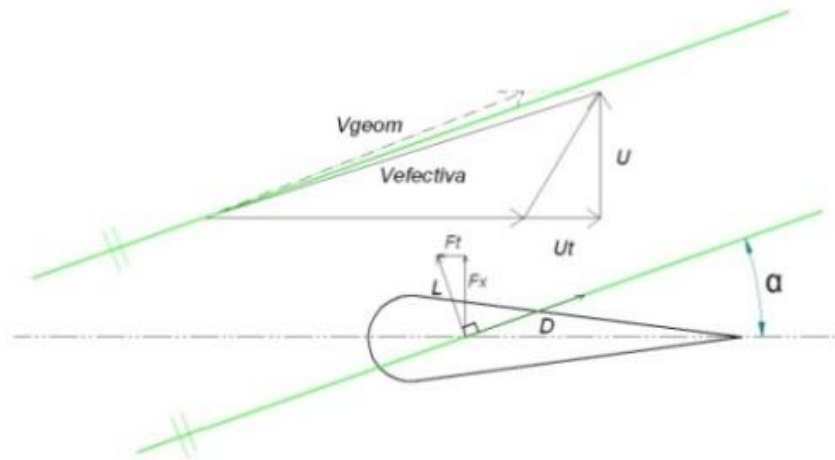


Figura 5. Diagrama de velocidad real en la. Turbina Well [15].



El ángulo de ataque α , está formado entre la cuerda geométrica del ala y la dirección de la velocidad de la corriente de aire, es el mismo que el formado por la bisectriz del ángulo de la velocidad efectiva V_{EFEC} y la velocidad geométrica V_{GEO} . [15]

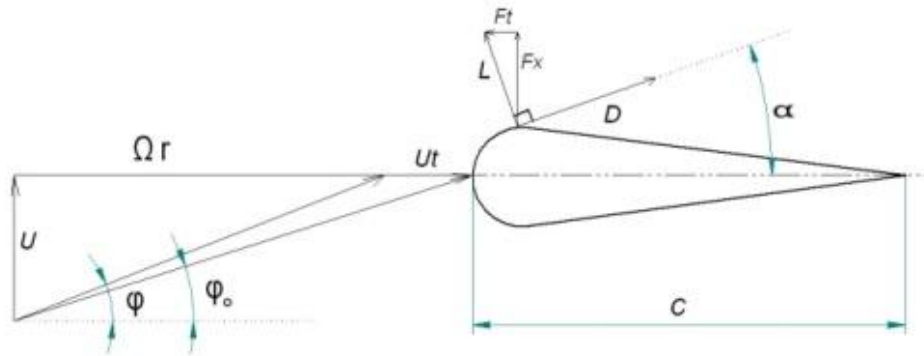
Figura 6. Relación de ángulos entre el diagrama de velocidades y el diagrama de fuerzas sobre el perfil de un álabe [15].



Teniendo la velocidad angular del rotor, se puede calcular la velocidad relativa sobre un aspa, esta velocidad genera las fuerzas sobre el perfil conocidas como la fuerza de sustentación (Lift) L y la fuerza de arrastre (Drag) D , que se pueden expresar como:

- Axial (F_x), la cual cambia el sentido en función del flujo del aire que circula. (ecuación 1).
- Tangencial (F_t), que permite el movimiento rotacional del disco de la turbina (ecuación 2).

Figura 7. Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil de un álabe [15]



En este caso particular el perfil es simétrico sin importar que el valor del ángulo de ataque sea negativo o positivo producirá un giro en una única dirección.

$$F_x = l \cos \alpha + d \operatorname{sen} \alpha \quad (1)$$

$$F_t = l \operatorname{sen} \alpha - d \cos \alpha \quad (2)$$

La condición de diseño que mejora la fuerza aerodinámica sobre el elemento de aspa y expresado como fuerza de sustentación y arrastre será entonces:

$$l = \frac{1}{2} * \rho * v_{efec}^2 * c * cl * h \quad (3)$$

$$d = \frac{1}{2} * \rho * v_{efec}^2 * c * cd * h \quad (4)$$

Los coeficientes \$C_D\$ y \$C_L\$ dependen del perfil del alabe y del número de Reynolds, de forma que el flujo sea laminar de baja resistencia aerodinámica. Se debe escoger un perfil NACA 00xx, con un ángulo de ataque comprendido entre \$7^\circ\$ y \$13^\circ\$, para que la corriente de aire forme una fuerza \$F_T\$ suficiente para generar el movimiento rotacional de la turbina [15].

Para calcular el coeficiente de arrastre mediante gráficas, tablas o software, se determina el ángulo de ataque ya que el coeficiente depende de este.

Considerando las componentes que ejerce la sustentación sobre la fuerza horizontal F_T y la ecuación de la energía:

$$(P_1 - P_2) = \rho U \cdot U_t \cot \varphi_o \quad (5)$$

Se determina el ángulo de la velocidad efectiva (φ_o) respecto al plano de rotación de la turbina. Este es el primer parámetro para determinar la mejor geometría del aspa de la turbina [18, 19, 21].

$$\cot \varphi_o = \frac{\Omega r + U_t}{U} \quad (6)$$

Para un buen diseño de turbina se considera que la caída de presión a través de esta sea constante para cada elemento de aspa. Asegurando esta condición se obtiene la ecuación 7, que determina la velocidad inducida (U) para cada posición radial:

$$U_T = \frac{P_1 - P_2}{2\rho \cdot \Omega \cdot r} \quad (7)$$

A continuación se desarrolló el análisis adimensional que caracteriza el funcionamiento de la turbina a partir de los datos obtenidos por un prototipo de dimensiones reales.

Se pueden determinar varios grupos como en función de la densidad del fluido (ρ), viscosidad cinemática del fluido (ν), la velocidad axial del aire (U), el radio de la turbina (R), la caída de presión (ΔP_o), la velocidad angular (Ω) y el Momento (T).

Los números obtenidos son conocidos como coeficiente de flujo (U^*), coeficiente de presión (ΔP_o^*), coeficiente de par (T^*) y el número de Reynolds (Re).

$$U^* = \frac{U}{\Omega \cdot R} \quad (8)$$

$$\Delta P_o^* = \frac{\Delta P_o}{\rho \cdot \Omega^2 \cdot R^2} \quad (9)$$

$$T^* = \frac{T}{\rho \cdot \Omega^2 \cdot R^5} \quad (10)$$

$$Re = \frac{(\sqrt{(\Omega R)^2 + U^2}) \cdot c}{\nu} \quad (11)$$

Existe un número adimensional adicional el cual determina la geometría de la turbina Wells. Este es conocido como la solidez (σ), la cual es definida como la relación entre el área ocupada por las aspas y el área total descrita por la turbina.[21]. Para el caso de la turbina Wells la solidez es representada a través de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{B \cdot c}{\pi \cdot R \cdot (1 + h)} \quad (12)$$

