

Diseño de Aerogeneradores Savonius de Diferente Perfil, para Determinar su
Eficiencia en Vientos de Baja Velocidad, en Quito

José Francisco Borja Dousdebés

Universidad Particular Internacional SEK

Nota del Autor

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Reconocimiento a Paolo Salazar director de tesis, catedrático.

Quito – Ecuador, franciscojoseborja@gmail.com

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	2
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	7
Resumen	8
Introducción	9
Método	11
Antecedentes Históricos	11
Clasificación de los generadores eólicos	12
Aerogenerador Savonius	12
Partes de un aerogenerador Savonius	12
Recursos	13
Recursos Técnicos	13
Materiales	13
Procedimiento	14
Energía y potencia disponible del viento	15
Potencia disponible en Quito	16
Potencia aprovechable por un aerogenerador y límite de Betz	18
La potencia aprovechable por un aerogenerador ideal en Quito	19
Potencia de aerogenerador Savonius ideal en Quito	20
Arrastre y sustentación	20
La sustentación	20
El arrastre	21
Coeficiente de arrastre	21

Aerogeneradores a estudiar	21
Diseño de aerogenerador Savonius	21
Aerogenerador de álabe Cicloide	22
Aerogenerador de álabe Circular	23
Diseño de álabe	24
Diseño del Eje	26
Momento de inercia másico	34
Simulación	35
Diseño y modelado en Autodesk Inventor	35
Análisis en Autodesk Inventor	36
Análisis en Autodesk CFD	40
Análisis en Autodesk Flow Design	44
Resultados	47
Datos obtenidos para el perfil de álabe de cicloide	47
Datos obtenidos para el perfil de álabe de circular	50
Comparación entre perfil cicloide y perfil circular	53
Discusión	56
Conclusiones	56
Recomendaciones	57
Referencias	58
Apéndice A	59
Cálculo de la frecuencia natural del aerogenerador	59
Apéndice B	61

Momento inercial de masa de álabe circular	61
Momento inercial de masa de álabe cicloide	61
Apéndice C	62
Partes y materiales	62
Apéndice D	63
Planos	63
Apéndice E	64
Soldadura	64
Soldadura W1 y W2	64
Soldadura W3	65
Soldadura W4	65
Soldadura W5	66
Apéndice F	67
Marco	67
Apéndice G	69
La realidad de la leyenda	69

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de generadores eólicos	12
Figura 2. Partes principales de un aerogenerador Savonius.	13
Figura 3. Longitud (d) y solapamiento (e) en relación al eje.	22
Figura 4. Álabes de perfil cicloide	25
Figura 5. Álabes de perfil circular	24
Figura 6. Diagrama de cuerpo libre del eje	27
Figura 7. Diseño del perfil del álabes en Autodesk Inventor	36
Figura 8. Extrusión del perfil del álabes en Autodesk Inventor	36
Figura 9. Selección de análisis de esfuerzo en Inventor.	36
Figura 10. Aplicación de material para estudio de esfuerzos	37
Figura 11. Herramientas para configuración de mallado	37
Figura 12. Visualización de mallado en Inventor.	38
Figura 13. Configuración de datos de convergencia.	39
Figura 14. Inicialización del estudio en inventor	39
Figura 15. Visualización de gráfico de convergencia (a) y no convergencia (b).	39
Figura 16. Vínculo Autodesk inventor y CFD	40
Figura 17. Creación de geometría de túnel de viento en CF	40
Figura 18. Asignación de material en CFD.	41
Figura 19. Asignación de condiciones de análisis.	41
Figura 20. Condiciones de mallado en CFD	42
Figura 21. Inicialización del análisis en CFD.	42
Figura 22. Gráfico de convergencia de a) velocidad y b) presión.	43
Figura 23. Cuadro de valores de las iteraciones en CFD.	44

Figura 24. Vinculo Inventor y Flow Design.	44
Figura 25. Inicio de Flow Design en Inventor.	44
Figura 26. Orientación de la dirección del viento en Flow Design	45
Figura 27. Asignación de la velocidad en Flow Design.	45
Figura 28. Estado de transición y de no convergencia en Autodesk Flow Design.	45
Figura 29. Estado de convergencia en Autodesk Flow Design	46
Figura 30. Análisis momento de giro vs velocidad, además ecuación obtenida a partir de los datos experimentales.	49
Figura 31. Análisis momento de giro vs velocidad, además ecuación obtenida a partir de los datos experimentales.	52
Figura 32. Análisis momento de giro vs velocidad, de los datos experimentales del aerogenerador de perfil circular comparado con el aerogenerador de perfil cicloide.	53
Figura 33. Análisis momento de giro vs velocidad, de los datos de las ecuaciones determinadas para aerogenerador de perfil circular comparado con el aerogenerador de perfil cicloide.	54
Figura 34. Momento inercial de masa de álabe circular	61
Figura 35. Momento inercial de masa de álabe cicloide	62
Figura 36. Diagrama de cuerpo libre de elemento de marco	67

Índice de Tablas

Tabla 1.Potencia disponible en Quito a diferentes velocidades y diferente área.	17
Tabla 2.Potencia aprovechable en Quito por un aerogenerador ideal.	19
Tabla 3.Potencia aprovechable en Quito por un aerogenerador Savonius ideal.	20
Tabla 4.Diseño de álabe según condiciones de funcionamiento.	25
Tabla 5.Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, a diferentes velocidades de viento, para la sección posterior de un álabe de perfil cicloide	47
Tabla 6.Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, a diferentes velocidades de viento, para la sección posterior de un álabe de perfil cicloide	48
Tabla 7.Momento giratorio total que se obtiene de la diferencia del momento giratorio de la parte frontal menos el momento giratorio de la parte posterior	49
Tabla 8.Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, para diferentes velocidades de viento, para la sección posterior de un álabe de perfil circular	50
Tabla 9.Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, para diferentes velocidades de viento, para la sección frontal de un álabe de perfil circular	51
Tabla 10.Momento giratorio total que se obtiene de la diferencia del momento giratorio de la parte frontal menos el momento giratorio de la parte posterior	52
Tabla 11.Comparación entre momento giratorio total del perfil cicloide y del perfil circular, alcanzado a diferente velocidad del viento (datos experimentales).	53
Tabla 12.Comparación entre momento giratorio total del perfil cicloide y del perfil circular, alcanzado a diferente velocidad del viento (datos de ecuaciones).	54
Tabla14 Resumen de los elementos constitutivos del aerogenerador a utilizar.	55
Tabla 13 Error porcentual entre valores calculados y de simulación.	62

Resumen

El presente proyecto presenta el estudio de aerogeneradores Savonius de perfil cicloide y perfil circular para compararlos en vientos de baja velocidad.

Al inicio en la introducción se señala la importancia del estudio de los aerogeneradores, y lo que se espera alcanzar del mismo, también se plantean los objetivos específicos y general.

Se relata una breve reseña histórica de los aerogeneradores, para seguir con una clasificación general de los mismos.

Para continuar se describe los aerogeneradores Savonius y sus partes constitutivas.

Luego se presentan los recursos humanos, técnicos y materiales que necesitaron para la realización del estudio.

Después se describe el procedimiento realizado durante el estudio.

Continúa el estudio con conceptos y definiciones que involucra el estudio de los aerogeneradores Savonius.

Para continuar se describen las condiciones que deben cumplir los aerogeneradores estudiados.

Luego se presenta el diseño de los aerogeneradores.

Se procede a realizar las pruebas, a partir de las cuales se obtienen los resultados y de esta manera concluir con la discusión donde se tratan las conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: Coeficiente de Arrastre, Fuerza de Arrastre, Aerogenerador de eje vertical.

Introducción

En la actualidad no existe suficiente generación eléctrica en la ciudad de Quito a partir del aprovechamiento de energías renovables, especialmente la energía eólica; se debe principalmente a que los vientos en la ciudad son de baja velocidad y traen consigo la idea que no aportarán energía eléctrica suficiente, sin embargo es posible utilizar este tipo de vientos mediante aerogeneradores diseñados especialmente para éste propósito, de ahí la importancia de estudiar esta clase de aerogeneradores y lograr mejores diseños para elevar su desempeño.

Dentro de los aerogeneradores de aprovechamiento de vientos de baja velocidad que pueden ser utilizados en Quito, se encuentran los de eje vertical Savonius, por ese motivo se estudia y plantean diferentes diseños de forma que sirva para cumplir el objetivo general de diseñar aerogeneradores Savonius, y determinar su eficiencia en vientos de baja velocidad, además de cumplir los siguientes objetivos:

- Diseñar aerogenerador Savonius con álabe de perfil circular.
- Diseñar aerogenerador Savonius con álabe de perfil de cicloide.
- Determinar el coeficiente de arrastre de un aerogenerador Savonius con álabe de perfil cicloide y de perfil circular
- Determinar la potencia aprovechable por cada uno de los aerogeneradores diseñados.
- Comparar la fuerza de arrastre total de un generador Savonius con alabe de perfil circular con uno de álabe de perfil de cicloide.

En la actualidad el aerogenerador Savonius es diseñado con álabes de perfil circular, debido a que es una de las geometrías más eficientes, puesto que para una misma área proyectada determinada puede aprovechar una fuerza de arrastre total favorable al movimiento del aerogenerador, mayor al de otras geometrías.

Al estudiar un aerogenerador Savonius con perfil de álabe de cicloide se pretende encontrar una geometría que adquiriera una fuerza total de arrastre mayor a la de perfil circular gracias a sus propiedades troncocónicas.

Método

Antecedentes Históricos

Desde tiempos remotos el ser humano es consciente de la energía que posee el viento, sin embargo no existen registros históricos que permitan determinar a partir de qué momento se comenzó a aprovechar este potencial.

“Nadie sabe quién izó la primera vela en un bote, pero es probable que ése sea el primer ejemplo del uso de la energía que lleva el viento” (Steven Seidenberg, 1991)

“Parece que la primera explotación estática del viento mediante el uso de molinos tuvo lugar en Mesopotamia hace unos 4000 años” (Miguel Moro Vallina, 2010)

Pero los molinos de uso práctico “que conocemos se construyeron en Persia alrededor del siglo VII, en la zona que ahora está entre Afganistán e Irán” (Steven Seidenberg, 1991).

Tanto en Europa especialmente Francia, Holanda e Inglaterra como en la civilización árabe, que son lugares donde surge el desarrollo de los molinos de viento de manera independiente, el principal propósito de su uso consistía en el bombeo de agua tanto como en la molienda de granos.

El mayor desarrollo que tuvieron los molinos se encuentran entre la edad media y mediados del ciclo XIX. Alrededor del año 1922 el finlandés Sigurd Savonius inventa el rotor de eje vertical que lleva su mismo nombre.

El desarrollo de los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica pierde el interés a partir del uso del carbón y otros combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica.

Se retoma el desarrollo de aprovechamiento de energía eólica a partir de la concientización del impacto medio ambiental, además de la crisis energética provocada por el aumento del precio del petróleo entre 1969 y 1973.

Clasificación de los generadores eólicos

La clasificación general más conocida de generadores eólicos es la que se muestra en la figura 1:

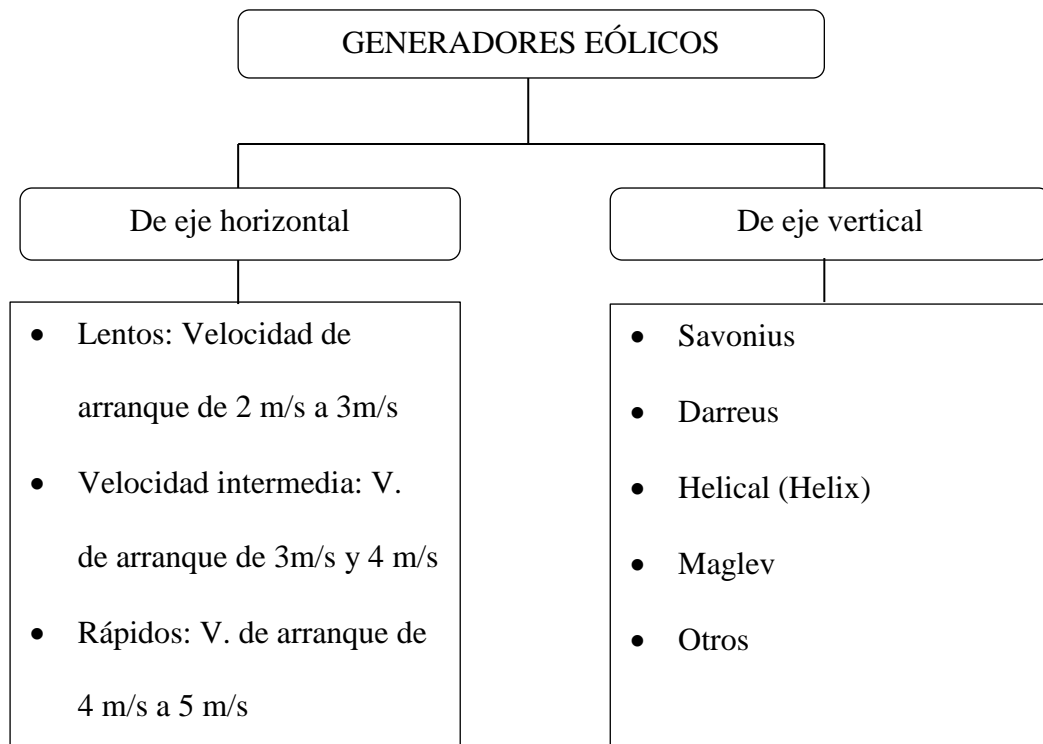


Figura 1. Clasificación de generadores eólicos

Aerogenerador Savonius

Un aerogenerador Savonius, es un aerogenerador de eje vertical cuyo funcionamiento se sustenta en el principio de arrastre de un cuerpo sumergido en un fluido.

