

PROYECTO EOLO “DISEÑO DE UN GENERADOR EOLICO ADECUADO A UN
AUTOMOVIL”

DIEGO FERNANDO CORTES AFANADOR

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2007

PROYECTO EOLO “DISEÑO DE UN GENERADOR EOLICO ADECUADO A UN
AUTOMOVIL”

DIEGO FERNANDO CORTÉS AFANADOR

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

BRYAN QUINTERO ARBOLEDA

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2007

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Dr. SANTIAGO LAIN BEATOVE

Jurado

Ing. YURI LOPEZ

Jurado

Santiago de Cali, 28 de Mayo de 2007

A mi abuelo:

JAIRO AFANADOR SALGUERO

Por que gracias a su apoyo incondicional, he logrado culminar la primera etapa de mi crecimiento profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la fortaleza de seguir este proyecto.

A mi madre Cielo Afanador por ser mi primer paso .

A mi tío Hernando Afanador por ser mi ejemplo de vida

A mi tía Dora Cortés por creer en mí

A mi director Brian Quintero por brindarme todo el apoyo necesario para culminar este proyecto

A mis amigos y compañeros por sus favores y facilidades que me prestaron durante mi carrera.

A todas las personas que de una u otra forma, han colaborado para la culminación de mi trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCION	12
1. CONCEPTOS GENERALES	14
1.1 COEFICIENTE DE POTENCIA	14
1.2 TEORIA DE BETZ	15
1.3 CONCEPTOS AERODINAMICOS	17
1.3.1 Definiciones	17
2. CALCULO AERODINÁMICO	20
2.1 CONFIGURACION GEOMETRICA	20
2.1.1 Diámetro del rotor	20
2.1.2 Densidad del aire	23
2.1.3 Cálculos básicos.	24
2.2. CONFIGURACIÓN AERODINAMICA DEL ROTOR	28
3. TEORIA DE LA TURBINA SIMPLIFICADA	36
3.1 RELACION BASICA PARA CALCULAR CUERDA DE PALA	36
3.1.1. Primera evaluación	36
3.1.2 Segunda evaluación	37
3.2 EFICIENCIA AERODINÁMICA DEL ELEMENTO DE PALA	39

4. TEORIA DE VORTICES DE GLAUERT	40
4.1 CALCULOS DE EMPUJE AXIAL Y TORQUE	42
4.1.1 Primera evaluación	42
4.1.2 Segunda evaluación	42
4.2 CALCULO DE POTENCIA	45
4.3. VALORES OPTIMOS PARA l y C_{LBL}	46
4.4 CALCULOS DE LA CARACTERISTICAS AEROTURBINA	47
5 PERFIL AERODINÁMICO	49
5.1 NOMENCLATURA PERFILES NACA 4 DIGITOS	50
5.2 NOMENCLATURA PERFILES NACA 4 DIGITOS	50
5.3 MODIFICACIONES PERFILES NACA 4 Y 5 DIGITOS	51
5.4 PERFILES ZAREA SZ-1500	51
5.4.1 Características geométricas	51
6 RESEÑA AERODINAMICA DEL AUTOMOVIL.	53
6.1 MECANICA DE FLUIDOS A TRAVÉS DE UN VEHICULO	53
6.1.1 Distribución de presiones sobre un vehículo.	55
6.1.2 Componente de arrastre	57
6.2 FLUENT	59
7. RESULTADOS DE CALCULOS (TURBINA)	59
8. DISEÑO MECANICO	64

8.1 TRANSMISION DE POTENCIA	64
8.2. DISEÑO DE EJE	66
8.2.1 Diseño por resistencia	66
8.2.2 Diseño por Deflexión	69
8.2.3 Diseño por Vibración	69
9. ANALISIS AERODINAMICOS DE VEHICULOS	71
9.1 RESULTADOS GRAFICOS POR FLUENT	73
10. RESULTADOS	76
11 CONCLUSIONES	79
12. RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFIA	81
ANEXOS	83

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variación de la densidad en la ciudad de Cali	22
Tabla 2. Variación de la densidad en una ciudad a nivel del mar	22
Tabla 3. Variación de la densidad en la ciudad de Bogotá	23
Tabla 4. Calculo de Potencia en función de área	23
Tabla 5. Razones de Punta de Pala	28
Tabla 6. Relación de palas y λ_0 para hallar potencia .	34
Tabla 7. Resultados para cada perfil variando velocidad	61
Tabla 8. Resultados perfil SZ-1534	61
Tabla 9. Resultados perfil SZ-1551	62
Tabla 10. Datos generales micro turbina	62
Tabla 11. Especificación de Transmisión de potencia	65
Tabla 12. Diámetros eje prueba	67
Tabla 13. Parámetros eje	69
Tabla 14. Resultados Fluent para vehículo solar	72
Tabla 15. Resultados Fluent para tracto camión	72
Tabla 16. Resultados Fluent para vehículo solar aerodinámico	72
Tabla 17. Resultados de Potencia Automóvil Solar Comercial	77
Tabla 18. Resultados de Potencia Automóvil Solar Aerodinámico.	77
Tabla 19. Resultados de Potencia Tractomula	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Movimiento de un fluido a través de un rotor eólico	16
Figura 2. Fuerzas aerodinámicas	18
Figura 3. Potencia captada a velocidad promedio	26
Figura 4. Potencia a diferentes alturas	27
Figura 5. Potencia a temperatura variable	27
Figura 6. Potencias y torques para $\lambda=1$	30
Figura 7. Potencias y torques para $\lambda=2$	30
Figura 8. Potencias y torques para $\lambda=3$	31
Figura 9. Potencias y torques para $\lambda=4$	31
Figura 10. Potencias y torques para $\lambda=5$	32
Figura 11. Potencias para numero de palas 2 y λ	32
Figura 12. Potencias y torque a diferentes λ	33
Figura 13. Relación de velocidades	37
Figura 14. Velocidad y fuerzas Teoría de Glauert	42