La solidez determina igualmente el comportamiento de arranque de la turbina. Para valores bajos de solidez, la turbina es incapaz de acelerar a la velocidad final de operación cuando parte desde el reposo. Este fenómeno es conocido como (crawling) y es evitado garantizando un valor mínimo de solidez de 0,6 [6]. Este valor de solidez se refleja en un diámetro de cubo grande en comparación con el diámetro de la turbina

$$\sigma = \frac{re}{ri} \quad (13)$$

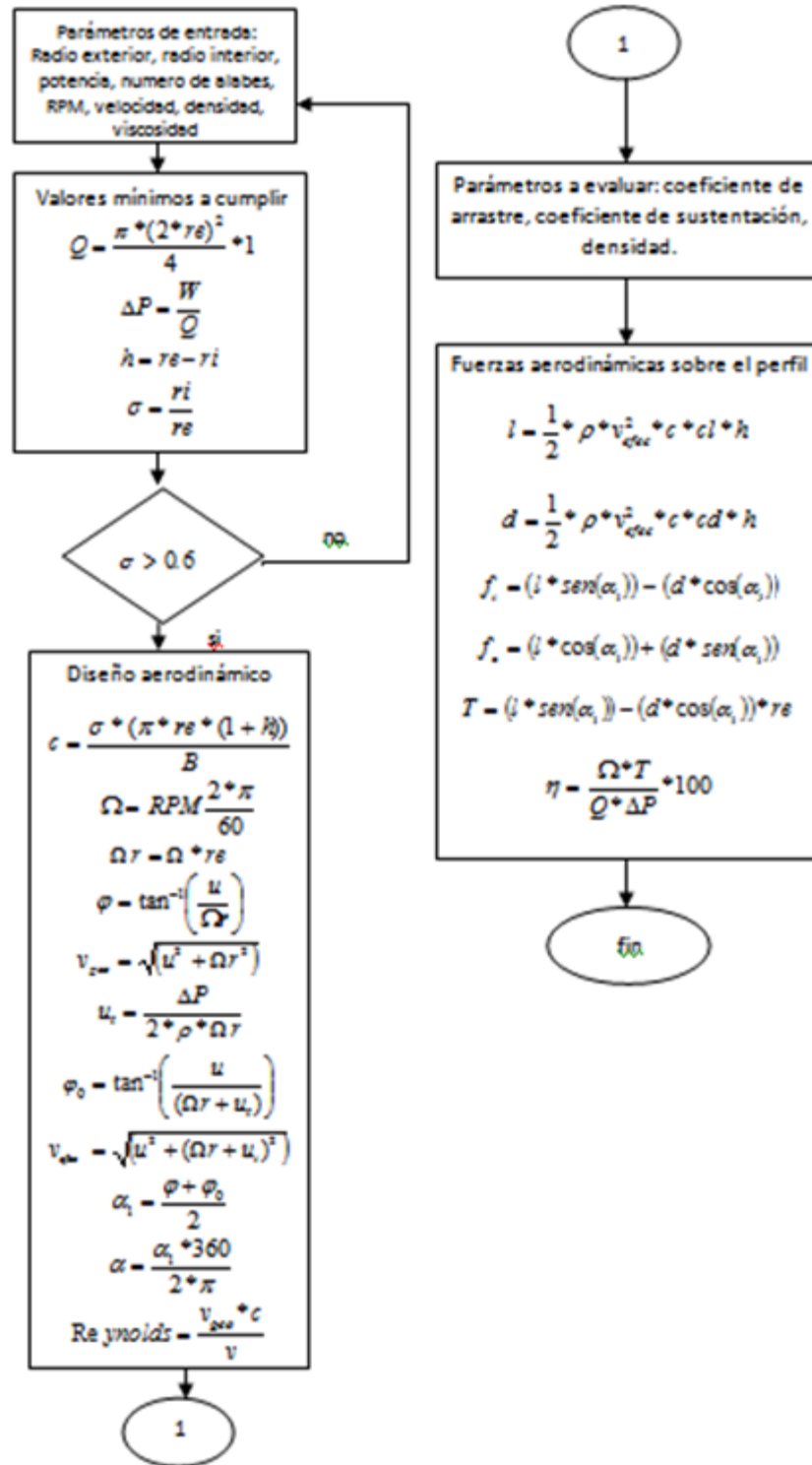
Por último la eficiencia de la turbina puede ser determinada a través de la relación entre la potencia extraída y la energía neumática disponible.

$$\eta = \frac{\Omega \cdot T}{Q \cdot \Delta P} \quad (14)$$

4. ALGORITMO DEL SOFTWARE

Con el fin de agilizar la selección de alabes para una turbina de flujo bidireccional se desarrollo un software programado en Builder C++ (figura 10) el cual a través de los parámetros de entrada, característicos del banco de pruebas y de las condiciones a las que se someterá, determina NACA apropiado. Este perfil tendrá una denominación inicial de 00xx, ya que se seleccionó un perfil simétrico y xx representa el largo de la cuerda en porcentaje de la envergadura. Para determinar el perfil adecuado se implementó el algoritmo matemático del diseño aerodinámico en base al ángulo de ataque y el número de Reynolds. De esta forma el software se divide en dos partes, la primera desarrolla el diseño aerodinámico, mediante los datos de entrada y las ecuaciones correspondientes al modelo matemático hallando así los valores del ángulo de ataque y el numero de Reynolds, de los cuales dependen los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente. La segunda parte denominada fuerzas aerodinámicas sobre el perfil, se ocupa de calcular el rendimiento de la turbina basado en los coeficientes de arrastre y sustentación determinados mediante tabla.

Figura 8. Diagrama de flujo con el algoritmo Implementado



El algoritmo (fig. 7) de este software es el siguiente iniciando con el diseño aerodinámico.

Primero se calculo el caudal.

$$Q = \frac{\pi * (2 * re)^2}{4} * 1 \quad (15)$$

Con el valor del caudal se determino el delta de presiones

$$\Delta P = \frac{W}{Q} \quad (16)$$

Luego se calculo la envergadura.

$$h = re - ri \quad (17)$$

Seguida del valor adimensional generada por la relación de radios de la turbina, parámetro usado para determinar la solidez.

$$\sigma = \frac{ri}{re} \quad (13)$$

Con los valores de la envergadura y el numero de alabes se calcula el valor de la cuerda.

$$c = \frac{\sigma * (\pi * re * (1 + h))}{B} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta el valor de los RPM se determina omega, definido en la teoría del análisis de fuerzas sobre el perfil.

$$\Omega = RPM \frac{2 * \pi}{60} \quad (18)$$

$$\Omega r = \Omega * re \quad (19)$$

Con estos vectores se determina el ángulo φ .

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{u}{\Omega r} \right) \quad (20)$$

Calculando la velocidad geométrica, especificada en la teoría.

$$v_{geo} = \sqrt{(u^2 + \Omega r^2)} \quad (21)$$

$$u_t = \frac{\Delta P}{2 * \rho * \Omega r} \quad (22)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{u}{(\Omega r + u_t)} \right) \quad (23)$$

Con base al cálculo de las variables anteriores se determina la velocidad efectiva.

$$v_{efec} = \sqrt{(u^2 + (\Omega r + u_t)^2)} \quad (24)$$

De acuerdo a la bisectriz se determina el ángulo de ataque y el número de Reynolds.

$$\alpha_1 = \frac{\varphi + \varphi_0}{2} \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 * 360}{2 * \pi} \quad (26)$$

$$Reynolds = \frac{v_{geo} * c}{\nu} \quad (27)$$

Una vez calculado los valores de Reynolds y el ángulo de ataque se selecciona el perfil de acuerdo a los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre,

donde la diferencia entre ellos debe ser la mayor para que la elección sea la más apropiada. Una vez se determine el mejor perfil, se ingresan los valores de los coeficientes para así determinar la eficiencia.

Fuerza de sustentación.

$$l = \frac{1}{2} * \rho * v_{efec}^2 * c * cl * h \quad (3)$$

Fuerza de arrastre.

$$d = \frac{1}{2} * \rho * v_{efec}^2 * c * cd * h \quad (4)$$

Torque.

$$T = (l * \text{sen}(\alpha_1)) - (d * \text{cos}(\alpha_1)) * re \quad (28)$$

Finalmente se determina la eficiencia de la turbina.

$$\eta = \frac{\Omega * T}{Q * \Delta P} * 100 \quad (29)$$

5. VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO

De acuerdo a los valores de entrada seleccionados fig.8, se determina mediante el software el número de Reynolds y el ángulo de ataque, con estos valores se remite a tablas o en este caso a un software, DesignFOIL, para determinar el NACA más apropiado con los coeficientes de sustentación y arrastre.