Partes de un aerogenerador Savonius

Las partes principales de un aerogenerador Savonius se pueden observar en la Figura 2 y son:

- Álabes o cazoletas: Parte que aprovecha el empuje del viento, para hacer girar el aerogenerador.
- Eje: Parte alrededor del cual rotan los álabes.
- Pantalla: Evita la acción del viento sobre la zona posterior del alabe, para disminuir la fuerza de arrastre que se opone al movimiento.

- Timón-Veleta: Permite la alineación de la pantalla conforme a la dirección del viento.

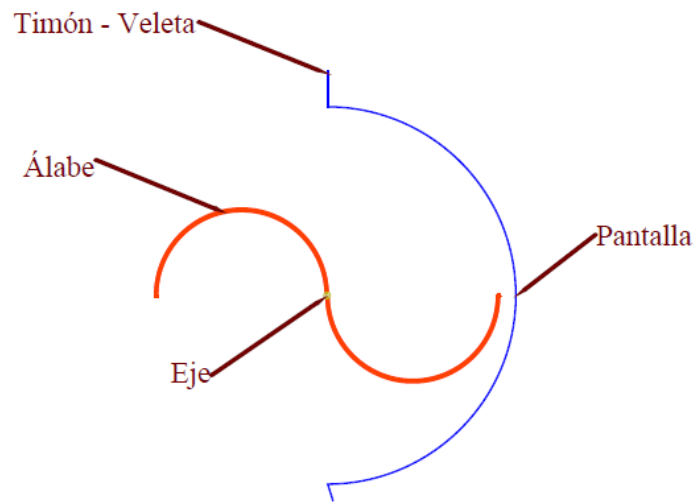


Figura 2. Partes principales de un aerogenerador Savonius

Los diseños a estudiar se consideran expuestos al viento en su totalidad por lo tanto se omite la colocación de una pantalla.

Recursos

Recursos Técnicos

Autodesk Inventor Professional (Versión estudiantil).

Autodesk Flow Design (Versión estudiantil).

Autodesk CFD (Versión estudiantil)

SMath Studio (Licencia Gratuita).

Computadora.

Materiales

Los álabes están diseñados para ser contruidos de acero.

El eje de cada aerogenerador es de tubo estructural.

Los ejes se unen al sistema de álabes a través de un marco de acero A36.

Procedimiento

Primero se determinó la geometría de los elementos constitutivos de cada uno de los aerogeneradores.

Se modelaron los aerogeneradores, en un programa de diseño asistido por computador (CAD), para poder estudiar los modelos diseñados, en un laboratorio virtual donde se generaron aproximaciones a las peores condiciones a las que deben estar expuestos en la realidad; a partir de los datos de presión, se dimensionaron los espesores de los álabes.

Se procedió a realizar los ensayos aerodinámicos en un túnel de viento virtual, que permitió identificar las principales variables y así definir cuál perfil de álabe es más eficiente en vientos de baja velocidad

A partir de las condiciones de sollicitación a las que se expondrán los aerogeneradores, se determinaron las fuerzas actuantes y reaccionantes, en los álabes así como en los ejes y demás partes principales, de esta manera se determinaron los esfuerzos principales para poder aplicar uno de los métodos de falla para el diseño.

A partir del peso de los álabes y la presión que deben soportar, se determinó las condiciones de diseño del eje, y el marco que sujeta los alabes.

El proceso de diseño es un proceso iterativo, por lo tanto del diseño original se realizaron varios cambios y rediseños, hasta obtener un modelo que satisfaga las necesidades de la investigación.

Las variables a estudiar fueron la fuerza de arrastre de cada uno de los aerogeneradores, el momento de giro, y el momento inercial de masa, para poder graficar la curva característica y así determinar cuál es más eficiente dadas determinadas condiciones especialmente las condiciones generadas en Quito. Fue importante determinar las fuerzas de arrastre que corresponden al álabe de perfil de cicloide, debido a que no existen suficientes datos respecto este tipo de geometría en las condiciones que se la analizó, también es

importante el estudio del coeficiente de momento para el aerogenerador Savonius con álabes de este tipo de perfil puesto que no existen mayores datos.

A continuación se procedió con el diseño estructural de los dos aerogeneradores, para generar los planos de construcción y detalle. El principal propósito de este ensayo fue comparar la presión y fuerza de arrastre que alcanza cada uno, con estos resultados se pudieron validar los resultados.

Para finalizar se analizaron los resultados y se definió cual aerogenerador es más apropiado y eficiente para ser utilizado en vientos de baja velocidad dentro de la Ciudad.

Energía y potencia disponible del viento

“Existe energía cinética en un objeto de masa dada cuando se encuentra en movimiento con velocidad de traslación o rotación.”(Wey Tong, 2010)

Si una masa de aire se mueve a una velocidad determinada esta poseerá una energía cinética dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde:

E_c : Energía cinética [J]

m : Masa de aire [Kg]

v : velocidad del aire [m/s]

La potencia asociada a la energía cinética de una masa de aire que atraviesa un volumen de control, se puede obtener a partir de la derivada de la ecuación 1 para obtener:

$$P_A = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (2)$$

Donde:

P_A : Potencia del aire [W]

\dot{m} : Flujo másico (que expresa la derivada temporal). [Kg/s]

v : Velocidad del fluido [m/s]

Teniendo en cuenta que el flujo másico se puede expresar en función de la densidad del fluido y del área de sección transversal que atraviesa, queda la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \rho * A * v \quad (3)$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico [kg/s]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

v : Velocidad del fluido [m/s]

Al reemplazar la Ecuación 3 en la Ecuación 2 se obtiene como resultado la máxima potencia disponible en el aire que podría ser aprovechable, en función de la densidad:

$$P_A = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (4)$$

Donde:

P_A : Potencia del aire [W]

ρ : densidad del aire [kg/m³]

v : velocidad del aire [m/s]

A : área que atraviesa el viento perpendicular a la dirección. [m²]

Potencia disponible en Quito

La potencia disponible debido a las velocidades más comunes que alcanza el viento en Quito y a diferentes dimensiones de área proyectada por un aerogenerador se analiza a partir de la ecuación 4.

Las velocidades de estudio:

v : 2; 3; 4; 10 [m/s]

Se estudia a partir de los 2m/s debido a que bajo determinadas condiciones aerogeneradores Savonius comienzan a moverse a partir de esta velocidad, sin embargo esto no implica que a partir de esta velocidad todo aerogenerador alcanzará el momento de giro suficiente para iniciar su movimiento.

Área proyectada de estudio:

A: 2; 4; 6; 10 [m²]

La densidad del aire en Quito es $\rho = 0.85$ [Kg/m³]

Se estudia aerogeneradores con áreas proyectadas dentro del rango especificado, puesto que a partir de una determinada dimensión es preferible instalar más aerogeneradores y no uno cada vez más grande, ya que esto implicaría la necesidad de mayor momento de giro inicial, algo que es complicado conseguir en Quito, debido a las bajas velocidades de viento.

Con la aplicación de la ecuación 4 se determinó la potencia disponible en Quito para diferentes velocidades de viento y diferentes áreas, los resultados se muestran en la tabla 1:

Tabla 1

Potencia disponible en Quito a diferentes velocidades y diferente área.

Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Potencia (W)
2	2	6,8
2	3	22,9
2	4	54,4
2	10	850,0
4	2	13,6
4	3	45,9
4	4	108,8
4	10	1700,0
6	2	20,4
6	3	68,8
6	4	163,2
6	10	2550,0
10	2	34,0
10	3	114,7
10	4	272,0
10	10	4250,0

Nota: esto no implica que un aerogenerador iniciará su movimiento a las velocidades señaladas en la tabla 1, esto dependerá especialmente de su fuerza de rozamiento entre las partes y de su inercia.

Potencia aprovechable por un aerogenerador y límite de Betz

El límite de Betz señala la máxima potencia que puede extraer del viento un aerogenerador ideal. “Ningún aerogenerador puede extraer del viento una potencia superior a la fijada por este límite” (Miguel Villarrubia, pp. 134)

La ley de Betz señala que un aerogenerador ideal, como máximo podrá aprovechar el 59% de la energía del viento a la que se expone; esta ley surge a partir del concepto de coeficiente de potencia, que indica relación entre la potencia aprovechable por el rotor y la potencia disponible de viento y se puede expresar:

$$C_p = \frac{P_{eje}}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (5)$$

Donde:

C_p : coeficiente de potencia [adimensional]

P_{eje} : potencia medida en el eje del rotor [W]

ρ : densidad del aire [kg/m^3]

v : velocidad del aire [m/s]

A : área que atraviesa el viento perpendicular a la dirección. [m^2]

o en función de la velocidad del eje y del fluido:

$$C_p = \frac{1}{2} * \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right)^2 * \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \quad (6)$$

Donde:

C_p : coeficiente de potencia [adimensional]

V_2 : velocidad lineal del eje del rotor [m/s]

V_1 : velocidad del viento [m/s]

En consecuencia el valor máximo de $C_p = 16/27$ quedando 0,59 mencionado anteriormente.

Por lo tanto la potencia máxima aprovechable en el eje de un aerogenerador es:

$$P_A = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p \quad (7)$$

Donde:

P_A : Potencia del aire [W]

ρ : densidad del aire [kg/m^3]

v : velocidad del aire [m/s]

A : área que atraviesa el viento perpendicular a la dirección. [m^2]

C_p : coeficiente de potencia [adimensional]

La potencia aprovechable por un aerogenerador ideal en Quito

A partir de la ecuación 7 se calcular la potencia aprovechable por un aerogenerador ideal ($C_p = 0.59$), para diferentes velocidades de viento y áreas proyectadas, tabla 2.

Tabla 2

Potencia aprovechable en Quito por un aerogenerador ideal.

Área (m^2)	Velocidad (m/s)	Potencia (W)
2	2	4,0
2	3	13,5
2	4	32,1
2	10	501,5
4	2	8,0
4	3	27,1
4	4	64,2
4	10	1003,0
6	2	12,1
6	3	40,61
6	4	96,3
6	10	1504,5
10	2	20,1
10	3	67,7
10	4	160,5
10	10	2507,5

Potencia de aerogenerador Savonius ideal en Quito

La potencia ideal de un aerogenerador Savonius es el 33% de la potencia aprovechable por un aerogenerador ideal según (Akwa, J.A, y Petry A.P, (2011)), se determina utilizando la ecuación 7 por un factor de 0.33, tabla 3.

Tabla 3

Potencia aprovechable en Quito por un aerogenerador Savonius ideal.

Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Potencia (W)
2	2	1,3
2	3	4,5
2	4	10,6
2	10	165,5
4	2	2,6
4	3	8,9
4	4	21,2
4	10	331,0
6	2	4,0
6	3	13,4
6	4	31,8
6	10	496,5
10	2	6,6
10	3	22,3
10	4	53,0
10	10	827,5

Arrastre y sustentación

El arrastre y la sustentación son fuerzas ejercidas sobre un cuerpo, por un fluido con movimiento relativo al mismo.

La sustentación

Es la fuerza aplicada en sentido perpendicular al movimiento del cuerpo. Se genera debido a que en la parte superior del cuerpo, el fluido posee una mayor velocidad que en la parte inferior, por lo tanto aplicando el principio de Bernoulli, para compensar la diferencia

de velocidad se genera una gradiente de presión, en la que la presión de la parte superior del cuerpo es menor que la presión de la parte inferior del cuerpo.

En los aerogeneradores Savonius estudiados, la fuerza de sustentación es cero, debido a la simetría que existe entre la parte superior y la inferior

El arrastre

Es una fuerza que se aplica en sentido paralelo al movimiento del cuerpo, mientras. El arrastre se produce debido a los esfuerzos cortantes como a diferencias de presión.

Sobre el aerogenerador Savonius la fuerza que actúa es la de arrastre.

La fuerza de arrastre se expresa:

$$F_D = C_D \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A \quad (8)$$

Donde:

F_D : Fuerza de arrastre [N]

C_D : Coeficiente de arrastre [adimensional]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

A : Área transversal máxima (proyectada) [m²]

Coeficiente de arrastre

Es un número adimensional que depende de la geometría del cuerpo y de su posición con respecto a la dirección de la corriente del fluido y de las características del mismo.