Figura 15.	Perfil aerodinámico	49
Figura 16.	Perfiles Zarea 1500	52
Figura 17	.Punto de separación	55
Figura 18.	Presión estática en un vehículo sedan	56
Figura 19.	Sustentación en vehículos comerciales	57
Figura 20.	Recirculación del aire en las ruedas	58
Figura 21.	Forma de micro turbina	63
Figura 22.	Secciones de eje	66
Figura 23.	Diagrama de Fuerzas y Momentos	67
Figura24	Análisis de tensión por Algor	70
Figura 25.	Automóvil solar tipo comercial	71
Figura 26.	Tractomula Mack	71
Figura 27	Proyecto Eólico Solar Aerodinámico	72
Figura 28	Presión Estática Veh. Solar Comercial	73
Figura 29.	Presión Dinámica Veh. Solar. Comercial	73
Figura 30.	Contorno de Velocidad Para Tractomula	74
Figura 31.	Contorno de Velocidad para Vehículo Solar Aerodinámico	74
Figura 32.	Contorno de Turbulencia para Vehículo Solar Comercial	75
Figura 33.	Contorno de Turbulencia para Vehículo Tractomula	75

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Valores de λ , λ_e , k , h , C_p , y Cl_{bl}/r para valores entre 0 y 2	83
Anexo 2. Características perfiles	84

RESUMEN

El presente proyecto denominado Eolo propone el diseño de un generador eólico para adecuarlo a un automóvil. Teniendo en cuenta los altos precios de los hidrocarburos, contaminación y su próxima desaparición, dan paso a estudios a nuevas fuentes de energía para desarrollar vehículos que permitan el ahorro de combustible.

Este trabajo pretende aprovechar una energía renovable como el viento a través de la generación de electricidad utilizando una turbina eólica de pequeñas dimensiones que puede ubicarse en un auto convencional

Para el estudio de este proyecto se realizara estudios en áreas tales como: Energías renovables, diseño mecánico y aerodinámico.

En las energías renovables se tratara la energía eólica, estudiando la teoría de construcción de generadores eólicos.

En el diseño mecánico se planteara teoría de diseño de ejes por medio de resistencia, evaluándolo en el programa ALGOR y COSMOS ,diseño por deflexión y diseño por vibración. Además de análisis de transmisión de potencia.

Para el estudio aerodinámico se analizara teóricamente los perfiles aerodinámicos evaluados en una hoja de Microsoft Excel, evaluando perfiles destacados en la industria de aerogeneradores y perfiles nuevos para utilización de micro generadores.

Para estudiar el comportamiento del micro generador y pronosticar su posición en un vehículo se analizará su comportamiento utilizando herramientas computacionales. Para este proceso se utilizará el programa FLUENT ® el cual permite analizar el comportamiento aerodinámico del automóvil y su interacción con la turbina.

Este proyecto solo evaluará la posibilidad de estimar la potencia que genera la aeroturbina, su capacidad y su uso potencial, que teniendo en cuenta estos resultados se mirara la viabilidad del proyecto.

INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna, utilizados a lo largo del tiempo como fuente energética para el movimiento de automóviles se han desarrollado para generar desde pequeñas a grandes potencias, pero emplean combustibles fósiles que tienen vida finita y son altamente contaminantes.

Desde hace cinco décadas se han hecho propuestas para mejorar el auto como hoy lo conocemos dando nuevas formas y diseños. En la actualidad lo más importante a estudiar es el ahorro de estos combustibles o mejor aún proponer nuevas alternativas para crear fuentes de energía alterna que permitan un desplazamiento libre de contaminación. Se han estudiado varias formas viables como por ejemplo motores eléctricos, de AC/DC, Baterías electrolíticas, Celdas de Combustibles, Combustibles alternativos, motores de imanes permanentes que se han desarrollado lentamente.