Figura 9. Interfaz Gráfica del Software

The screenshot displays a software interface with two main sections: 'Diseño Aerodinámico' and 'Fuerzas Aerodinámicas Sobre el Perfil'. The 'Diseño Aerodinámico' section contains input fields for: Radio Exterior (0.05), Radion Interior (0.0408), Potencia (200), Numero de Alabes (8), RPM en el eje de Rotor (2500), Velocidad de la Corriente de Aire (3), Densidad del aire a 20° (1.1993), and Viscosidad cinamtica de fluido (1.783e-5). A 'Depurar' button is located below these inputs. The 'Fuerzas Aerodinámicas Sobre el Perfil' section shows output fields for: Coeficiente de Sustentacion (0.831) and Coeficiente de Arrastre (0.0359), with an 'Ejecutar' button below. To the right of the design section, output fields show: Angulo de Ataque (6.5584354) and Numero de Reynolds (12178.695). Further right, the 'Rendimiento' field shows a value of 23.494775.

| Parameter | Value |
|-----------------------------------|-----------|
| Radio Exterior | 0.05 |
| Radion Interior | 0.0408 |
| Potencia | 200 |
| Numero de Alabes | 8 |
| RPM en el eje de Rotor | 2500 |
| Velocidad de la Corriente de Aire | 3 |
| Densidad del aire a 20° | 1.1993 |
| Viscosidad cinamtica de fluido | 1.783e-5 |
| Angulo de Ataque | 6.5584354 |
| Numero de Reynolds | 12178.695 |
| Coeficiente de Sustentacion | 0.831 |
| Coeficiente de Arrastre | 0.0359 |
| Rendimiento | 23.494775 |

Para esta selección se hace un proceso de tabulación donde se revisa la mayor diferencia entre el coeficiente de arrastre y sustentación como se ven en la tabla 1, variando las diferentes posibilidades entre los perfiles NACA.

Tabla1. Coeficientes de sustentación y arrastre

| NACA | 0021 | 0022 | 0023 | 0024 | 0025 | 0026 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cl | 0.0830 | 0.834 | 0.839 | 0.835 | 0.820 | 0.823 |
| Cd | 0.0354 | 0.0357 | 0.0356 | 0.0359 | 0.0361 | 0.0365 |
| Cl - Cd | 0.7946 | 0.7946 | 0.8034 | 0.7991 | 0.7839 | 0.786 |

De acuerdo con valores indicados en la tabla 1, el perfil NACA más apropiado para las condiciones de trabajo que se manejan es el 0023. Para tener mejores referencias de estos valores ver las tablas en Anexos 1, 2, 3.

Con las características calculadas por el software se modela en CAD la turbina (figura. 9), para elaborar el análisis por elementos finitos del comportamiento de velocidad, presión entre otras a los que estará sometido el sistema figura. 10.

Figura 10. Modelo de Sistema

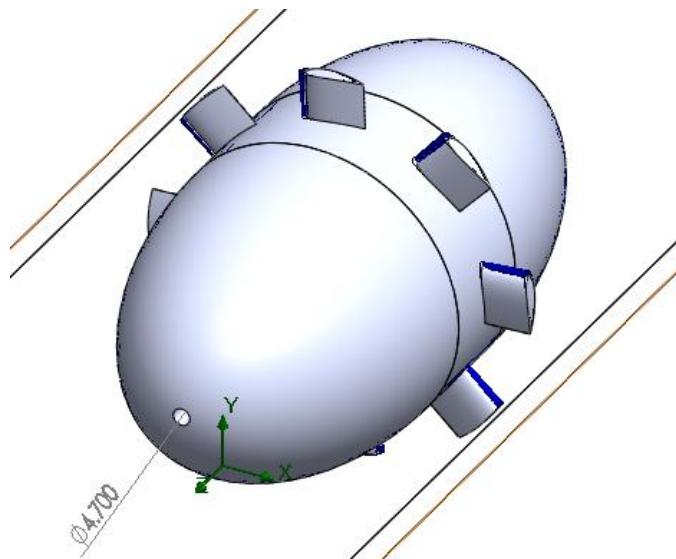
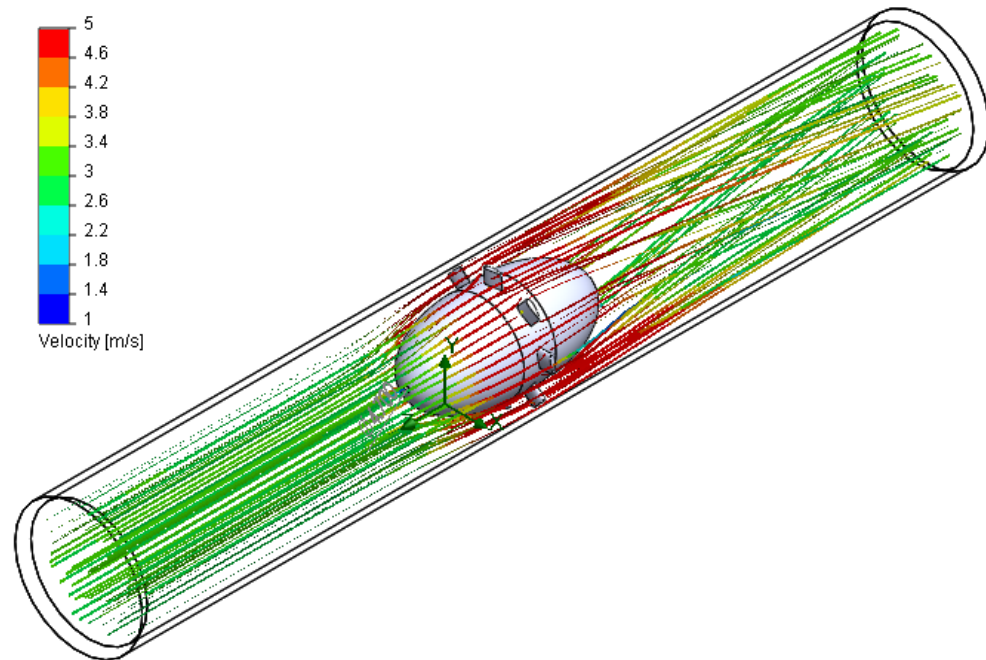


Figura 11. Resultado de la Simulación del Sistema



La simulación del comportamiento de la turbina de acuerdo a los parámetros de entrada se realizó en el software SolidFlow 2009, obteniendo buenos resultados, ya que al generar un flujo de viento a una velocidad de 3m/s se puede ver que hay un mayor valor de este en los alabes, lo que genera movimiento en el rotor, produciendo finalmente energía que es lo que se espera de este proyecto y se muestra su comportamiento en la turbulencia de salida de la turbina.

Los colores de la figura 10 revelan el comportamiento del viento en cada parte de la turbina señalando que los resultados esperados son apropiados con el análisis matemático planteado originalmente.

Para tener mejores referencias del tipo de simulación empleada ver ANEXO 6 con la ficha técnica del software.

6. CONSTRUCCIÓN

En la máquina de prototipado rápido “Dimention SST1200”, propiedad de la Universidad Militar Nuevas Granada, se construyeron las piezas de la turbina mostradas en los planos anexos 7, 8, 9.