Aerogeneradores a estudiar

Se diseñaron dos aerogeneradores Savonius con álabes de perfil diferente: el primero con álabes con perfil de cicloide (figura 4) y el segundo con álabes de perfil circular (figura5).

Diseño de aerogenerador Savonius

Los aerogeneradores se diseñarán con las siguientes características:

El área proyectada de cada aerogenerador será igual a 2 m².

La altura de cada álabe será de 1000 mm.

La longitud de cada álabe será de 1090.8 mm.

El solapamiento (e) entre los álabes y la longitud que cubre (d), cumple la siguiente relación que según Akwa J. y Petry G. (2011) es la más eficiente para aerogeneradores Savonius, como se muestra en la figura 3.

$$\frac{e}{d} = \frac{1}{6} \quad (9)$$

Donde:

e: solapamiento [m]

d: longitud proyectada del álabe (diámetro para perfil circular) [m]

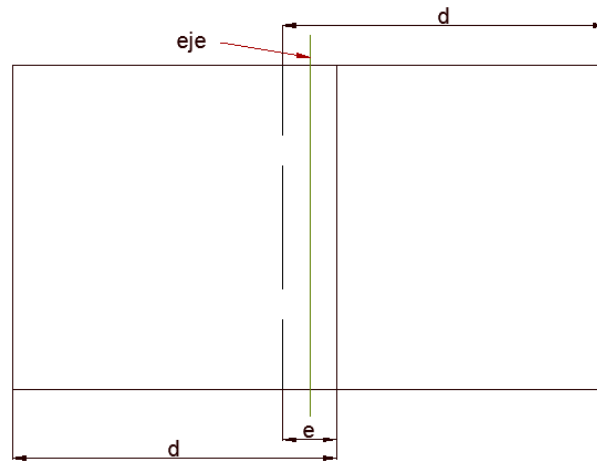


Figura 3. Longitud (d) y solapamiento (e) en relación al eje.

Aerogenerador de álabe Cicloide

La ecuación que representa la cicloide y sirve para que esta pueda ser graficada:

$$x = b * t - b * \text{sen}(t) \quad (10)$$

$$y = b - b * \text{cos}(t)$$

Donde:

x: es la componente en el eje X

y: es la componente en el eje Y

b: es el radio de la circunferencia que genera a la cicloide cuando gira

t : es el ángulo de giro de la circunferencia que genera a la cicloide y constituye el parámetro que produce el cambio en las componentes.

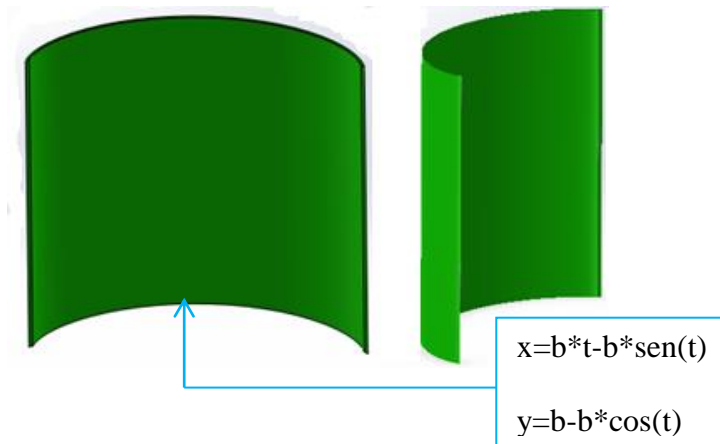


Figura 4. Álabo de perfil cicloide

Para que el aerogenerador cubra un área proyectada de 2m^2 cada álabo debe tener una longitud de 1090.8 mm y una altura de 1m, la ecuación paramétrica de la cicloide que genere el álabo debe ser:

$$X = 347.2124*t - 347.2124*\text{sen}(t) \text{ [mm]} \quad (10,1)$$

$$Y = 347.2124 - 347.2124*\text{cos}(t) \text{ [mm]}$$

para: $0 \leq t \leq 2\pi$

Aerogenerador de álabo Circular

La ecuación que representa la circunferencia y sirve para que esta pueda ser graficada es:

$$x = a + r * \text{cos}(u) \quad (11)$$

$$y = b + r * \text{sen}(u)$$

Donde:

x : es la componente en el eje X

y : es la componente en el eje Y

a : es la coordenada del centro de la circunferencia en el eje X

b: es la coordenada del centro de la circunferencia en el eje Y

u: es el ángulo de giro en el que se generará la circunferencia, y constituye el parámetro que produce la relación de cambio en las componentes.

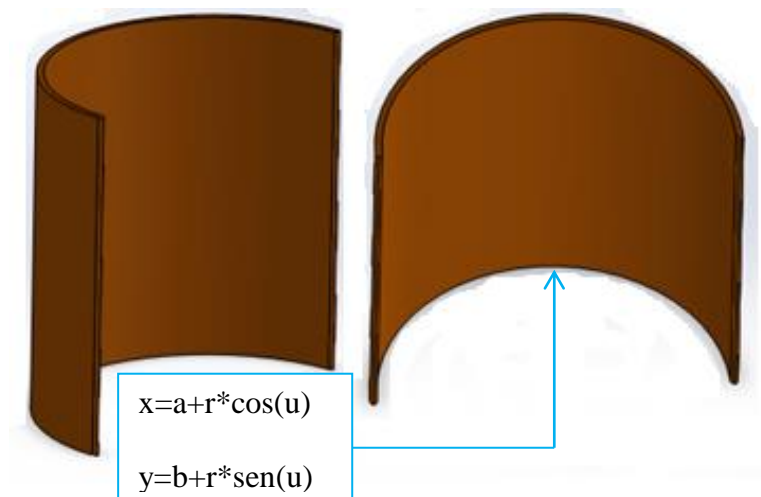


Figura 5. Álabe de perfil circular

Para que el álabe cubra un área proyectada de 2 m^2 con 1 m de altura, la ecuación paramétrica de la circunferencia que genere el álabe debe ser:

$$x = 545.4 \cdot \cos(u) \quad (11,1)$$

$$y = 545.4 \cdot \sin(u)$$

para: $0 \leq u \leq \pi$

Diseño de álabe

El diseño del álabe se realizó a través de elementos finitos de Autodesk Inventor donde los resultados se pueden observar en la tabla 4.

Para confirmar los datos obtenidos, además de verificar la convergencia se procedió a realizar los cálculos de forma analítica.

Tabla 4

Diseño de álabe según condiciones de funcionamiento.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	3420570 mm ^ 3	
Masa	26,8514 kg	
Von Mises estrés	0,0106453 MPa	0,0818113 MPa
Primero Estrés Principal	0,0148694 MPa	0,105919 MPa
Tercera tensión principal	-0,00487079 MPa	0,0351015 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,000141258 mm
Factor de Seguridad	15 ul	15 ul

Se puede concluir que si soportará las cargas solicitadas, debido a que el factor de seguridad es 15 (ul: adimensional), además de ser consecuente con el cálculo analítico que se describe a continuación.

Los álabes son medio cilindros, que soportan esfuerzo radial máximo, y esfuerzo longitudinal nulo.

El esfuerzo radial o tangencial está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_r = \frac{P \cdot D_m}{2 \cdot t} \quad (12)$$

Donde:

σ_r : esfuerzo radial o tangencial.[Pa]

P: presión máxima que soportará el álabe [Pa]

t: espesor del álabe [m]

D_m : diámetro medio [m], que se calcula de la siguiente manera:

$$D_m = D - t \quad (13)$$

Donde:

D: diámetro externo [m]

Desarrollo:

P= 100.2 [Pa]

D= 1.09 [m]

t= 0.002 [m]

De la ecuación 13 se obtiene:

$$D_m = 1.09 - 0.002$$

$$D_m = 1.088 \text{ [m]}$$

De la ecuación 12 se obtiene:

$$\sigma_r = \frac{1 \cdot 1.088}{2 \cdot 0.002}$$

$$\sigma_r = 2754.4 \text{ Pa} = 0.0273 \text{ [MPa]}$$

Coincide con el esfuerzo YZ en análisis.

Diseño del Eje

Para diseñar el eje del aerogenerador se considerará el aerogenerador cicloide cuyas fuerzas de arrastre son mayores las mayores entre los dos. También se considerará las fuerzas incidentes sobre el aerogenerador funcionando a las peores condiciones, que son las que generarán fatiga.

Las peores condiciones permanentes de funcionamiento del aerogenerador se presentan a una velocidad del viento de 4m/s, que generan cargas por fatiga de alto ciclaje.

El eje a utilizar es un tubo de radio diámetro externo de 40mm, espesor 2mm y material acero ASTM A36.

A partir de estos criterios obtenemos los datos:

Fuerza de arrastre en la parte frontal (F_{D1}): 68.7 [N]

Fuerza de arrastre en la parte posterior (F_{D2}): 41.29 [N]

Peso del aerogenerador (P): 58,8 [N]

Resistencia última a la tracción (S_{ut}): 310 [MPa]

Resistencia mínima a la tracción (S_y): 228 [MPa]

Espesor del eje (e): 0.002m

Diámetro mayor del eje (D): 0.042m

Diámetro menor del eje (d): 0.038m

Distancia desde el eje hacia el centro de aplicación de la fuerza F_{D1} y F_{D2} (L): 0.45 m

Distancia desde la el extremo del eje hacia el centro del mismo (l): 0.5 m

Para analizar las fuerzas sobre el eje se procede a realizar un diagrama donde se visualicen cada una de ellas y sus efectos (figura 6).

Las fuerzas aplicadas se simplifican para poder realizar el diagrama de cuerpo libre:

Donde:

F_D : Fuerza producto de la suma de F_{D1} y F_{D2} .

M: momento flector generado por la fuerza F_D .

T: momento torsor generado por la fuerza F_D .

$$F_D = F_{D1} + F_{D2} \quad (14)$$

$$F_D = 68.7 + 41.29$$

$$F_D = 109.99 \text{ N}$$

$$M = F_D * l \quad (15)$$

$$M = 54.995 \text{ Nm}$$

$$T = (F_{D1} * L) - (F_{D2} * L) \quad (16)$$

$$T = 12.425 \text{ Nm}$$

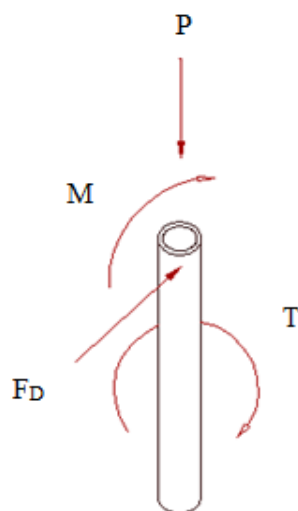


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre del eje.

Luego se determinan los esfuerzos producidos por el momento flector, el momento torsor, la fuerza F_D , y el peso.

σP : esfuerzo norma causado por el peso.

σM : esfuerzo normal causado por el momento flector.

τM : esfuerzo cortante causado por el momento flector.

τF_D : esfuerzo cortante causado por la fuerza F_D .

τt : esfuerzo cortante caudado por el momento torsor.

τtl : esfuerzo cortante caudado por el momento torsor.

$$\sigma P = \frac{4 * P}{\pi * (D^2 - d^2)} \quad (17)$$

$$\sigma P = -0.479 \text{ MPa}$$

$$\sigma M = \frac{32 * M * D}{\pi * (D^2 - d^2)} \quad (18)$$

$$\sigma M = 0.14 \text{ MPa}$$

$$\tau F_D = \frac{4 * F_D}{\pi * (D^2 - d^2)} \quad (19)$$

$$\tau F_D = 0.89 \text{ MPa}$$

$$\tau t = \frac{16 * D * T}{\pi * (D^4 - d^4)} \quad (20)$$

$$\tau t = 5.33 \text{ MPa}$$

$$\tau M = \frac{16 * F_D * (D^3 - d^3)}{\pi * e * (D^4 - d^4)} \quad (21)$$

$$\tau M = 5.38 \text{ MPa}$$

$$\tau tl = \tau F_D + \tau t + \tau M \quad (22)$$

$$\tau tl = 11.62 \text{ MPa}$$

A continuación se hallan los esfuerzos máximo y mínimo de las cargas oscilantes, para poder calcular las componentes alternativa y media del esfuerzo repetido.

σ_{min} : esfuerzo mínimo.

σ_{max} : esfuerzo máximo

σ_m : esfuerzo medio

σ_a : esfuerzo amplitud

$$\sigma_{min} = \sigma_P + \sigma_M \quad (23)$$

$$\sigma_{min} = -0.33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_P - \sigma_M \quad (24)$$

$$\sigma_{max} = -0.623 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (25)$$

$$\sigma_m = -0.47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (26)$$

$$\sigma_a = 0.14 \text{ MPa}$$

Se procede a calcular los esfuerzos de Von Misses:

σ_A : esfuerzo alternativo de Von Misses.