Los Aerogeneradores desde tiempos antiguos, han aprovechado el viento para diversas labores incluido el transporte. Las grandes turbinas han funcionado dando grandes potencias para redes de interconexión eléctrica. Cabe preguntarse: ¿Por que no aprovechar la corriente de aire que genera un vehículo alrededor de él para transformarlo en una energía útil y limpia?

Es en este lugar donde se centra la propuesta del presente proyecto, utilizar los conocimientos de grandes generadores para comparar y a la vez diseñar un generador óptimo que permita al vehículo ser más eficiente por es proyecto de tesis propuesto se centra en el estudio teórico-numérico de un aerogenerador eólico para un vehículo terrestre. Se propone estudiar la aerodinámica de un automóvil para escoger un espacio adecuado para instalar una turbina eólica.

Este estudio incluye los impulsos que interactúan en un carro en movimiento, es decir fuerzas como el arrastre y sustentación que dependen de su geometría, la posición idónea en la carrocería para tener una buena potencia

Debe tenerse en cuenta igualmente, todo lo relacionado con el diseño del aerogenerador, tal como geometría de pala (ancho y largo), material a utilizar, tipo de rotor y fuerzas aerodinámicas que actúan en la pala.

Todos estos estudios de aerodinámica (tanto del carro como del generador), se han investigado previamente en literatura o Internet dando una viabilidad al proyecto puesto que se han contemplado varios estudios sobre la mecánica de fluidos en el automóvil comercial y desarrollo de pequeños generadores instalados

para suplir pequeñas necesidades. Es por eso que el proyecto Eolo reúne estos dos estudios para comprobar la viabilidad de producir suficiente energía para complementar algunas insuficiencias en un vehículo.

Para realizar este proyecto parte del cálculo, utilizara recursos para modelado (Solidworks y Solid-Edge), como para realizar análisis de ingeniería (CAE) como lo son los software ALGOR® y FLUENT®, los cuales se basan en la teoría de Elementos Finitos. Finalmente fue FLUENT® el paquete seleccionado para realizar los análisis que permitirán ver y analizar los coeficientes y fuerzas producidos por la interacción entre el fluido, la turbina y el automóvil.

1. CONCEPTOS DE AEROGENERADORES

Antes de entrar en detalles descriptivos del tipo de sistemas necesarios para un aprovechamiento eólico, hemos de introducir dos conceptos fundamentales que han de ser tenidos en cuenta en todo el desarrollo posterior. El primero de ellos, el coeficiente de potencia, nos da una idea de la potencia que realmente estamos obteniendo a través del sistema eólico, lo segundo, la ley de Betz que nos muestra la máxima potencia extraíble de una vena fluida.

1.1. COEFICIENTE DE POTENCIA

La potencia que posee el viento incidente sin perturbar y de velocidad V_1 viene dada por la expresión:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (1.1)$$

Donde:

ρ = Densidad del aire

S= Superficie de Captación del Viento

V_1 = Velocidad del Viento

Sin embargo, un aerogenerador no es nunca capaz de llegar a capturar el 100% de esta potencia que posee tal viento incidente, de manera que la potencia capturada por el rotor de la máquina es significativamente menor. El coeficiente de potencia de un aerogenerador es el rendimiento con el cual funciona el mismo, y expresa qué cantidad de la potencia total que posee el viento incidente es realmente capturada por el rotor de dicho aerogenerador. Se define como:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} \quad (1.2)$$

Donde P es la potencia realmente capturada por el rotor. Este coeficiente de potencia es adimensional. Por otra parte, hay que hacer notar que el coeficiente de potencia con que funciona un aerogenerador en general no es constante, pues varía en función de las condiciones de funcionamiento de la máquina.

1.2. TEORÍA DE BETZ

El primero en estudiar los rotores eólicos fue Betz, quien determinó la máxima potencia extraíble de una vena fluida. El teorema de Betz tiene para las máquinas eólicas la misma importancia que el de Carnot para las máquinas térmicas. Los supuestos, ideales, en que se basa la fórmula de Betz son:

- Las palas trabajan sin fricción alguna.
- Las líneas de corriente que definen el volumen de control, separan perfectamente el flujo de aire perturbado del no perturbado.
- La presión estática en puntos suficientemente alejados del rotor (secciones S_1 y S_2) coincide con la presión estática de la corriente libre no perturbada. Ver figura 1.
- La fuerza desarrollada por unidad de área a lo largo del rotor es constante.
- El rotor no induce rotación alguna en la estela de salida.
- El fluido es ideal e incompresible.

En virtud del principio de conservación de la energía, si el aerogenerador extrae una cierta cantidad de energía de la vena, ésta debe perder la misma cantidad de energía cinética. Por tanto, la velocidad V_2 debe ser inferior a V_1 . Bajo estas hipótesis Betz dedujo que el máximo valor de potencia susceptible de ser extraído de la vena fluida es:

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad (1.3)$$

Expresión que se conoce como *fórmula de Betz* y que proporciona la máxima potencia que podemos extraer de una corriente de aire. La relación

$$\frac{P_{\max}}{P_0} = \frac{\left(\frac{8}{27} \rho S V_1^3\right)}{\left(\frac{1}{2} \rho S V_1^3\right)} = \frac{16}{27} \quad (1.4)$$

En donde P_0 es la energía disponible del viento aguas arriba de la hélice.