Figura 12. Piezas diseñadas

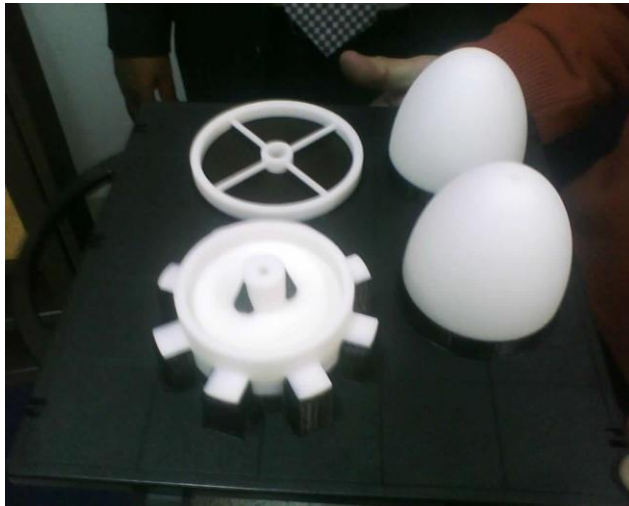


Figura 13. Unión de las piezas



7. CONCLUSIONES

El estudio de este tipo de sistemas alternativos de energía, protege el medio ambiente, es por ello que es importante, estudiar diferentes métodos que permitan el ensamble de sistemas de energía mareomotriz a bajo costo, y alto rendimiento, ofreciendo alternativas energéticas inagotables, siendo irrelevante la zona de instalación.

El modelo matemático desarrollado en el presente trabajo, es sencillo y eficiente dando la posibilidad de implementarse bajo otros lenguajes y software.

De acuerdo a los resultados de las simulaciones mediante análisis por elementos finitos (velocidad, presión, entre otras), se determinó que el algoritmo implementado, fue el adecuado ya que se comprobó que los resultados de dicha simulación fueron coherentes con los datos entregados por el software.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con el estudio de este tipo de sistema de energías alternativo, ya que contribuye a la protección del medio ambiente, mejorando el diseño e implementación de turbinas variando el número de alabes y analizando su mejor rendimiento, de modo que proporcione la energía suficiente que cumpla con los requisitos de consumo humano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ortega Rodríguez, M., Energías Renovables segunda ed. 2002: Paraninfo-Thomson. 157-184.
- [2] Delgado Medina, M., Energías renovables, una alternativa racional. Cuenta y razón, 2004. 135: p. 1-7.
- [3] Boletín, LA PRIMERA CENTRAL QUE APROVECHA LAS OLAS DEL MAR SE CONECTA A LA RED BRITANICA. La Revista, 2001. 4(2): p. 7.
- [4] González Romero, A., TECNOLOGÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS Y DE LAS CORRIENTES MARINAS. BOLETÍN DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA, 2009: p. 1-28.
- [5] Wells, A., Rotary Transducers. 1980, The Queen's University of Belfast Ireland: United Kingdom. p. 1-6.
- [6] Wells, A., Wave Power Apparatus. 1993, Secretary of State for Energy in Her Britannic Majesty's Government of the United Kingdom og Great Britain and Northern: United Kingdom. p. 1-7.
- [7] Wells, A., Wave Energy Apparatus. 1983: United Kingdom. p. 1-6.
- [8] Wells, A., Wave Energy Converter. 1996: United Kingdom. p. 1-17.
- [9] Wells, A., Wave Energy Converter. 2001, Applied Research & Technology Ltd: GB. p. 1-11.
- [10] Saptono, R., Selection of Materials for the Aerofoil Blades of a Wells Turbine Operated in an Oscillating Water Column (OWC) Wave Power Station. 2004, The UNSW School of MSE.
- [11] Arlitt; Tease, K.S., R; Lees, J, Dynamic System Modeling of an Oscillating Water Column Wave Power Plant based on Characteristic Curves obtained by Computational Fluid Dynamics to enhance Engineered Reliability, JORCT98-0312, Editor. 2007, EC: Heidenheim.
- [12] Center, W.E., Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal. Wave Energy Centre, 2004: p. 6-12.

- [13] Webb, I.S., C; Jackson, G, Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report. 2005, The Carbon Trust. p. 4-15.
- [14] Ross, D. Oleadas de energía. [cited 2009 5 agosto]; Available from: <http://www.unep.org/ourplanet/imgversn/123/spanish/ross.html>.
- [15] Raso, A.B., X; Ortiz. , Diseño y fabricación de un prototipo a pequeña escala de una turbina de aire, para el aprovechamiento de la energía marina, a bajo costo mediante técnicas de prototipado rápido. 2008.
- [16] Energía del oleaje.
- [17] Raghunathan, S., THE WELLS AIR TURBINE FOR WAVE ENERGY CONVERSION, in 00001-1, 0376-0421(95), Editor. 1995, Pergamon. p. 335-386.
- [18] Castañeda Cortes, A., Diseño y Manufactura de una Turbina Wells de Ala Sectorial in Ingeniería Mecánica 2004, Universidad de los Andes Bogotá D.C. p. 11-70.
- [19] Jiménez Tamara, P., Diseño y Caracterización de una turbina Wells de Aspas Intercambiables, Destinada a un Sistema de Extracción de Energía de las Olas del Mar, in Ingeniería Mecánica 2004, Universidad de los Andes Bogota DC. p. 17-29.
- [20] Raghunathan, S.S., T; Kaneko, K, Aerodynamics of Monoplane Wells Turbine - A Review. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1994. 4(1).
- [21] Santa, A.L., M; Pinilla, A, GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TURBINAS WELLS. 2002, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES: Bogota D.C. p. 1-9.

ANEXO 1

Tabla 2. NACA 0021, #Pts=71,
Re=12178.69

| ReyN = | 12178.69 | | |
|--------|----------|--------|--------|
| AOA | Cl | Cd | Cm |
| -5 | -0.637 | 0.0335 | 0.007 |
| -4 | -0.51 | 0.0324 | 0.006 |
| -3 | -0.383 | 0.0313 | 0.005 |
| -2 | -0.255 | 0.0307 | 0.003 |
| -1 | -0.128 | 0.0301 | 0.002 |
| 0 | 0 | 0.0299 | 0 |
| 1 | 0.128 | 0.0301 | -0.002 |
| 2 | 0.255 | 0.0305 | -0.003 |
| 3 | 0.383 | 0.0312 | -0.005 |
| 4 | 0.51 | 0.0321 | -0.006 |
| 5 | 0.637 | 0.0329 | -0.007 |
| 6 | 0.763 | 0.0343 | -0.009 |
| 7 | 0.873 | 0.0361 | -0.01 |
| 8 | 0.965 | 0.0381 | -0.012 |
| 9 | 1.041 | 0.0405 | -0.013 |
| 10 | 1.101 | 0.0427 | -0.015 |

Tabla 3. NACA 0022, #Pts=71,
Re=12178.69

| ReyN = | 12178.69 | | |
|--------|----------|--------|--------|
| AOA | Cl | Cd | Cm |
| -5 | -0.642 | 0.0339 | 0.008 |
| -4 | -0.514 | 0.0327 | 0.007 |
| -3 | -0.385 | 0.0317 | 0.005 |
| -2 | -0.257 | 0.0311 | 0.003 |
| -1 | -0.129 | 0.0304 | 0.002 |
| 0 | 0 | 0.0301 | 0 |
| 1 | 0.129 | 0.0303 | -0.002 |
| 2 | 0.257 | 0.0308 | -0.003 |
| 3 | 0.385 | 0.0315 | -0.005 |
| 4 | 0.514 | 0.0324 | -0.007 |
| 5 | 0.642 | 0.0332 | -0.008 |
| 6 | 0.766 | 0.0346 | -0.01 |
| 7 | 0.872 | 0.0363 | -0.012 |
| 8 | 0.96 | 0.0383 | -0.013 |
| 9 | 1.032 | 0.0402 | -0.015 |
| 10 | 1.089 | 0.0429 | -0.017 |