σ_{Mm} : esfuerzo medio de Von Misses.

$$\sigma_A = \sqrt{\sigma_a^2 + 3 * \tau t l^2} \quad (27)$$

$$\sigma_A = 20.0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Mm} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3 * \tau t l^2} \quad (28)$$

$$\sigma_{Mm} = 20.0118 \text{ MPa}$$

Se debe determinar el límite de resistencia a la fatiga teórica, para luego poder calcular la resistencia a la fatiga para las condiciones de funcionamiento reales.

Para aceros en límite a la fatiga teórica se calcula:

S'_e : límite de resistencia a la fatiga teórica.

S_{ut} : resistencia última a la tensión.

S_e : límite de resistencia a la fatiga corregido.

C_{carga} : factor de carga de reducción de resistencia: 1

$C_{tamaño}$: factor de tamaño de reducción de resistencia: 0.83

$C_{superficie}$: factor de carga de reducción de resistencia: 0.98

$C_{temperatura}$: factor de temperatura de reducción de resistencia: 1

C_{confi} : factor de confiabilidad de reducción de resistencia: 1

$$S'_e \cong 0.5 S_{ut} \quad (29)$$

$$S'_e = 155 \text{ MPa}$$

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confi} S'_e \quad (30)$$

$$S_e = 127.31 \text{ MPa}$$

Finalmente se aplica uno de los métodos clásicos de diseño a fatiga de alto ciclaje como el método de Goodman Modificado, así se determina el coeficiente de seguridad, considerando que este sea mayor a uno para este tipo de máquina, en caso de no cumplirse se repite el método para otro perfil de manera iterativa.

N: Factor de seguridad

$$N = \frac{1}{\left(\frac{\sigma A}{S_e} + \frac{\sigma M m}{S_{ut}}\right)} \quad (31)$$

$$N = 4.50$$

El factor de seguridad de 4.5 es suficiente puesto que un factor de seguridad de 4 o mayor se considera para “diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con incertidumbre en cuanto alguna combinación de cargas, propiedades del material, análisis de esfuerzo o el ambiente”(Mott 2004), por lo tanto está bien seleccionado ya que el diseño está dentro de este criterio y existe incertidumbre debido ráfagas de viento (análisis ambiental), inusuales ráfagas de 16 m/s se han presentado en el verano, por lo tanto se debe garantizar que el eje también soportará estas cargas por fatiga de bajo ciclaje, con este siguiente análisis a 16 m/s:

Fuerza de arrastre en la parte frontal (F_{D1}): 263 N

Fuerza de arrastre en la parte posterior (F_{D2}): 193 N

Peso del aerogenerador (P): 58,8 N

Resistencia última a la tracción (S_{ut}): 310 Mpa,

Resistencia mínima a la tracción (S_y): 228MPa.

Espesor del eje (e): 0.002m

Diámetro mayor del eje (D): 0.042m

Diámetro menor del eje (d): 0.038m

Distancia desde el eje hacia el centro de aplicación de la fuerza F_{D1} y F_{D2} (L): 0.45 m

Distancia desde la el extremo del eje hacia el centro del mismo (l): 0.5 m

$$F_D = F_{D1} + F_{D2} \quad (14)$$

$$F_D = 263 + 193$$

$$F_D = 456 \text{ N}$$

$$M = F_D * l \quad (15)$$

$$M = 228 \text{ Nm}$$

$$T = (F_{D1} * L) - (F_{D2} * L) \quad (16)$$

$$T = 31.731 \text{ Nm}$$

Luego se determinan los esfuerzos producidos por el momento flector, el momento torsor, la fuerza F_D , y el peso.

$$\sigma_P = \frac{4 * P}{\pi * (D^2 - d^2)} \quad (17)$$

$$\sigma_P = 0.4799 \text{ MPa}$$

$$\sigma_M = \frac{32 * M * D}{\pi * (D^2 - d^2)} \quad (18)$$

$$\sigma_M = 0.3 \text{ MPa}$$

$$\tau_{FD} = \frac{4 * F_D}{\pi * (D^2 - d^2)} \quad (19)$$

$$\tau FD = 3.7218 \text{ MPa}$$

$$\tau t = \frac{16 * D * T}{\pi * (D^4 - d^4)} \quad (20)$$

$$\tau t = 13.61 \text{ MPa}$$

$$\tau M = \frac{16 * F_D * (D^3 - d^3)}{\pi * e * (D^4 - d^4)} \quad (21)$$

$$\tau M = 22.32 \text{ MPa}$$

$$\tau tl = \tau FD + \tau t + \tau M \quad (22)$$

$$\tau tl = 39.655 \text{ MPa}$$

A continuación se hallan los esfuerzos máximo y mínimo de las cargas oscilantes, para poder calcular las componentes alternativa y media del esfuerzo repetido.

$$\sigma min = \sigma P + \sigma M \quad (23)$$

$$\sigma min = -1.074 \text{ MPa}$$

$$\sigma max = \sigma P - \sigma M \quad (24)$$

$$\sigma max = 0.115 \text{ MPa}$$

$$\sigma m = \frac{\sigma max + \sigma min}{2} \quad (25)$$

$$\sigma m = -0.47 \text{ MPa}$$

$$\sigma a = \left| \frac{\sigma max - \sigma min}{2} \right| \quad (26)$$

$$\sigma a = 0.595 \text{ MPa}$$

Se procede a calcular los esfuerzos de Von Misses:

σA : esfuerzo alternativo de Von Misses.

σMm : esfuerzo medio de Von Misses.

$$\sigma A = \sqrt{\sigma a^2 + 3 * \tau tl^2} \quad (27)$$

$$\sigma A = 68.68 \text{ MPa}$$

$$\sigma Mm = \sqrt{\sigma m^2 + 3 * \tau tl^2} \quad (28)$$

$$\sigma_{Mm}=68.68 \text{ MPa}$$

Se debe determinar el límite de resistencia a la fatiga teórica, para luego poder calcular la resistencia a la fatiga para las condiciones de funcionamiento reales.

Para aceros en límite a la fatiga teórica se calcula:

$$S'_e \cong 0.5 S_{ut} \quad (29)$$

$$S'_e = 155 \text{ MPa}$$

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confi} S'_e \quad (30)$$

$$S_e = 127.31 \text{ MPa}$$

Finalmente se aplica uno el método de Goodman Modificado de diseño a fatiga de bajo ciclaje, así se determina el coeficiente de seguridad, para este caso particular.

Se determina la resistencia del material a los 10^3 ciclos:

$$S_m = 0.75 S_{ut} \quad (31)$$

$$S_m = 232.5 \text{ Pa}$$

S_m : resistencia del material a 10^3 ciclos

La resistencia a la fatiga de bajo ciclaje se calcula con la expresión :

$$S_n = A * n^B \quad (32)$$

S_n : resistencia a la fatiga en bajo ciclaje

n: número de ciclos entre 10^3 y 10^6

B: factor que se obtiene:

$$B = \frac{1}{-3} * \log\left(\frac{S_m}{S_e}\right) \quad (33)$$

$$B = -0.0867$$

A: factor que se obtiene a partir de:

$$\log(A) = \log(S_m) - 3B \quad (34)$$

$$A = 4.23 * 10^8$$

Reemplazando los valores de A y B en la ecuación 33, y considerando $n=10^6$ que es el valor más conservador en bajo ciclaje se obtiene:

$$S_n = 1.277 * 10^8$$

N: Factor de seguridad

$$N = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_A}{S_n} + \frac{\sigma_{Mm}}{S_{ut}}\right)} \quad (35)$$

$$N = 4.5$$

El factor de seguridad de 4.5, y es correcto, puesto que satisface el criterio mencionado anteriormente para el diseño del eje a alto ciclaje.

Momento de inercia másico

Además tener que superar de la fuerza de rozamiento debido a los rodamientos, que son los mismos para ambos aerogeneradores con el fin de mantener la igualdad de condiciones, los aerogeneradores momento de inercia másico es definido como “Una medida de la resistencia del cuerpo a ser acelerado en su rotación” (J.L Meriam/ L.G Kraige, Editorial Reverté, Barcelona, España 2012.). El estudio de la inercia de los álabes de cada aerogenerador es importante, porque determina que aerogenerador alcanzará una mayor aceleración.

La expresión que describe a la inercia es la siguiente:

$$I = \sum r_i^2 * m_i \quad (36)$$

Donde:

I: momento de inercia másico

r: radio de giro respecto al eje centroidal

m: masa del cuerpo en estudio

Para determinar el momento de inercia másico alrededor de un eje paralelo al eje centroidal se utiliza el teorema de Steiner que está dado por:

$$I = \bar{I} + m * d^2 \quad (37)$$

Donde:

I: momento de inercia másico respecto a un eje paralelo al eje centroidal

\bar{I} : momento de inercia másico respecto al eje centroidal

d: distancia entre el eje centroidal y un eje paralelo.

m: masa del cuerpo en estudio

Se determina el momento de inercia másico para los álabes de perfil de cicloide y para el álabe de perfil circular, en el apéndice B.

Simulación

Una vez diseñados los álabes, se procede a realizar las diferentes pruebas aerodinámicas dentro de un túnel de viento virtual donde el propósito principal es hallar el coeficiente de arrastre, la fuerza de arrastre y la presión estática en cada álabe.

A partir de los resultados obtenidos se calcula el momento de giro que producirá cada aerogenerador a diferentes velocidades.

El rango de velocidades a las cuales se estudiaron los aerogeneradores está entre 2 m/s puesto que el aerogenerador Savonius inicia su movimiento a partir de esta velocidad y 10 m/s ya que es la velocidad que alcanzan las ráfagas de viento en Quito durante el verano, como puede observarse en el apéndice B.

Diseño y modelado en Autodesk Inventor

En Autodesk Inventor se diseña el perfil del álabe introduciendo la ecuación paramétrica de cada uno de los perfiles, figura 7.

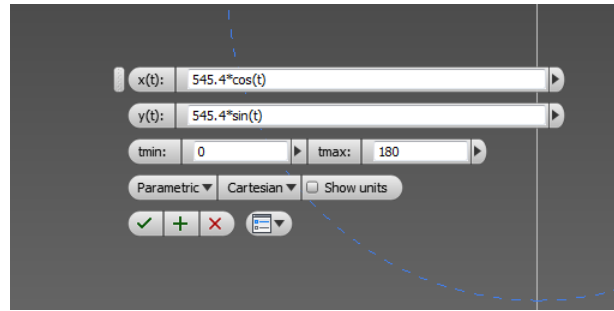


Figura 7. Diseño del perfil del álabe en Autodesk Inventor

Luego se da un espesor de 2 mm al perfil para posteriormente generar una extrusión igual a la altura del aerogenerador a estudiar, figura 8.

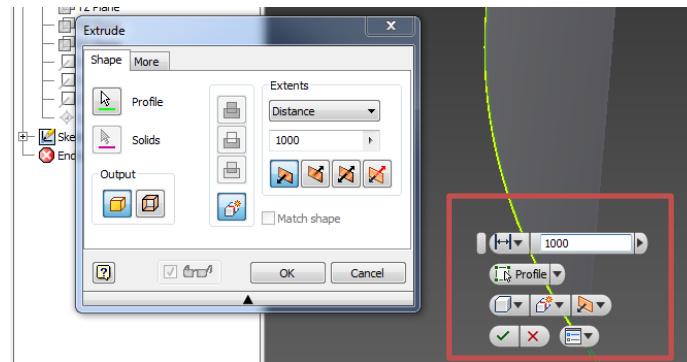


Figura 8. Extrusión del perfil del álabe en Autodesk Inventor

Análisis en Autodesk Inventor

Para el diseño estructural del álabe se utilizó una de las herramientas de Inventor incluidas en el programa (Stress Analysis), figura 9.

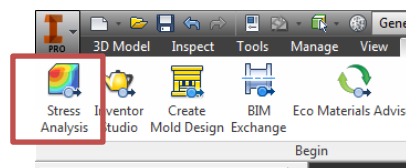


Figura 9. Selección de análisis de esfuerzo en Inventor.

Dentro del análisis el primer paso es asignar un material al objeto a analizar, se muestra en la figura 10.

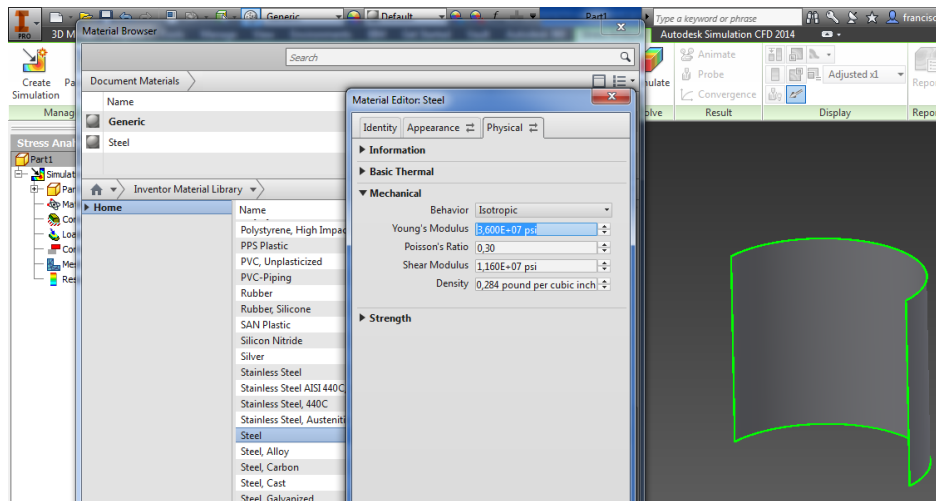


Figura 10. Aplicación de material para estudio de esfuerzos

Luego se definen las condiciones de mallado, figura 11.