La expresión 2.4 representa el coeficiente de potencia máximo (límite de Betz) y nos servirá para caracterizar el rendimiento de un rotor eólico, resultado que ninguna máquina eólica, por muy sofisticada que sea, puede superar.

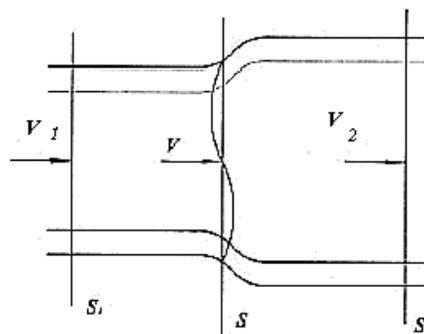
La ecuación de Betz proporciona el límite superior de las posibilidades de un aerogenerador, pero en sí es poco fina pues no tiene en cuenta una serie de factores como:

- La resistencia aerodinámica de las palas
- La pérdida de energía por la estela generada en la rotación
- La compresibilidad del fluido
- La interferencia de las palas

En realidad habrá que tener en cuenta además el rendimiento de los diversos mecanismos que componen el aerogenerador, por lo tanto considerando el siguiente balance del mismo para los distintos componentes:

Rendimiento de Betz.....	59.5%
Rendimiento Hélice.....	85%
Rendimiento del Multiplicador.....	98%
Rendimiento del alternador.....	95%
Rendimiento del transformador.....	98%
Se obtiene un rendimiento global.....	46%

Figura 1. Movimiento de un fluido a través del rotor eólico.



1.3. CONCEPTOS AERODINÁMICOS

Un cuerpo en movimiento sumergido en un fluido experimenta fuerzas causadas por la acción de este. Si el objeto está moviéndose en corrientes de aire se conoce con el nombre de Aerodinámica.

El efecto total de estas fuerzas es muy complejo. Sin embargo, para propósitos de diseño o para el análisis del comportamiento de un cuerpo en un fluido, analizaremos las siguientes fuerzas:

Arrastre y Sustentación

Estas fuerzas son las mismas sin considerar si el cuerpo se encuentra en movimiento en el fluido o el fluido se encuentra moviéndose sobre el cuerpo.

1.3.1. Definiciones.

- **El arrastre.** Es la fuerza sobre un cuerpo provocado por un fluido que resiste el movimiento en la dirección contraria al recorrido.

Las aplicaciones más familiares que requieren el estudio del arrastre son en el campo del transporte. La resistencia al viento es un término utilizado con frecuencia para describir los efectos del arrastre sobre aviones, automóviles, camiones etc. La fuerza de arrastre debe contrarrestarse por una fuerza propulsora en la dirección opuesta para mantener o incrementar la velocidad del vehículo.

Puesto que la producción de fuerza propulsora requiere potencia adicional, es conveniente mantener el arrastre a un valor mínimo.

La fuerza de arrastre o drag está definida por la ecuación:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d V^2 A; \text{(1.5)}$$

Donde C_d , es el coeficiente de arrastre, un factor adimensional. Su magnitud depende básicamente de la geometría del objeto y su orientación con relación a la corriente del fluido. El término V es la velocidad de corriente libre del fluido con relación al objeto. El término A se refiere al área del cuerpo, tanto de la superficie o la máxima sección transversal perpendicular a la dirección del flujo.

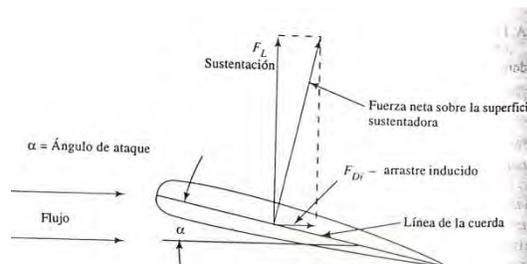
- **La sustentación.** Es la fuerza provocada por el fluido en la dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo. Sus aplicaciones más importantes están el diseño y análisis de alas de aviones, diseño de alabes de turbinas eólicas y de vapor.

La geometría de una superficie sustentadora es tal que hace que una fuerza de sustentación que produce una circulación de aire sobre y bajo la superficie presentado una componente positiva o negativa dando el significado de poder elevarse (por ejemplo en los aviones) o “pegarse” mas a una superficie terrestre (los automóviles de competición tienen en cuenta para perdidas de potencia). Por supuesto, la magnitud de la sustentación debe ser al menos igual al peso de la nave (en el caso de los aviones) para que esta pueda volar. La Ecuación de la fuerza de sustentación o Lift es:

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_l V^2 A; \quad (1.6)$$

Donde C_l , es el coeficiente de sustentación, un factor adimensional. Su magnitud también depende básicamente como el coeficiente de arrastre de la geometría del objeto y su orientación con relación a la corriente del fluido y el ángulo de ataque. El termino V , es la velocidad de corriente libre del fluido con relación al objeto. El término A se refiere al área del cuerpo, tanto de la superficie o la máxima sección transversal perpendicular a la dirección del flujo.