ANEXO 2

Tabla 4. NACA 0023, #Pts=71,
Re=12178.69

| ReyN = | 12178.69 | | |
|--------|----------|--------|--------|
| AOA | Cl | Cd | Cm |
| -5 | -0.646 | 0.0341 | 0.009 |
| -4 | -0.517 | 0.0328 | 0.008 |
| -3 | -0.388 | 0.032 | 0.006 |
| -2 | -0.259 | 0.0314 | 0.004 |
| -1 | -0.129 | 0.0308 | 0.002 |
| 0 | 0 | 0.0303 | 0 |
| 1 | 0.129 | 0.0306 | -0.002 |
| 2 | 0.259 | 0.0311 | -0.004 |
| 3 | 0.388 | 0.0318 | -0.006 |
| 4 | 0.517 | 0.0323 | -0.008 |
| 5 | 0.646 | 0.0335 | -0.009 |
| 6 | 0.768 | 0.0349 | -0.011 |
| 7 | 0.87 | 0.0366 | -0.013 |
| 8 | 0.955 | 0.0381 | -0.015 |
| 9 | 1.023 | 0.0404 | -0.017 |
| 10 | 1.077 | 0.0424 | -0.019 |

Tabla 5. NACA 0024, #Pts=71,
Re=12178.69

| ReyN = | 12178.69 | | |
|--------|----------|--------|--------|
| AOA | Cl | Cd | Cm |
| -5 | -0.651 | 0.0343 | 0.01 |
| -4 | -0.521 | 0.0331 | 0.008 |
| -3 | -0.391 | 0.0322 | 0.006 |
| -2 | -0.261 | 0.0317 | 0.004 |
| -1 | -0.13 | 0.031 | 0.002 |
| 0 | 0 | 0.031 | 0 |
| 1 | 0.13 | 0.0309 | -0.002 |
| 2 | 0.261 | 0.0314 | -0.004 |
| 3 | 0.391 | 0.0321 | -0.006 |
| 4 | 0.521 | 0.0326 | -0.008 |
| 5 | 0.651 | 0.0338 | -0.01 |
| 6 | 0.769 | 0.0352 | -0.012 |
| 7 | 0.868 | 0.0364 | -0.014 |
| 8 | 0.949 | 0.0384 | -0.016 |
| 9 | 1.014 | 0.0407 | -0.018 |
| 10 | 1.065 | 0.0426 | -0.02 |

ANEXO 3

Tabla 6. NACA 0025, #Pts=71,
Re=12178.69

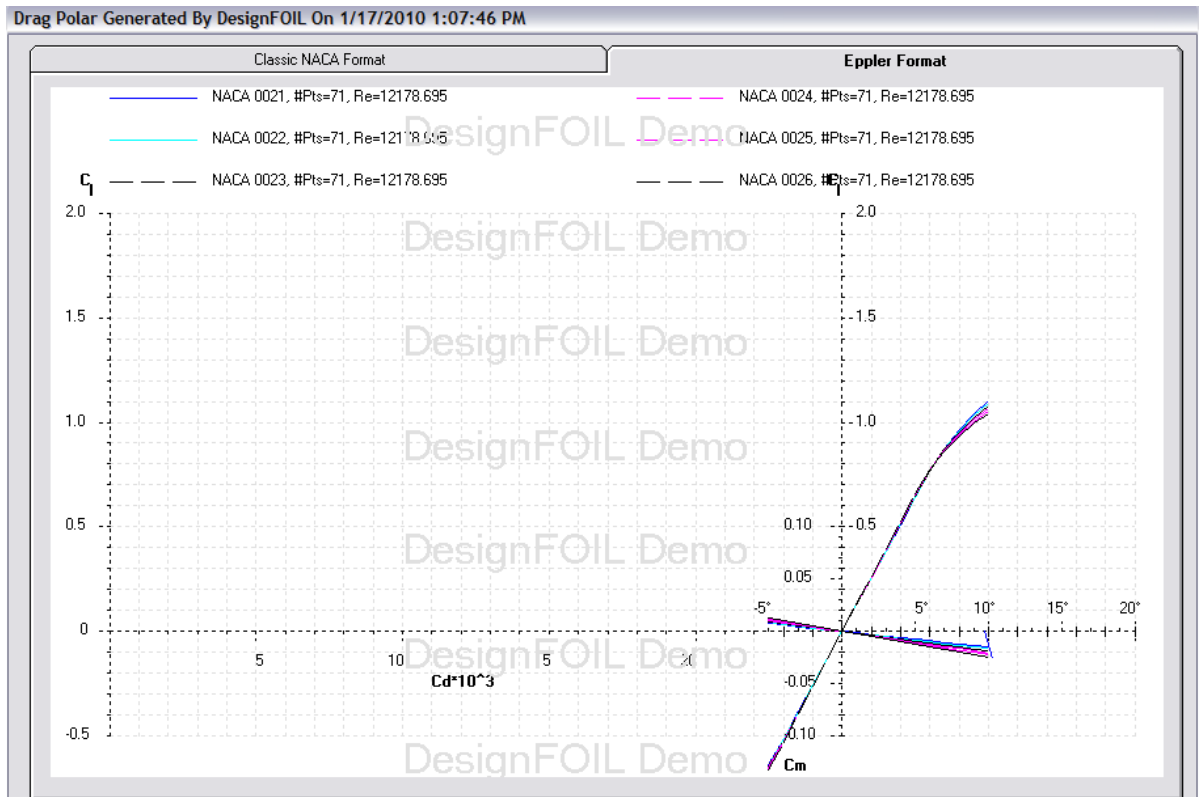
| ReyN = | 12178.695 | | |
|--------|-----------|--------|--------|
| AOA | Cl | Cd | Cm |
| -5 | -0.655 | 0.0347 | 0.011 |
| -4 | -0.524 | 0.0334 | 0.009 |
| -3 | -0.394 | 0.0324 | 0.007 |
| -2 | -0.262 | 0.0319 | 0.005 |
| -1 | -0.131 | 0.0313 | 0.002 |
| 0 | 0 | 0.0312 | 0 |
| 1 | 0.131 | 0.0311 | -0.002 |
| 2 | 0.262 | 0.0317 | -0.005 |
| 3 | 0.394 | 0.0324 | -0.007 |
| 4 | 0.524 | 0.0329 | -0.009 |
| 5 | 0.655 | 0.0341 | -0.011 |
| 6 | 0.77 | 0.0355 | -0.014 |
| 7 | 0.865 | 0.0367 | -0.016 |
| 8 | 0.942 | 0.0387 | -0.018 |
| 9 | 1.005 | 0.0403 | -0.02 |
| 10 | 1.053 | 0.0429 | -0.022 |