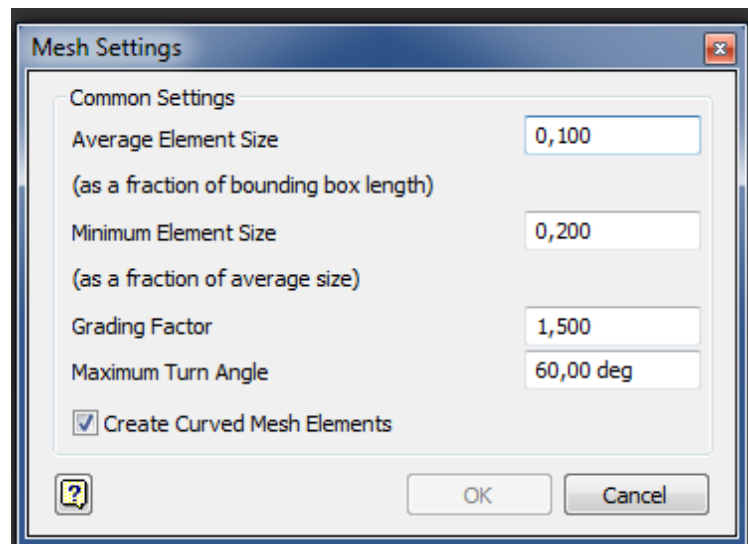


Figura 11. Herramientas para configuración de mallado

- Average Element Size: Es la distancia promedio entre los nodos, para valores altos produce una malla más grande. Valores recomendados entre 0.1 y 0.05.
- Minimum Element Size: Es la distancia mínima entre nodos que se producirá durante la refinación automática, a valores pequeños aumenta la calidad del análisis. Valores recomendados entre 0.1 y 0.3.

- Grading Factor: determina la transición en mallados de diferente tamaño, permite la generación de mallas uniformes, a mayores valores genera mallas menos uniformes. Valores recomendados 1.5 y 3
- Maximun Turn Angle: permite determinar el ángulo de arco, la malla se refina a valores más pequeños. Valores recomendados entre 30 y 60.
- Create Curved Mesh Elements: Si no se activa usa solo elementos rectos, es necesario activarlo para crear malla en aristas y caras curvas.

A continuación se asigna las restricciones del análisis que más se ajusten a las condiciones reales de funcionamiento, después se procede a realizar el mallado automático antes de iniciar el estudio.

El refinamiento de la malla se realiza en el programa mediante el método de refinamiento H, que permite refinar la malla de manera iterativa después de haber comparado dos soluciones, el refinamiento se realiza hasta alcanzar la convergencia, donde dos soluciones ya no difieren o difieren dentro de un porcentaje establecido por el diseñador.

El mallado se realiza automáticamente, con elementos triangulares, puesto que estos se adaptan mejor a cambios en el mallado y si se requiere cuadriláteros, se forman uniendo dos triángulos con una arista en común observar figura 12.

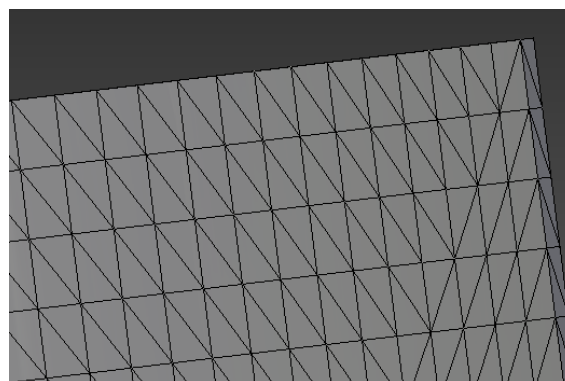


Figura 12. Visualización de mallado en Inventor.

Los ajustes de convergencia se pueden realizar con los comandos que se muestran en la figura 13.

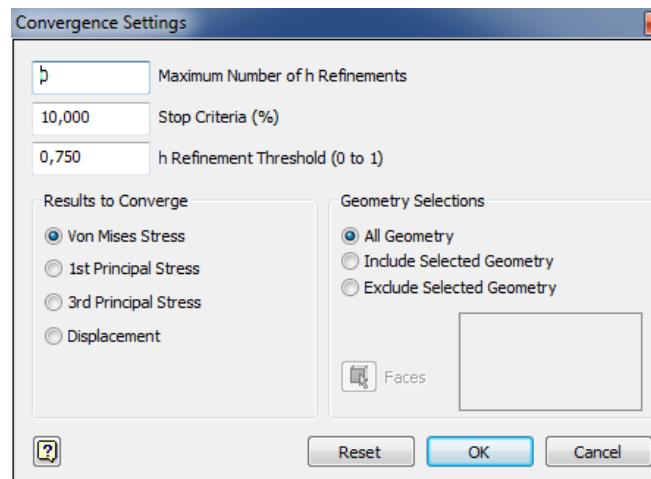


Figura 13. Configuración de datos de convergencia.

Las principales condiciones y ajustes que se deben configurar para el mallado son:

- Maximum Number of h Refinement: se refiere al número de ciclos máximo de refinamiento. Valores aceptados entre 1 y 5
- Stop Criteria (%) : Cuando los valores del análisis de dos ciclos continuos son menores al este valor el análisis se detiene incluso si no se completaron los números de ciclos establecidos.
- H Refinement : se refiere al porcentaje de elementos a refinar durante el análisis, uno significa no refinar ninguno, cero significa refinar todos. Valores recomendados entre 0.1 y 0.75

Se procede a realizar el estudio, figura 14.

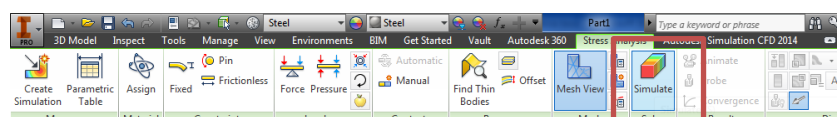


Figura 14. Inicialización del estudio en inventor

Al final del estudio se puede observar los datos de convergencia con la herramienta “Convergence”, donde la razón de convergencia también constituye un parámetro de cuantificación del error que se puede controlar, figura 15.

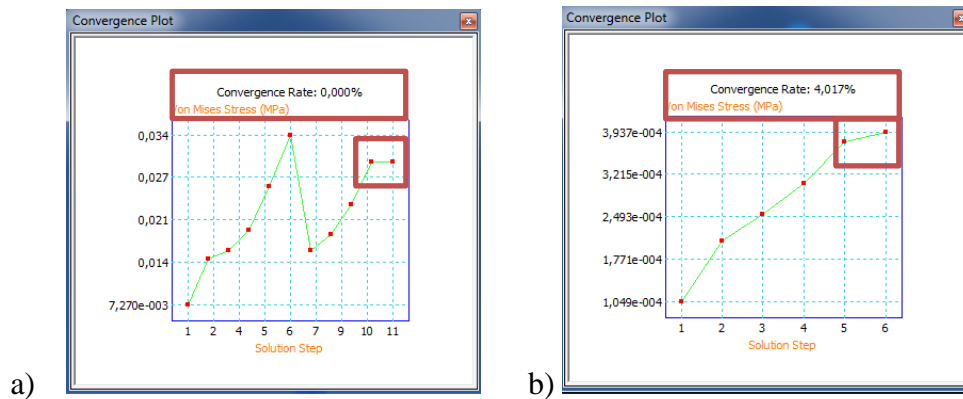


Figura 15. Visualización de gráfico de convergencia (a) y no convergencia (b).

Nota: En la figura a) se observan los puntos transitorios hasta llegar al punto 10 donde se cumple la convergencia, y que llega a una razón de convergencia de 0% donde la pendiente de la recta de convergencia es cero, también se observa en b) que no converge y llega a un error de razón de convergencia de 4.017%, donde la pendiente de la recta es diferente de cero.

Análisis en Autodesk CFD

Terminada el álabe, se procede a realizar el análisis aerodinámico, para determinar la presión y la fuerza de arrastre, en el programa Autodesk Simulation CFD (CFD), que se puede activar a partir de Inventor directamente, haciendo clic en la pestaña superior con el mismo nombre del programa, figura 16.

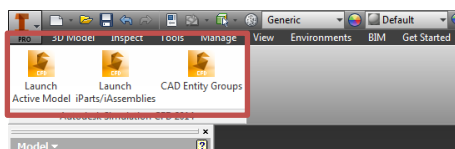


Figura 16. Vínculo Autodesk inventor y CFD

Dentro del programa CFD, procedemos generar una nueva geometría que constituirá el volumen del túnel de viento, figura 17.

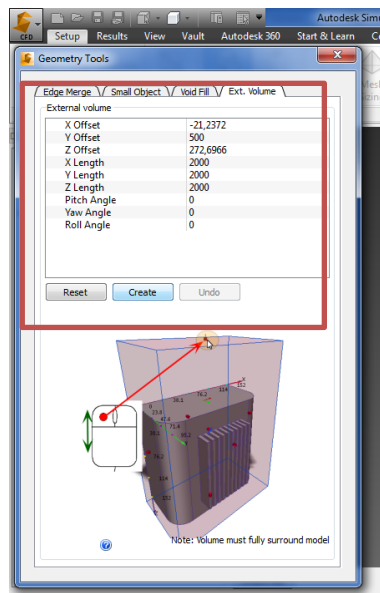


Figura 17. Creación de geometría de túnel de viento en CFD.

Una vez con las dos geometrías, se les asigna el material: para el álabe acero, y para el fluido aire, figura 18.

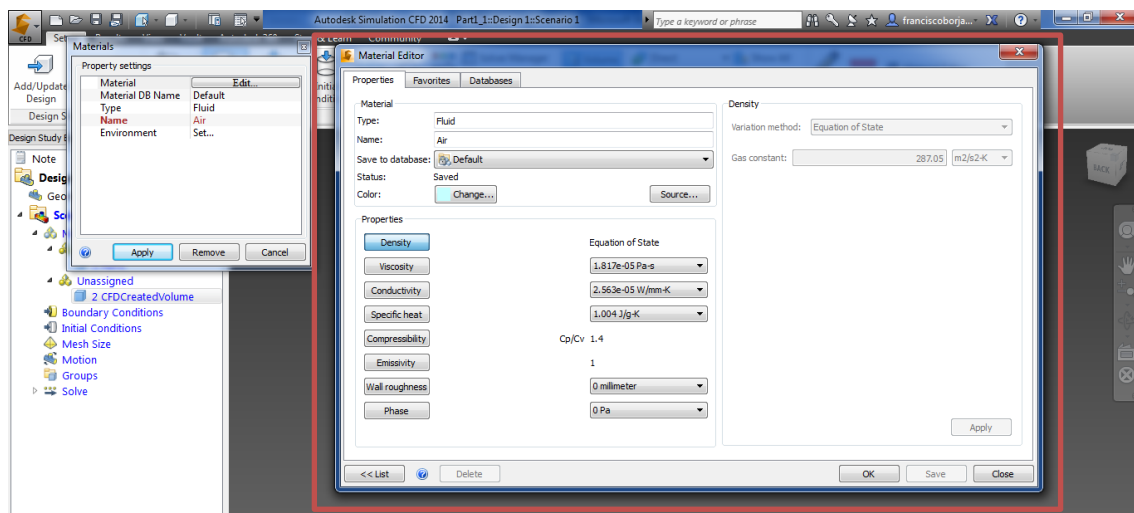


Figura 18. Asignación de material en CFD.

Luego se determinan las condiciones de presión y velocidad del viento, figura 19.

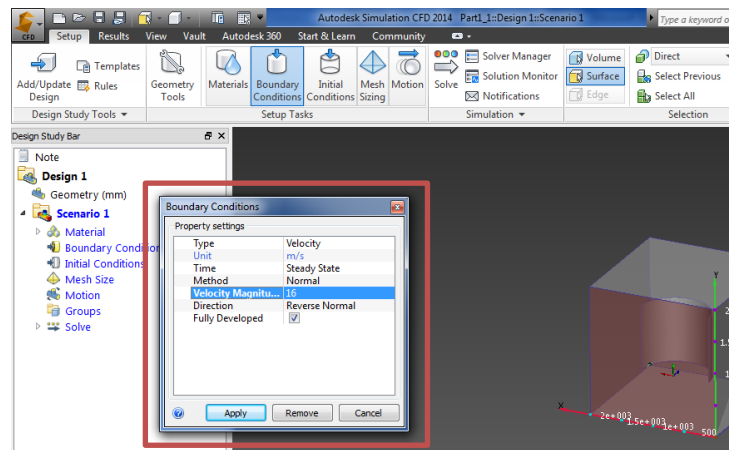


Figura 19. Asignación de condiciones de análisis.