Figura 2. Fuerzas Aerodinámicas.



Las palas de una aeroturbina se diseñan bajo formas constructivas teniendo en cuenta los parámetros aerodinámicos y con materiales que deben atender principalmente a los requisitos siguientes:

- Resistencia estructural: Capaces de soportar, sin que se produzca daño, las cargas máximas previsibles de ocurrir durante el período de vida de la máquina
- Resistencia a fatiga: Capaces de soportar las cargas de fatiga que aparezcan durante la vida de la máquina (20 años).
- Rigidez: Desplazamientos inferiores a los máximos permitidos. Rigidez mayor que la mínima necesaria para evitar inestabilidades
- Peso: El peso debe ser el mínimo necesario para tener el mínimo costes y minimizar las cargas de tipo inercial y gravitatorio sobre los diversos componentes de la máquina (es crítico en grandes aeroturbinas).
- Fabricación: Facilidad de fabricación que requiera técnicas y materiales adaptados a la maquinaria y tecnología existente en la industria.
- Resistencia a los ambientes: Resistencia a la corrosión en ambientes marinos y a la degradación por la radiación solar.
- Minimizar la emisión de ruido acústico: Diseño encaminado a producir el menor impacto acústico para facilitar la instalación de estos sistemas cerca de sitios habitados.

Por todo esto, el conocimiento y caracterización de los materiales a utilizar es un paso indispensable a determinar antes de llevar a cabo cualquier diseño.

2. CALCULO AERODINAMICO DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CONFIGURACION DE PALA.

2.1. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

Para el diseño de una turbina eólica el elemento que debe tenerse en cuenta es el rotor. Antes de iniciar su construcción hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones: Configuración aerodinámica de las palas, elección del perfil, medidas de la cuerda, ángulo de calaje número de palas.

2.1.1. Diámetro del rotor. Como se ha dicho anteriormente el rotor o la rueda de aspas es la principal parte del aerogenerador. Este consta de los alabes, que se encargan de recibir la energía cinética del viento para transformarla en energía mecánica.

Siendo el rotor encargado de la conversión de la energía, el cálculo más importante es el del diámetro y de las velocidades de viento que se tengan es decir un promedio que nos permita un diseño óptimo y generar un potencia conveniente.

Las consideraciones que se deben tener en cuenta en el diámetro del rotor son:
El tamaño óptimo para instalarlo en un vehículo.

Que potencia útil se puede desarrollar con el diámetro del rotor.

Que régimen de velocidades maneje el automóvil para proyectar el aerogenerador.

Como estas mediciones de velocidades de viento en diferentes zonas son significativas y casi constantes asumimos que el generador podría abastecer una cantidad de energía.

Se estima que un diámetro favorable en un vehículo pequeño tipo turismo, cabriolet, coupé, Roadster, Spider, Sports, Familiar, Todo terreno Pick-up, Monovolumen y Urbanos, puede estar alrededor de 0.50 metros a 0.60 metros.

Con esa estimación comenzaremos a definir que energía podremos utilizar y que eficiencia en nuestro sistema tendremos.

Además debemos considerar otros factores que se deben considerar en el cálculo del rotor como son:

2.1.2. Densidad del aire. Como la temperatura está variando según la hora del día y en el lugar donde operen los vehículos se calculan varias densidades a diferentes temperaturas, como la densidad es $\frac{1}{v}$ donde v es el volumen específico, por medio de la fórmula de los gases ideales este v para cada temperatura.

$$Pv=RT \quad (2.1)$$

Donde P= Presión Atmosférica absoluta (Bares).

v= Volumen Específico ($\frac{m^3}{kg}$)

R= Constante ideal de los gases ($\frac{bares * m^3}{kg * ^0K}$)

T= Temperatura (K)

La altura de la ciudad de Cali es de 1000 msnm donde la Presión atmosférica es aproximada 67.5 cm. de Hg. En bares es

$$67.5cmHg * \frac{13.33mbares}{1cmHg} * \frac{1bar}{1000mbares} = 0.8997 bares .$$

La constante R es:

$$R = \frac{R_u}{M}$$

Donde M= Masa molecular del aire aproximadamente 29 moles.