Tabla 7. NACA 0026, #Pts=71,
Re=12178.69

| ReyN = | 12178.695 | | |
|--------|-----------|--------|--------|
| AOA | Cl | Cd | Cm |
| -5 | -0.66 | 0.0349 | 0.012 |
| -4 | -0.528 | 0.0337 | 0.01 |
| -3 | -0.396 | 0.0328 | 0.007 |
| -2 | -0.264 | 0.0321 | 0.005 |
| -1 | -0.132 | 0.0315 | 0.003 |
| 0 | 0 | 0.0315 | 0 |
| 1 | 0.132 | 0.0314 | -0.003 |
| 2 | 0.264 | 0.0319 | -0.005 |
| 3 | 0.396 | 0.0327 | -0.007 |
| 4 | 0.528 | 0.0332 | -0.01 |
| 5 | 0.66 | 0.0344 | -0.012 |
| 6 | 0.77 | 0.0352 | -0.015 |
| 7 | 0.862 | 0.037 | -0.017 |
| 8 | 0.936 | 0.039 | -0.02 |
| 9 | 0.996 | 0.0405 | -0.022 |
| 10 | 1.041 | 0.0431 | -0.025 |

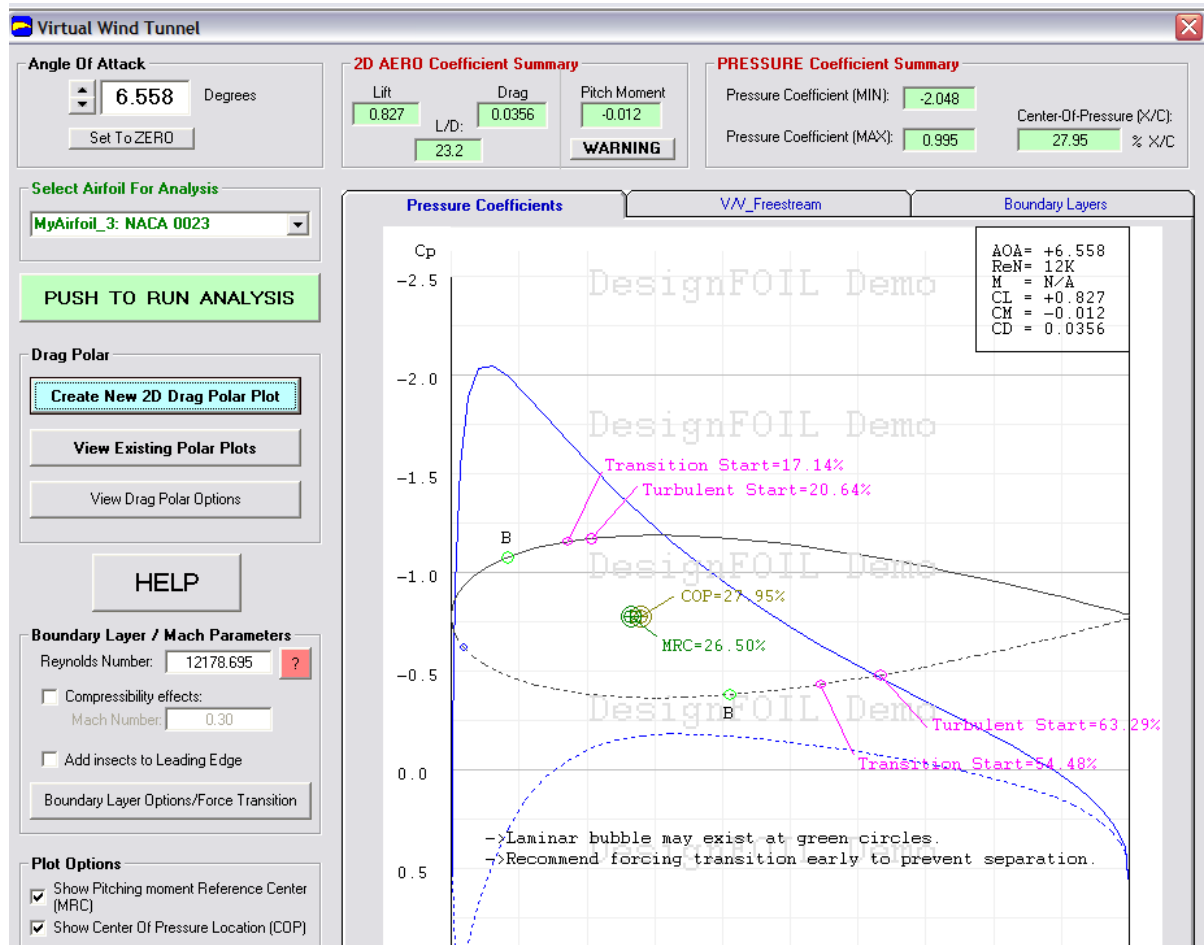
ANEXO 4

Figura 14. Grafica del comportamiento de los coeficientes de sustentación y arrastre de los perfiles NACA



ANEXO 5

Figura 15. Características del perfil NACA seleccionado



ANEXO 6

FICHA TECNICA: SIMULACION SOLIDFLOW

Initial Mesh Settings

Automatic initial mesh: On
Result resolution level: 3
Advanced narrow channel refinement:

Off

Refinement in solid region: Off

Geometry Resolution

Evaluation of minimum gap size:

Manual

Minimum gap size: 0.12 m

Evaluation of minimum wall thickness:

Automatic

Computational Domain

Size

X min: -0.0398059615 m
X max: 0.0704140385 m
Y min: -0.00967229932 m
Y max: 0.100547701 m
Z min: -0.429725436 m
Z max: 0.351834564 m

Physical Features

Heat conduction in solids: Off
Time dependent: Off
Gravitational effects: Off
Flow type: Laminar and turbulent
High Mach number flow: Off
Humidity: Off
Default roughness: 0 micrometer
Default wall conditions: Adiabatic wall

Initial Conditions

Thermodynamic parameters

Static Pressure: 101325 Pa
Temperature: 293.2 K

Velocity parameters

Velocity vector
Velocity in X direction: 3 m/s
Velocity in Y direction: 0 m/s
Velocity in Z direction: 0 m/s

Turbulence parameters

Turbulence intensity and length
Intensity: 2 %
Length: 0.0012 m

Material Settings

Fluids

Air

Boundary Conditions

Inlet Velocity 1

Type: Inlet Velocity
Faces: Face <1 >
Coordinate system: Face Coordinate

System

Reference axis: X

Flow parameters

Flow vectors direction: Normal to face
Fully developed flow: No
Velocity normal to face: 3 m/s
Inlet profile: 0