Después se seleccionan las condiciones de mallado para en estudio a realizar se puede observar en la figura 20:

- Surface refinement: se refina la malla superficial de todo el elemento automáticamente.
- Gap refinement: refina la dimensión y geometría de la malla automáticamente.

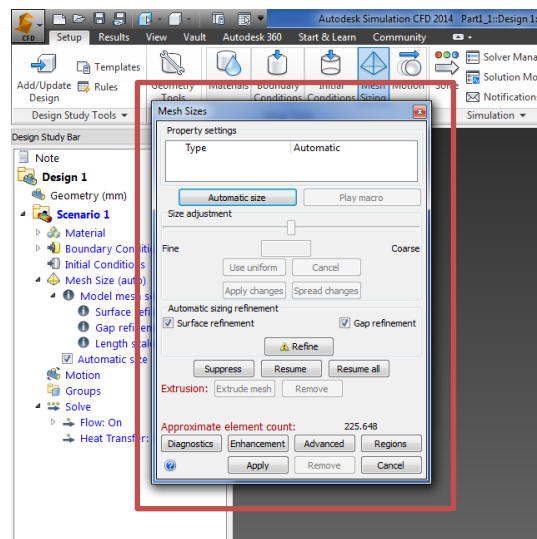


Figura 20. Condiciones de mallado en CFD

Antes de iniciar el análisis se selecciona el número de iteraciones de estudio para que llegue a una convergencia el programa, para este cumplir con este objetivo se recomienda asignar un número elevado de iteraciones, mayor a las que viene por defecto en el programa, ya que el programa posee un sistema de convergencia automático el cual hace que se detenga

en el momento de convergencia antes de terminar todas la iteraciones. Para este caso en particular se han seleccionado 500 iteraciones, figura 21.

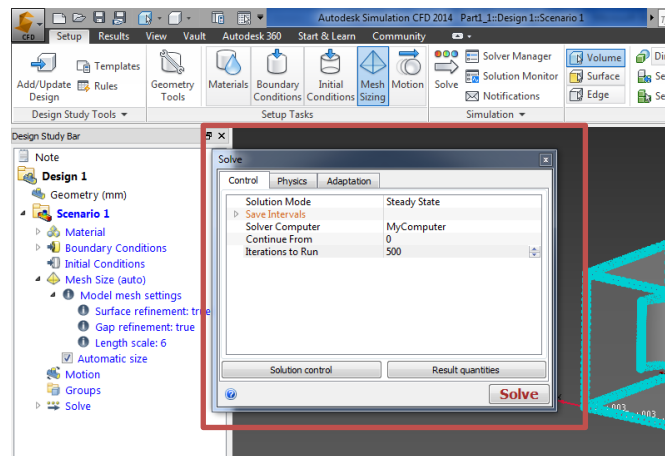


Figura 21. Inicialización del análisis en CFD.

La convergencia se alcanza a partir de la iteración 266, donde el estudio se detiene automáticamente indicándonos que no es necesario continuar hasta la iteración 500.

La convergencia se puede verificar observando que la gráfica de la magnitud a estudiar alcance una pendiente igual a cero, figura 22.

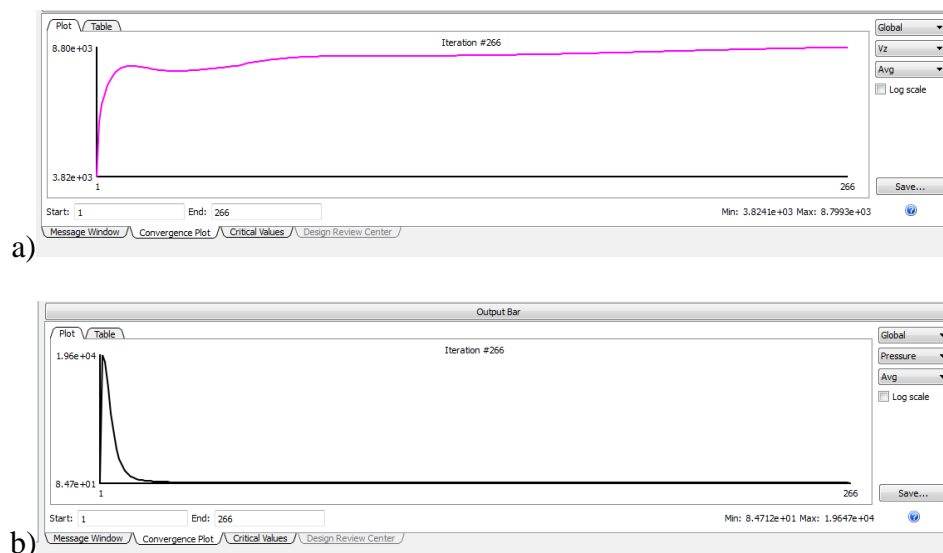


Figura 22. Gráfico de convergencia de a) velocidad y b) presión.

Los valores de la convergencia se pueden visualizar en el cuadro de resultados, donde efectivamente se verifica la convergencia, figura 23.

Plot	Table	Plot	Table
	256 8.6283e+01		256 8.7777e+03
	257 8.6058e+01		257 8.7799e+03
	258 8.5974e+01		258 8.7821e+03
	259 8.5846e+01		259 8.7841e+03
	260 8.5561e+01		260 8.7865e+03
	261 8.5425e+01		261 8.7887e+03
	262 8.5189e+01		262 8.7907e+03
	263 8.5115e+01		263 8.7930e+03
	264 8.5004e+01		264 8.7949e+03
	265 8.4815e+01		265 8.7969e+03
	266 8.4712e+01		266 8.7993e+03

Start: 1 End: 266 Start: 1 End: 266

Message Window Convergence Plot Critica Message Window Convergence Plot Critica

Figura 23. Cuadro de valores de las iteraciones en CFD.

Análisis en Autodesk Flow Design

El análisis aerodinámico también se lo puede realizar en el programa Autodesk Flow Design, dentro del mismo entorno de Inventor , figura 24.

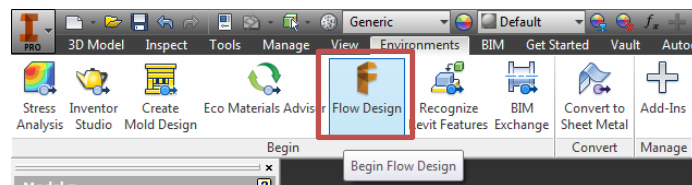


Figura 24. Vinculo Inventor y Flow Design.

Desde inventor se inicializa el programa, figura 25.

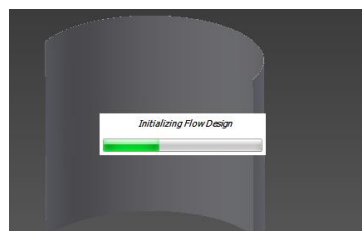


Figura 25. Inicio de Flow Design en Inventor.

A continuación se da la orientación al fluido, de manera que este sea ortogonal al plano proyectado por la concavidad del álabe, figura 26.

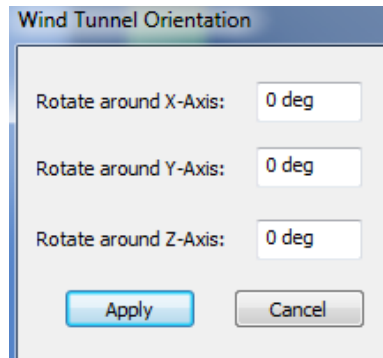


Figura 26. Orientación de la dirección del viento en Flow Design

Después se indica la velocidad del fluido, Figura 27.

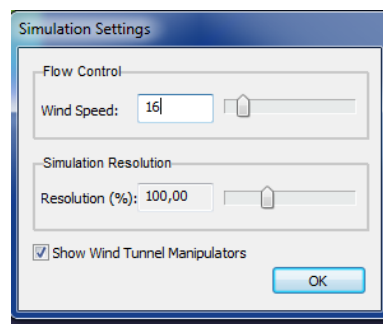


Figura 27. Asignación de la velocidad en Flow Design.

El programa posee un sistema de auto convergencia, que se puede observar en la parte derecha superior de la pantalla donde se puede visualizar “Transient” en color amarillo, mientras los resultados no convergen o se encuentran en estado transitorio, figura 28.

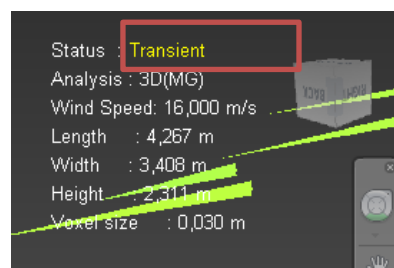


Figura 28. Estado de transición y de no convergencia en Autodesk Flow Design.

Cuando los resultados convergen se puede observar en la parte derecha superior Cambia el estado de “Trarnsient” por “Stabilized” en color verde, figura 29.

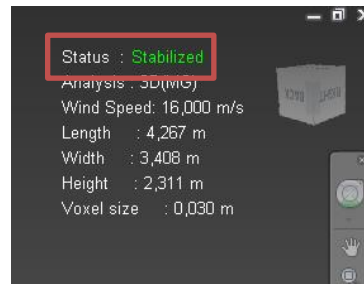


Figura 29. Estado de convergencia en Autodesk Flow Design

Entre los análisis de Autodesk Flow Design y CFD no hubo resultados con diferencias notables entre uno y otro, esto confirma la confiabilidad de los resultados obtenidos, además porque los dos programas tienen la misma plataforma de Autodesk Inventor.

Resultados

Datos obtenidos para el perfil de álabe de cicloide

Tabla 5

Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, a diferentes velocidades de viento, para la sección posterior de un álabe de perfil cicloide

Perfil cicloide (Sección Posterior)

Velocidad del Viento (m/s)	Pres. Máx. superficie (Pa)	Fuerza de Arrastre(N)	Momento Giratorio (N.m)
2,0	3,2	10,3	8,4
2,5	5,1	15,8	12,9
3,0	7,27	22,8	18,7
3,5	10,2	31,5	25,8
4,0	13,2	41,3	33,8
4,5	16,9	53,7	44,0
5,0	20,6	66,4	54,4
5,5	25,8	86,8	71,2
6,0	30,7	103,5	84,8
7,0	46,9	134,5	110,3
8,0	55,1	184,1	150,9
9,0	71,4	236,8	194,2
10,0	100,2	285,4	234,0

Tabla 6

Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, a diferentes velocidades de viento, para la sección posterior de un álabe de perfil cicloide

Perfil cicloide (Sección Frontal)

Velocidad del Viento (m/s)	Pres. Máx. superficie (Pa)	Fuerza de Arrastre (N)	Momento Giratorio (N.m)
2,0	3,5	16,1	13,2
2,5	5,5	25,1	20,6
3,0	8,1	37,2	30,5
3,5	10,9	51,1	41,9
4,0	14,7	68,7	56,3
4,5	18,6	87,3	71,6
5,0	23,8	112,4	92,1
5,5	28,0	136,2	111,7
6,0	33,2	159,4	130,7
7,0	45,1	216,8	177,7
8,0	62,3	287,9	236,1
9,0	77,3	364,2	298,7
10,0	97,6	470,0	385,4

Tabla 7

Momento giratorio total que se obtiene de la diferencia del momento giratorio de la parte frontal menos el momento giratorio de la parte posterior

TOTAL Experimental

Velocidad del Viento (m/s)	Momento Giratorio Resultante (N.m)
2,0	4,8
2,5	7,6
3,0	11,8
3,5	16,1
4,0	22,5
4,5	27,6
5,0	37,7
5,5	40,5
6,0	45,9
7,0	67,5
8,0	85,1
9,0	104,5
10,0	151,4

Nota: El momento giratorio total se obtiene de la diferencia del momento giratorio de la parte frontal de la tabla 2 menos el momento giratorio de la parte posterior de la tabla 1.

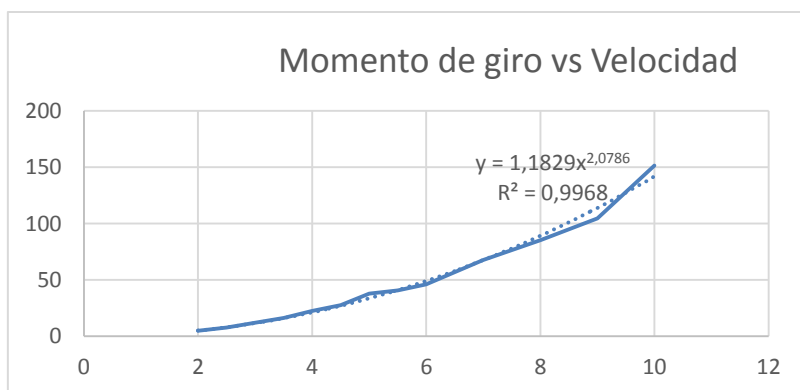


Figura 30. Análisis momento de giro vs velocidad, además ecuación (potencial) obtenida a partir de los datos experimentales (series 1).