$R_u = 0.08314 \text{ bares } m^3 / \text{ Kg mol } ^0K$

Teniendo $R = 0.00286 \text{ bares } m^3 / \text{ Kg } ^0K$

Despejando de la ecuación $Pv= RT$ hallamos v , sabiendo que $1/v$ es igual a ρ (densidad)

Tabla 1. Variación de la densidad de aire en la ciudad de Cali.

temp (c)	v (m3/kg)	ρ (kg/m3)
20	0.93139936	1.07365331
22	0.93775703	1.0663743
24	0.9441147	1.05919333
26	0.95047238	1.05210843
28	0.95683005	1.04511767
30	0.96318773	1.03821921
32	0.9695454	1.03141121
34	0.97590308	1.02469192
36	0.98226075	1.01805961

Tabla 2. Variación de la densidad de aire en una ciudad a nivel del mar.

presion	0.99975	bares
R	0.00286	bares*m3/kg K
temp (K)	v (m3/kg)	ρ (kg/m3)
20	0.83818955	1.19304757
22	0.84391098	1.18495911
24	0.84963241	1.17697959
26	0.85535384	1.16910681
28	0.86107527	1.16133866
30	0.8667967	1.15367306
32	0.87251813	1.14610799
34	0.87823956	1.13864149
36	0.88396099	1.13127164

Tabla 3. Variación de la densidad del aire en la ciudad de Bogotá (2600 msnm)

presión	0.75536667	bares
R	0.00286	bares*m3/kg K
temp (K)	v (m3/kg)	ρ(kg/m3)
6	1.05636115	0.94664595
8	1.06393363	0.93990825
10	1.07150611	0.93326579
12	1.07907859	0.92671656
14	1.08665107	0.9202586
16	1.09422356	0.91389003
18	1.10179604	0.907609
20	1.10936852	0.90141372
22	1.116941	0.89530244

Como se puede observar mayor altura la densidad disminuye y a mayor temperatura la densidad disminuye igualmente.

2.1.3. Cálculos Básicos. En el cálculo del diámetro del rotor es necesario el uso de la ecuación de la termodinámica que se refiere a la energía que entra dejando un trabajo en el eje y saliendo la energía sobrante.

$$W_e = (k_e - k_s)$$

Donde W_e es el trabajo que realiza el rotor debido a la fuerza del viento .

k_e = Energía cinética del aire entrada al rotor.

k_s = Energía cinética del aire salida del rotor.

$$K = V^2/2.$$

La potencia se expresa:

$$P = mW_e \quad (2.2)$$

El flujo másico m es igual ρVA donde ρ es la densidad del aire, V es la velocidad del viento y A = área del rotor. $A = \frac{\pi}{4} D^2$: D es la incógnita.

Entonces la ecuación de la potencia unificando (2.2) y (2.3) se obtiene

$$\text{Potencia} = m(k_e - k_s) \quad (2.3)$$

$$\text{Potencia} = m \left(\frac{V_e^2}{2} - \frac{V_s^2}{2} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{Potencia} = \rho VA \left(\frac{\Delta V^2}{2} \right) \quad (2.5)$$

Para despejar el diámetro del rotor se aplica esta ecuación a los valores en función del área.

Tabla 4. Cálculos de Potencia en función del área.

ítem	vel. Entrada	vel. salida	densidad	Potencia= $\rho VA((\Delta V^2)/2)$
1	1	0.33	1.07	0.317037037
2	2.5	0.83	1.07	4.953703704
3	5	1.67	1.07	39.62962963
4	7.5	2.50	1.07	133.75
5	10	3.33	1.07	317.037037
6	12.5	4.17	1.07	619.212963
7	15	5.00	1.07	1070
8	17.5	5.83	1.07	1699.12037
9	20	6.67	1.07	2536.296296
10	22.5	7.50	1.07	3611.25
11	25	8.33	1.07	4953.703704
12	27.5	9.17	1.07	6593.37963
	Potencia en función de área			21578.65037

Promedio de potencia en función de velocidad/area	1798.220864
--	-------------

La densidad esta configurada a la ciudad de Cali a 20 C° como referencia, la velocidad de salida, aplicando el límite de Betz donde la velocidad de salida es $\frac{1}{3}$ de la velocidad de entrada

La potencia de un molino de viento esta dada por la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \eta_t \rho A V^3 \quad (2.6)$$

η_t es la eficiencia total dada por las eficiencias mecánica y eléctrica η_m, η_e respectivamente.

De la tabla 4 teniendo ya una potencia en función del área y asumiendo una potencia pequeña a extraer, despejando el diámetro del área obtenemos:

$$D = \sqrt{\frac{8 * P_{real}}{\eta_{total} * P(A) * \pi}} \quad (2.7)$$

La potencia real es de 142 Watts y la potencia en función de área es promediando las velocidades del vehículo desde el arranque a un máximo de 100 km/h, es decir a 49.8 km/h

El diámetro optativo de esta primera ecuación es de 0.50 metros o 50 cm que es el diámetro supuesto para la estética de un vehículo.

Aplicando las anteriores ecuaciones aumentando el promedio de velocidad y dejando el diámetro hallado se obtiene el siguiente grafico:

Figura 3. Potencia captada a velocidad promedio. Diámetro 0.5 metros.