Thermodynamic parameters

Temperature: 293.2 K

Turbulence parameters

Turbulence intensity and length
Intensity: 2 %
Length: 0.0012 m

Boundary layer parameters

Boundary layer type: Turbulent

Static Pressure 1

Type: Static Pressure
Faces: Face <1 >
Coordinate system: Face Coordinate

Calculation Control Options

Finish Conditions

Finish conditions: If one is satisfied
Maximum travels: 4

Goals convergence

Analysis interval: 0.5

Solver Refinement

Refinement: Disabled

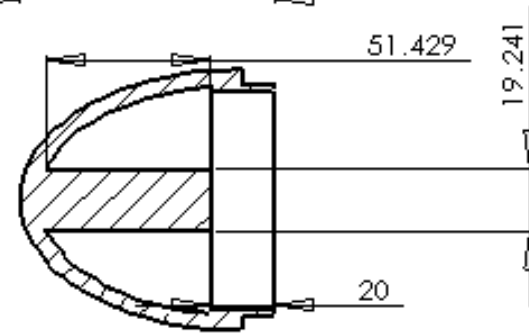
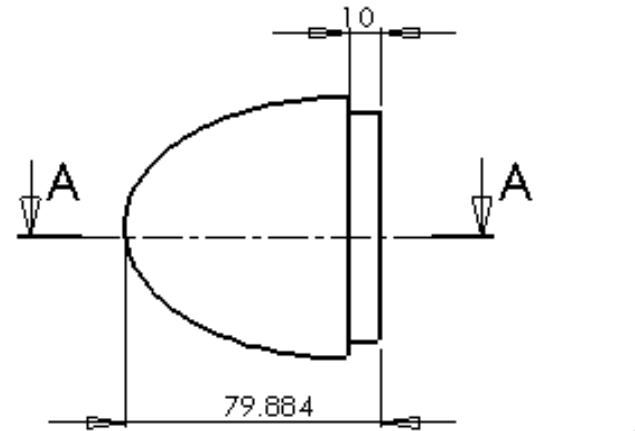
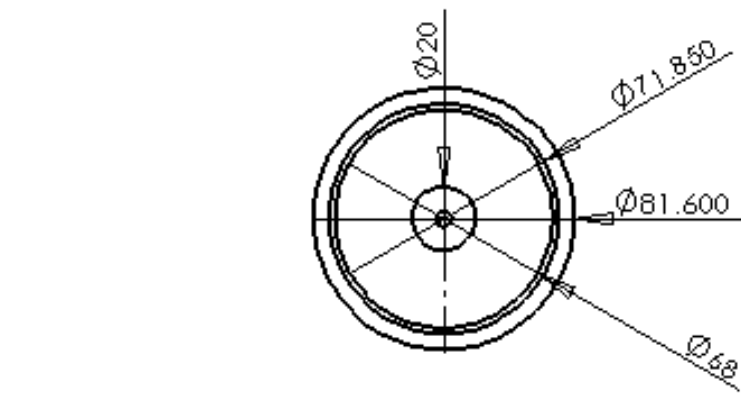
Results Saving