Datos obtenidos para el perfil de álabe de circular

Tabla 8

Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, para diferentes velocidades de viento, para la sección posterior de un álabe de perfil circular

Perfil circular (Sección Posterior)

Velocidad del Viento (m/s)	Pres. Máx. superficie (Pa)	Fuerza de Arrastre(N)	Momento Giratorio (N.m)
2,0	2,4	6,3	5,1
2,5	3,8	9,9	8,2
3,0	5,5	14,4	11,8
3,5	7,3	16,6	13,6
4,0	9,4	21,5	17,6
4,5	11,8	31,9	26,2
5,0	14,9	35,5	29,1
5,5	18,0	42,9	35,2
6,0	21,7	59,3	48,6
7,0	29,5	80,2	65,8
8,0	38,8	100,3	82,2
9,0	48,9	126,4	103,6
10,0	60,1	154,5	126,7

Tabla 9

Presión, fuerza de arrastre y momento giratorio, para diferentes velocidades de viento, para la sección frontal de un álabe de perfil circular

Perfil circular(Sección Frontal)

Velocidad del Viento (m/s)	Pres. Máx. superficie (Pa)	Fuerza de Arrastre (N)	Momento Giratorio (N.m)
2,0	2,6	11,3	9,3
2,5	4,1	17,4	14,3
3,0	6,0	26,1	21,4
3,5	8,1	36,0	29,5
4,0	10,8	47,8	39,2
4,5	13,5	60,8	49,8
5,0	16,7	75,1	61,6
5,5	20,6	92,1	75,5
6,0	24,4	109,4	89,7
7,0	33,7	153,1	125,5
8,0	44,0	200,1	164,0
9,0	55,5	253,8	208,1
10,0	68,8	312,0	255,8

Tabla 10

Momento giratorio total que se obtiene de la diferencia del momento giratorio de la parte frontal menos el momento giratorio de la parte posterior

TOTAL Experimental

Velocidad del Viento (m/s)	Momento Giratorio Resultante (N.m)
2,0	4,2
2,5	6,2
3,0	9,5
3,5	15,9
4,0	21,5
4,5	23,3
5,0	32,5
5,5	40,3
6,0	41,0
7,0	59,7
8,0	81,8
9,0	104,5
10,0	129,2

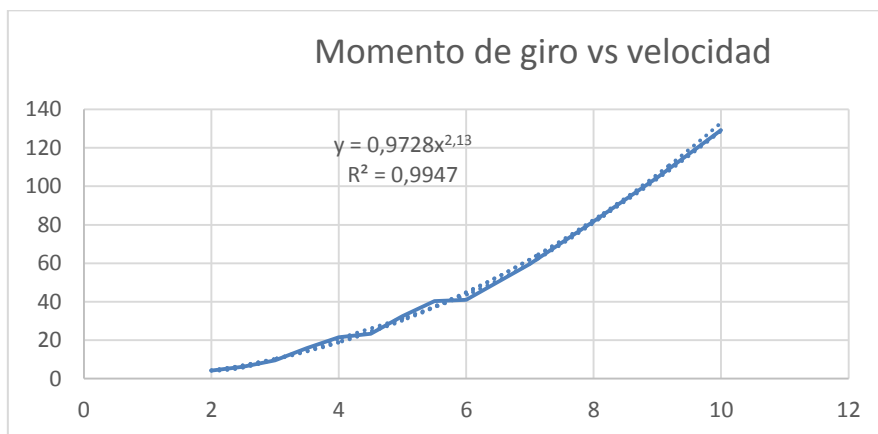


Figura 31. Análisis momento de giro vs velocidad, además ecuación obtenida a partir de los datos experimentales.

Comparación entre perfil cicloide y perfil circular

Tabla 11

Comparación entre momento giratorio total del perfil cicloide y del perfil circular, alcanzado a diferente velocidad del viento (datos experimentales).

Con datos Experimentales

Velocidad del Viento (m/s)	Momento Giratorio CICLOIDE	Momento Giratorio CIRCULAR
2,0	4,8	4,2
2,5	7,6	6,2
3,0	11,8	9,5
3,5	16,1	15,92
4,0	22,5	21,6
4,5	27,6	23,8
5,0	37,7	32,6
5,5	40,5	40,4
6,0	45,8	41,0
7,0	67,5	59,7
8,0	85,1	81,8
9,0	104,5	104,5
10,0	151,3	129,2

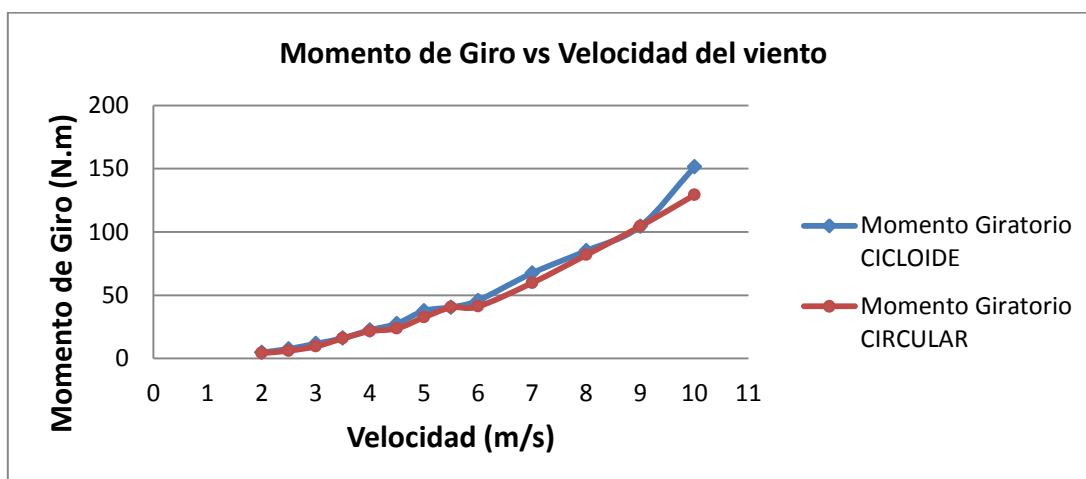


Figura 32. Análisis momento de giro vs velocidad, de los datos experimentales del aerogenerador de perfil circular comparado con el aerogenerador de perfil cicloide.

Tabla 12

Comparación entre momento giratorio total del perfil cicloide y del perfil circular, alcanzado a diferente velocidad del viento (datos a partir de ecuaciones).

Con datos de las Ecuaciones

Velocidad del Viento (m/s)	Momento Giratorio CICLOIDE	Momento Giratorio CIRCULAR
2,0	4,9	4,3
2,5	7,9	6,9
3,0	11,5	2,0
3,5	15,8	14,2
4,0	20,8	18,8
4,5	26,6	24,2
5,0	33,1	30,3
5,5	40,4	37,2
6,0	48,3	44,7
7,0	66,5	62,2
8,0	87,7	82,8
9,0	111,8	106,5
10,0	139,2	133,3

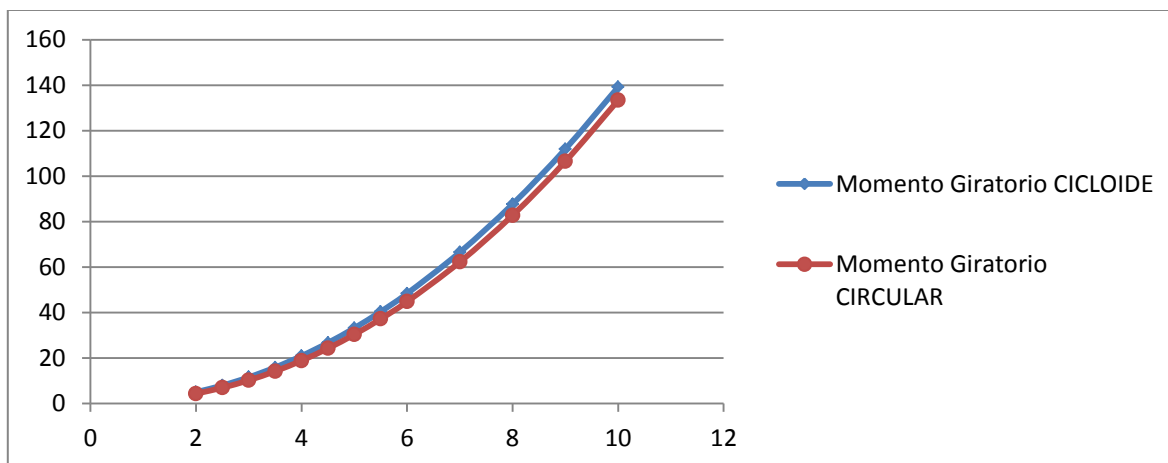


Figura 33. Análisis momento de giro vs velocidad, de los datos de las ecuaciones

determinadas para aerogenerador de perfil circular comparado con el aerogenerador de perfil cicloide.

En la tabla 13 se observa el error porcentual de la comparación entre los resultados obtenidos de forma analítica y los datos de la simulación, para el diseño de las principales partes del aerogenerador.

El error porcentual se determina con la siguiente relación:

$$E_{\%} = \frac{D_T - D_S}{D_T} * 100$$

Donde:

$E_{\%}$: Error porcentual

D_T : Dato teórico

D_S : Dato de la simulación

Tabla 13

Error porcentual entre valores calculados y de simulación.

Elemento	Coeficiente de seguridad analítico	Coeficiente de seguridad de simulación	Error porcentual
Eje	4,5	4,35	3,3
Álabe	15	15	0
Marco	7,6	7,2	5.2

Discusión

Conclusiones

La fuerza de arrastre que produce la parte frontal del álabe cicloide es mayor que la que produce el álabe circular, por lo tanto la fuerza favorable al movimiento del perfil cicloide es mayor que la del perfil circular.

La fuerza de arrastre que produce la parte posterior del álabe cicloide es mayor que la que produce el álabe circular, en consecuencia la fuerza opositora al movimiento que produce el perfil cicloide también es mayor a la del perfil circular.

Las fuerzas antes mencionadas generan momentos giratorios totales favorables al movimiento, sin embargo los momentos giratorios que produce el perfil cicloide son mayores que los que produce el perfil circular, en consecuencia la energía que puede producir un aerogenerador de perfil cicloide es mayor a la de un aerogenerador de perfil circular.

El momento de inercia másico de un aerogenerador con álabes de perfil circular es mayor, en consecuencia la velocidad de aire que requiere un aerogenerador de perfil circular con un área proyectada determinada es mayor que la que requiere un aerogenerador de perfil de cicloide de igual área proyectada para alcanzar la misma velocidad de funcionamiento.

La característica propia del aerogenerador Savonius de aprovechar la velocidad del viento sin importar la dirección que este lleve, lo hace ideal para vientos de baja velocidad, debido a que no requerirá sistemas de orientación que consumen energía o requieren mayor velocidad de viento para poder alinearse.

Para cubrir un área proyectada determinada se requiere menos material en la construcción del alabe de perfil cicloide, por lo tanto también es más económico.

Recomendaciones

Para aprovechar vientos de baja velocidad es conveniente utilizar un aerogenerador con álabes de perfil cicloide sobre un aerogenerador de perfil circular.

Una de las mayores ventajas de los aerogeneradores Savonius es que poseen un alto torque de inicio de funcionamiento esto permite que trabajen en vientos de baja velocidad, por lo tanto es recomendable estudiarlo para su utilización en la zona ecuatorial.

Para profundizar en el conocimiento de los aerogeneradores analizados es conveniente estudiarlos en un túnel de viento real o realizar estudios dinámicos a través de la dinámica de fluidos computacional.

Se recomienda estudiar los aerogeneradores Savonius en zonas rurales donde aún no llega el sistema nacional eléctrico interconectado.