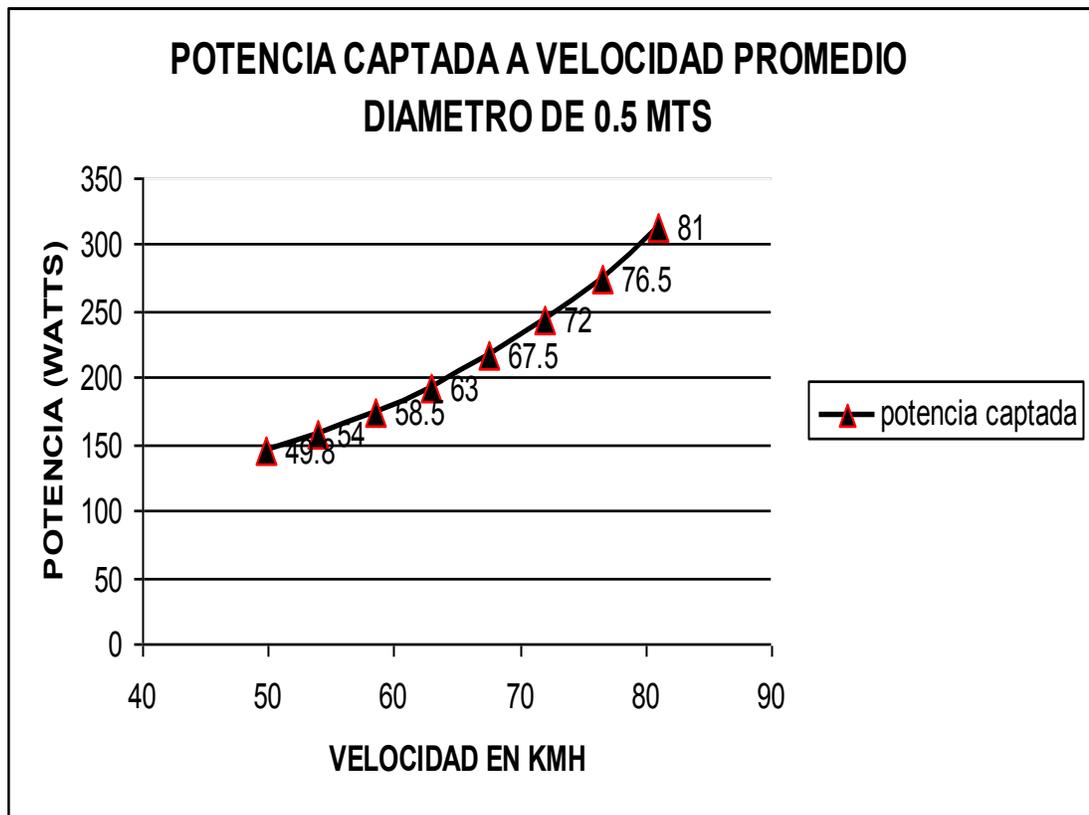


Figura 4. Potencia a diferentes alturas y temperaturas.