Save before refinement: On

Advanced Control Options

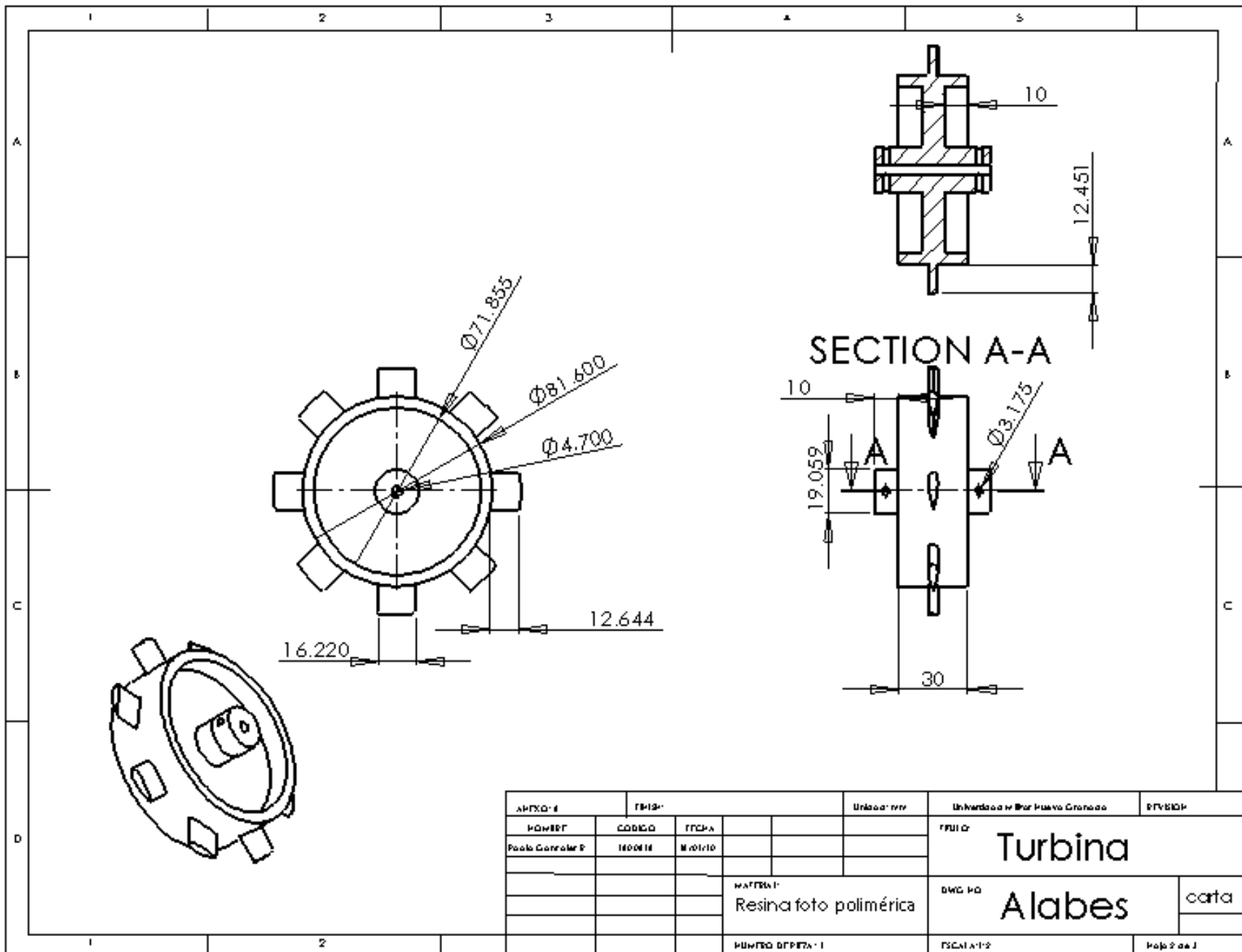
Flow Freezing

Flow freezing strategy: Disabled

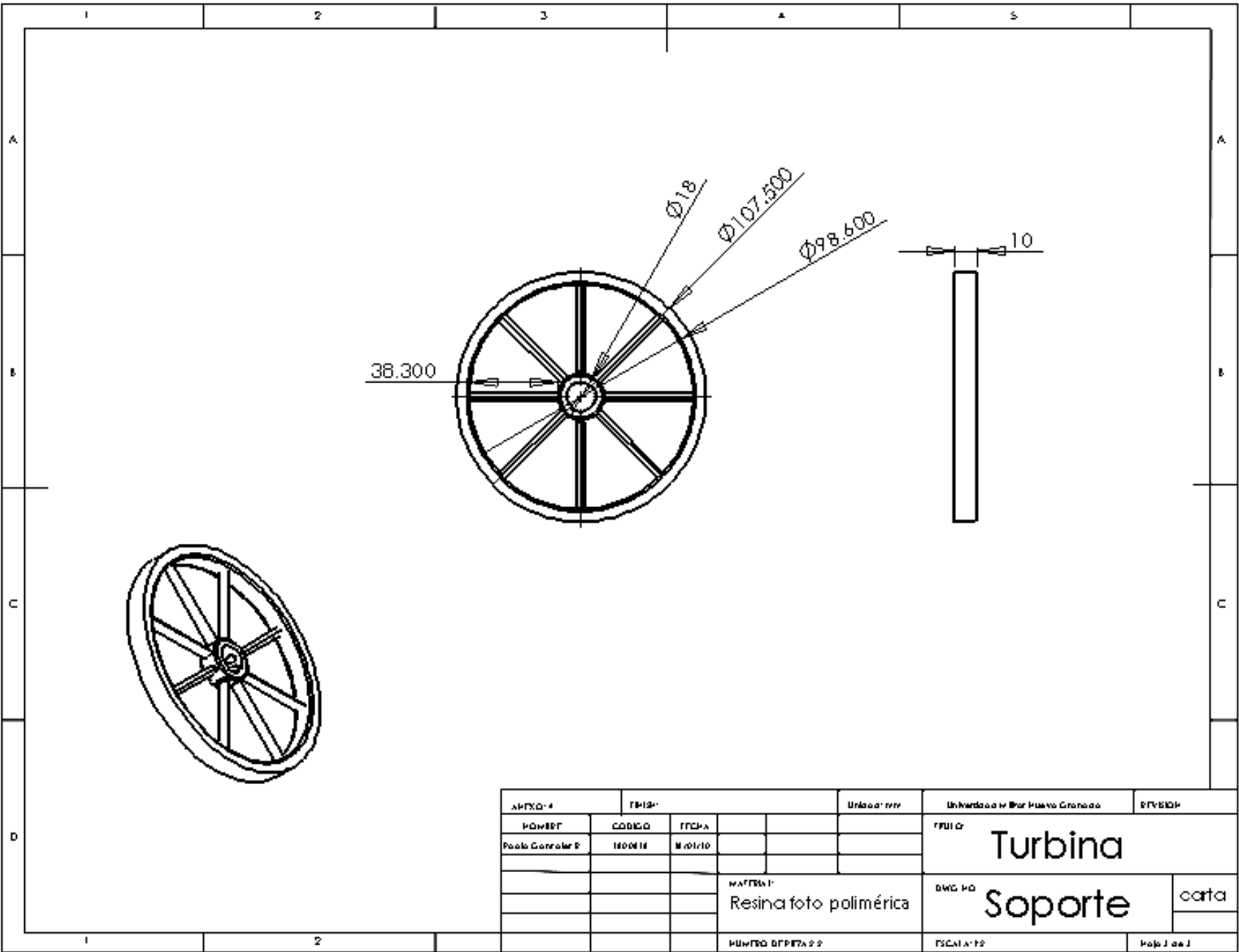


SECTION A-A

| | | | | | | |
|-----------------|--------|---------|--|------------------------|----------------------------|-------------|
| АРХИВЪТ | | ГРЪПЪТ | | Уникод: rrr | Уникод: w Mr Nuevo Cronado | СТУДИО |
| POWER | CODIGO | ГРЪПА | | | ПРОЕКТ | |
| Power Control P | 180014 | M.01/10 | | | Turbina | |
| | | | | | DWG NO | |
| | | | | МАТЕРИАЛ | Carcasa | |
| | | | | Resina foto polimérica | carta | |
| | | | | НУМЪРО ДЕКРЕТЪТ | МАСШЪБЪТ | Фолг 1 de 1 |



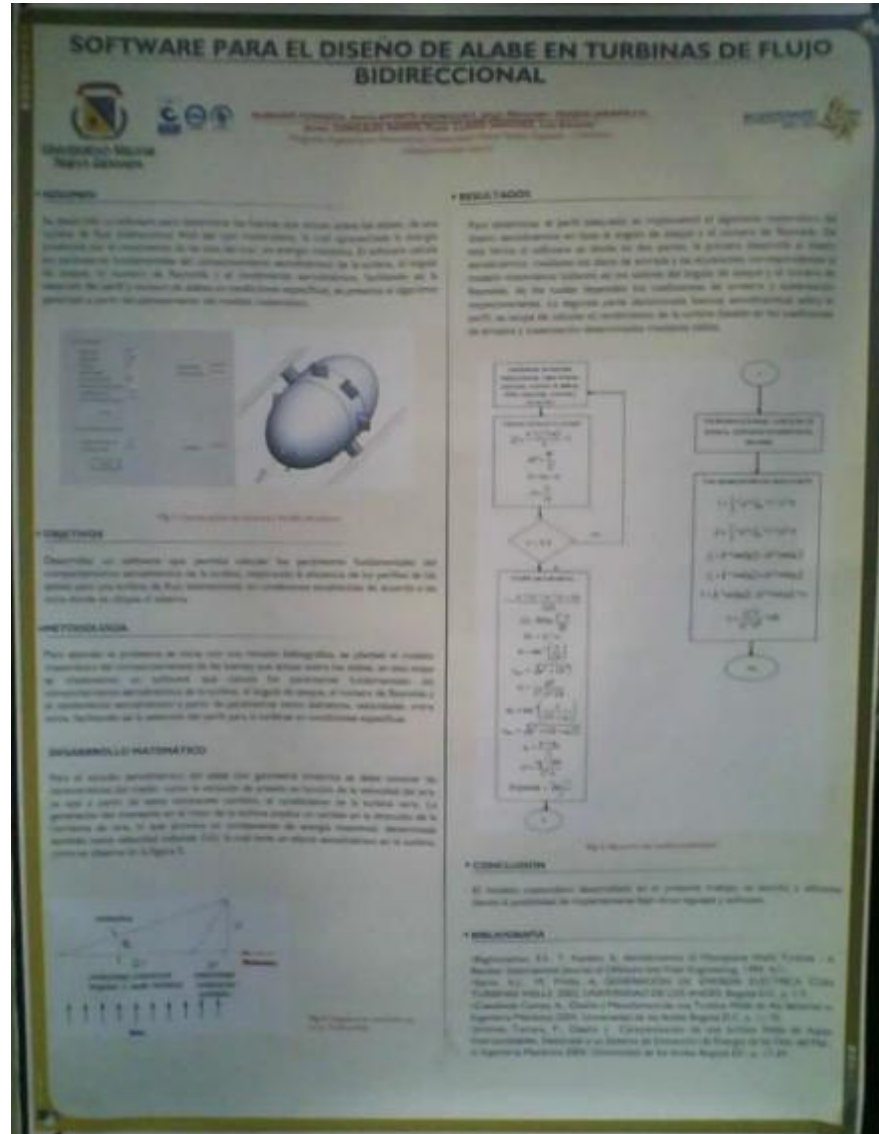
| APROBADO | | FECHA | | Unidad: mm | | Unidad de Medida: Grados | | EVALUADO | |
|------------------------|---------|--------|--|------------|--|--------------------------|--|----------|--|
| PROYECT | CODIGO | DESCR | | | | TITULO | | | |
| Problema Controlador P | 1600116 | Motriz | | | | Turbina | | | |
| | | | | | | DESCRIPCION | | | |
| | | | | | | Alabes | | | |
| | | | | | | MATERIAL | | | |
| | | | | | | Resina foto polimérica | | | |
| | | | | | | DESCRIPCION | | | |
| | | | | | | carta | | | |
| | | | | | | NUMERO DE PÁGINA | | | |
| | | | | | | Página 2 de 2 | | | |



| | | | | | | | | | |
|------------------|--------|-----------|--------------------|------------|------------------------|-------------------------------|-------------|---------|--|
| APROX-4 | | TRIS- | | Unidad: mm | | Universidad de Barro Colorado | | ESTADIS | |
| POWER | COBICO | TCDA | | | | TURBINA | | | |
| Paolo Gonzalez P | MOONIE | M. Orlito | | | | DWG NO | | | |
| | | | | | | Soporte | | | |
| | | | MATERIAL | | Resina foto polimérica | | carta | | |
| | | | NUMERO DE PIEZA 22 | | ESCALA 1:2 | | Hoja 1 de 1 | | |

ANEXO 10

Figura 16. Poster publicado en la Universidad Militar Nueva Granada en el IV Encuentro de Investigaciones



ANEXO 11

El 10 de septiembre de 2009 00:17, astrid rubiano <astridrub@gmail.com> escribió:

Buen día,

Enviamos el artículo con título:

MODELO MATEMATICO DE UN ALABE EN TURBINAS DE FLUJO
BIDIRECCIONAL

que se encuentra adjunto para someterlo a la convocatoria.

Gracias

Ing. Astrid Rubiano Fonseca

Ingeniero en Mecatronica

Universidad Militar Nueva Granada