Referencias

- Akwa, J.A, y Petry A.P, (2011), Discussion on of verification of the overlap ratio influence on perfomance coefficients of a Savonius wind rotor using computational dynamic, Renwable Energy.
- Budynas, Richard y Nisbett, Keithn, (2008), Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Mc GrawHill, México.
- Burto Tony, Jenkins Nick, Sharpe David, Bossanyi Ervin, (2011) Wind Energy Handbook, Willey, Londres, Reino Unido
- Dough McLean, (2013), Understanding Aerodynamics,Willey, Reino Unido
- Hansen Arthur, (1992). Mecánica de Fluidos, Limusa, México DF. México.
- Hansen Martin, (2008). Aerodynamics of Wind Turbines, EarthScan, Londres, Reino Unido.
- Meriam J.L y Kraige L.G (2012), Dinámica para ingenieros, Reverté, Barcelona, España.
- Moro Vallina, Miguel (2010). Instalaciones solares fotovoltaicas, Paraninfo, España, Madrid.
- Mott, Robert (2004), Diseño de Elementos de Máquinas, Pearson, México.
- Mott, Robert (2006). Mecánica de Fluidos, Pearson, México.
- Norton, Robert, (2011), Diseño de Máquinas, Pearson, México.
- Steven, Seidenberg, (1991) Fuentes de Energía, Altea, Alfaguara, España, Madrid.
- Streeter, Victor (2000), Mecánica de Fluidos, McGraw Hill, Bogotá Colombia
- Villarrubia, Miguel (2004), Energía eólica, CEAC, Barcelona España,
- Wey, Tong (2010), Wind Power Generation and Wind Turbine Design, WIT Press, Southampton, Reino Unido.
- White Frank, (2008), Mecánica de Fluidos, McGraw Hill, Madrid España

Apéndice A

Cálculo de la frecuencia natural del aerogenerador

Se requiere calcular la frecuencia natural para verificar si el aerogenerador necesitaría un sistema de control de velocidad máxima, para evitar que entre en resonancia y así su destrucción, en caso que la frecuencia mínima de resonancia sea mayor a la velocidad máxima de giro

Según Norton, “la frecuencia esencial sin amortiguamiento se calcula a partir de las siguientes expresiones” (pp 33):

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (40)$$

$$f_n = \frac{1}{2*\pi} w_n \quad (41)$$

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (42)$$

Donde:

w_n : frecuencia natural fundamental en (rad/s).

f_n : frecuencia natural fundamental en (Hz).

m : masa móvil del sistema.

k : constante de resorte del material.

F : fuerza que se aplica al elemento.

δ : deflexión resultante.

La frecuencia natural para el aerogenerador se calcula a partir de las peores condiciones de velocidad del viento, y para la mayor fuerza registrada en los álabes.

Se calculará la frecuencia natural más baja que puede alcanzar el aerogenerador que tienen mayor posibilidad de igualar esta frecuencia, en función de su relación fuerza-desplazamiento.

Para perfil circular:

$$k = \frac{100}{0.000001} = 10 \cdot 10^7$$

$$w_n = \sqrt{\frac{10 \cdot 10^7}{27930}} = 59 \text{ (rad/s)}$$

Si se analiza el la frecuencia de giro que puede alcanzar el aerogenerador a 10 m/s considerando que pueda aprovechar toda la energía del viento.

$$w_n = v * r \quad (43)$$

Donde:

v: velocidad del viento

r: punto más distante del álabe con respecto al eje de giro

$$w_n = 10 * 0.59 * 0.33 * 2 = 3.89 \text{ (rad/s)}$$

Se le ha multiplicado por el porcentaje de aprovechamiento de energía para un aerogenerador Savonius ideal, puesto que este se traduce en aprovechamiento de la velocidad del viento, ya que esta es la máxima que puede alcanzar.

Como se observa la frecuencia natural es muy superior a la que alcanzará el aerogenerador en su funcionamiento, por lo tanto no se requiere de un sistema de control de velocidad.

Apéndice B

Momento inercial de masa de álabe circular

El momento de inercia con respecto al eje paralelo al eje de giro es 11166013,980 Kg/mm² según se puede observar en la gráfica.

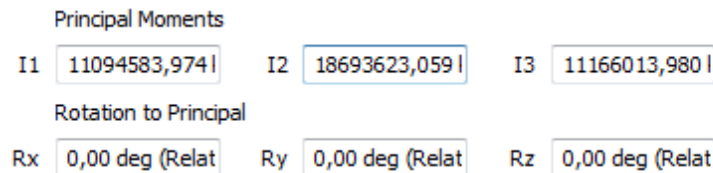


Figura 34. Momento inercial de masa de álabe circular

Momento inercial de masa de álabe cicloide

El momento de inercia con respecto al eje paralelo al eje de giro es 14032273,527 Kg/mm² según se puede observar en la gráfica.

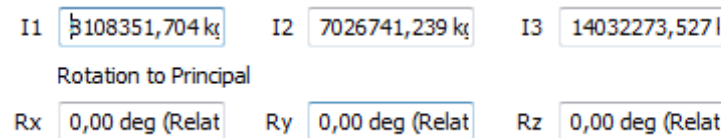


Figura 35. Momento inercial de masa de álabe cicloide

En consecuencia el álabe que mayor oposición pondrá para iniciar su movimiento es el álabe de perfil circular.

Apéndice C**Partes y materiales**

Tabla14

Resumen de los elementos constitutivos del aerogenerador a utilizar.

Elemento diseñado	Características
Eje	tubo A36 Ø42mm e2mm
Álabe	plancha de acero galvanizada: 1000*1714*2mm
Marco	varilla cuadrada 12*12mm longitud 7948mm
Electrodo	E 6011
Elemento recomendado	
Rodamiento con chumacera	UCF 209
Cardán con brida	PL2,2

Apéndice D

Planos

Apéndice E

Soldadura

La soldadura diseñada es la representada en el mapa de soldadura dwg5.

Soldadura W1 y W2

Datos:

Área efectiva de soldadura (A): $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Fuerza cortante que actúa en la soldadura debido al arrastre (F) : 68.7/2 N

Fuerza debido al peso que se distribuye para los ocho puntos de unión: 58.8/8 N

Resistencia a la fluencia del material de aporte S_y : 393 MPa

Resistencia a la tensión del material de aporte S_{ut} : 482 Mpa

Resistencia a la fluencia del material base S_y : 250 MPa

Resistencia a la tensión del material base S_{ut} : 450 Mpa

Se determina el esfuerzo efectivo de resistencia a esfuerzo cortante por parte del material de aporte y para el material base, que es el menor valor entre el 40% de la resistencia a la tracción o el 30% de la resistencia a la fluencia:

Para el material de aporte:

S_y : $0.4 \cdot 393 = 157.2 \text{ MPa}$

S_{ut} : $0.3 \cdot 482 = 144.6 \text{ MPa}$

El esfuerzo efectivo de resistencia a cortante para el material de aporte es $S_{ye} = 144.6 \text{ MPa}$

Para el material base:

S_y : $0.4 \cdot 250 = 100 \text{ MPa}$

S_{ut} : $0.3 \cdot 450 = 135 \text{ Mpa}$

El esfuerzo efectivo de resistencia a cortante para el material base es $S_{ye} = 100 \text{ MPa}$

Esfuerzo cortante debido a la fuerza de arrastre se calcula:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (44)$$

$$\tau = \frac{68.7}{2 \cdot 10^{-4}} = 0.344 \text{ MPa}$$

y para la fuerza debido al peso:

$$\tau = \frac{58.8}{8 \cdot 10^{-4}} = 0.074 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante total es la sumatoria de los dos esfuerzos:

$$\tau_{total} = 0.344 + 0.074 = 0.412 \text{ MPa}$$

Se puede observar que el esfuerzo cortante causado en la soldadura y material base es muy inferior al esfuerzo cortante de cada uno por lo tanto soportará la sollicitación impuesta.

Soldadura W3

Las fuerzas que soportan el son peso y el arrastre.

El peso se distribuye para cuatro puntos en esta soldadura:

$$\tau'_1 = \frac{58.8}{4 \cdot 10^{-4}} = 0.147 \text{ MPa}$$

La fuerza de arrastre en cada alabe se distribuye en dos puntos:

$$\tau'_2 = \frac{68.7}{2 \cdot 10^{-4}} = 0.34 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante se obtiene de la suma de los dos esfuerzos cortantes:

$$\tau'_{total} = \sqrt{0.147 + 0.34} = 0.37 \text{ MPa}$$

Soldadura W4

Área efectiva: $0.707 \cdot 0.005 \cdot 1 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

La fuerza de arrastre será soportada por dos extremos (F_{D1}): $68.7/2 \text{ N}$

El esfuerzo cortante que soportará debido a la fuerza de arrastre es:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{68.7}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 0.0114 \text{ MPa}$$

El esfuerzo debido al peso corresponde a la cuarta parte del peso total es:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{58.8}{4 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 0.005 \text{ MPa}$$

el esfuerzo total soportado es:

$$\tau = \sqrt{0.0114^2 + 0.005^2} = 0.013 \text{ MPa}$$

Se puede observar que el esfuerzo cortante total causado en la soldadura y material base es muy inferior al esfuerzo cortante de cada uno por lo tanto soportará la sollicitación impuesta.

Soldadura W5

Área efectiva:

$$A = 1.414 \cdot \pi \cdot 0.003 \cdot 0.004 = 5.33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Fuerza cortante debido al peso de la placa base: 2.5 N

Se determina un esfuerzo cortante primario debido al peso:

$$\tau' = \frac{F}{A} = \frac{2.5}{5.33 \cdot 10^{-5}} = 0.046 \text{ MPa}$$

Se puede observar que el esfuerzo cortante total causado en la soldadura y material base es muy inferior al esfuerzo cortante de cada uno por lo tanto soportará la sollicitación impuesta.

Apéndice F

Marco

El marco se estima para las condiciones más exigentes de diseño.

Se determinan las reacciones en el punto a:

$$\sum F_z = 0$$

$$R_1 - \frac{58.8}{4} = 0 ; R_1 = 14.7 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_2 - \frac{68.7}{2} = 0 ; R_2 = 34.35 \text{ N}$$

$$\sum M_a = 0$$

$$M_a - \left(\frac{68.7}{4} * 0.5\right) = 0 ; M_a = 8.58 \text{ Nm}$$

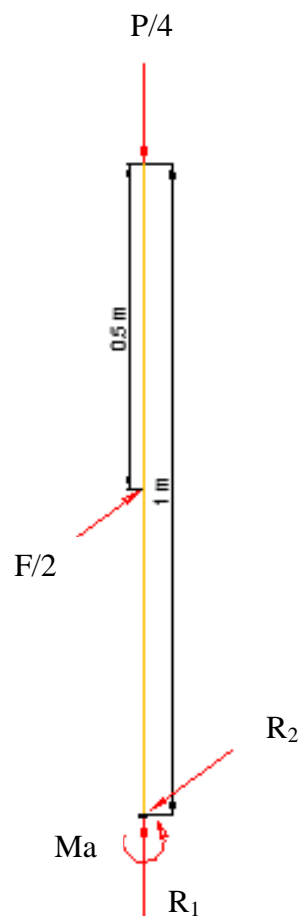


Figura 36. Diagrama de cuerpo libre de elemento de marco

Se calculan los esfuerzos normales y cortantes:

$$\sigma_{R1} = \frac{14.71}{1.44 \cdot 10^{-4}} = 0.102 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Ma} = \frac{6 \cdot 8.58}{0.012^3} = 29.79 \text{ MPa}$$

$$\tau_{R2} = \frac{34.35}{1.44 \cdot 10^{-4}} = 0.238 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Ma} = \frac{3 \cdot 34.5}{\sqrt{2} \cdot 1.44 \cdot 10^{-4}} = 0.508 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{total} = 0.102 + 29.79 = 29.892 \text{ MPa}$$

$$\tau_{total} = 0.238 + 0.508 = 0.746 \text{ MPa}$$

Esfuerzo principal:

$$\sigma_1 = \frac{29.892}{2} + \sqrt{\left(\frac{29.892}{2}\right)^2 + 0.746^2} = 29.91 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante máximo:

$$\tau_{max} = \frac{29.91}{2} = 14.95$$

Si el esfuerzo cortante máximo es menor o igual que la mitad del S_y del material entonces cumple la condición de diseño.

$$\frac{S_y}{2} = \frac{228}{2} = 114 \text{ MPa} \geq 14.95 \text{ MPa}$$

Entonces el marco soportará las condiciones de sollicitación.

Factor de seguridad:

$$n = 114 / 14.95 = 7.63$$

El factor de seguridad no se puede ajustar más debido a que las dimensiones de la varilla son las que existen comercialmente.

Apéndice G

La realidad de la leyenda

De Helene Pagés (Deutsches Gut, Deutsche Sagen):

Todas las personas añaden algo de poético al mundo, a todas las cosas añadimos algo de poético. Es una necesidad inevitable: canciones, historias y poesía, son la bella túnica con la cual nuestro espíritu reviste al mundo.

Las personalidades que surgen de la imaginación, como héroes, las grandes figuras de la Historia, Carlomagno, por ejemplo, son las que se ponen para la fantasía de un pueblo, como representantes de fuerzas superiores y misteriosas.

Es como si los hombres del día a día en su sed de maravilloso, adornasen a los grandes personajes de la historia con fuerzas y poderes que ellos en realidad no llegaron a tener, ellos desean que así hubiese sido en el pasado, porque el hombre no puede vivir sin lo maravilloso.

En casi todos los países se piensa en tesoros enterrados y en sus guardianes, en castillos fantásticos, en campadas sumergidas que emergen de las profundidades y que repican.

Por eso existe en las leyendas algo respetable, digno de honra, incluso cuando aquello que contienen nunca haya sucedido, entretanto ellas son reales por el hecho de revelar el sentimiento de la humanidad como Dios las creo.

Con certeza se trata de una institución sabia el hecho de que del fondo del corazón añadimos algo de creativo a aquello que vemos, oímos y palpamos con las manos; eso se llama poesía, ella es un don de Dios a los hombres, y si ella encuentra eco en sus almas, alegra al mismo tiempo a los hombres y a su Altísimo Donador.