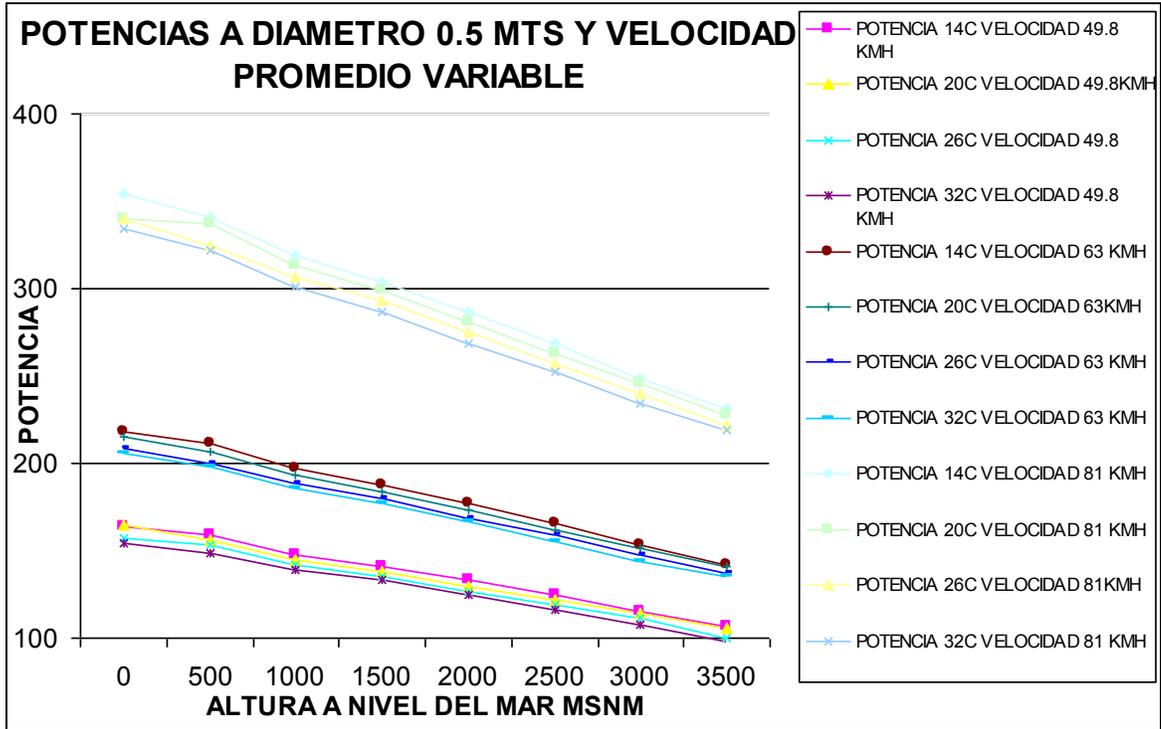
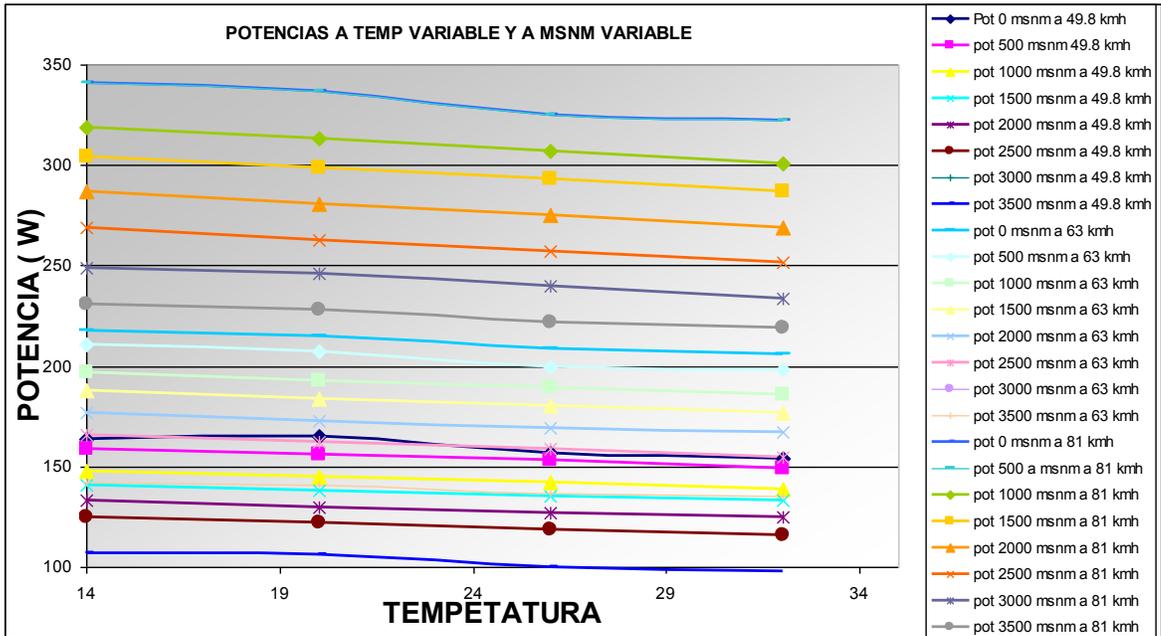


Figura 5. Potencia a temperaturas variable y altura variable



Con los datos anteriores se puede estimar un cálculo de potencia “ideal” puesto que esto es el principio de una serie de cálculos complejos que se requieren para hallar una potencia real que nos da una aeroturbina.

2.2. CONFIGURACIÓN AERODINÁMICA DEL ROTOR. NUMERO DE PALAS

Para el diseño de un generador de energía eólica viene determinada por la velocidad del viento incidente en el rotor. Si hay velocidades de viento altas se debe elegir un aerogenerador rápido con una razón de punta de pala λ_0 entre 5 y 8, luego la máquina tendrá 2 o 3 palas. Si la velocidad del viento es moderada se debe elegir una aeroturbina multipala con λ_0 entre 1 y 2. En la practica el número de palas depende del cociente λ_0 , que es la razón de punta de pala. Ya que relaciona la velocidad de viento con la de rotación (Ver formula número (3.7))

Tabla 5. Razones de Punta de Pala para un determinado Número de Alabes

$\lambda =1$	se adoptaran de	8	24
$\lambda =2$	se adoptaran de	6	12
$\lambda =3$	se adoptaran de	3	6
$\lambda =4$	se adoptaran de	2	4
$\lambda >5$	se adoptaran de	2	3

Con estos valores de λ_0 podemos configurar una potencia “mas” real que nos permita un próximo calculo mejor y eficiente.

Aplicando la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \eta_i \rho A V^3 \quad (2.8)$$

Donde η_i es a la eficiencia total que lleva los coeficientes, ideal de potencia, de influencia del número finito de palas, y de influencia del rozamiento del aire en las aspas η_i , η_b , η_p , respectivamente. Ver las ecuaciones (3.2) (3.3) y (3.4)

$$\eta_i = \lambda^2 * (1 - a) * \frac{\sqrt{1 + (1 - a)}}{\lambda^2} \quad (2.9) ,$$

Donde a es el coeficiente de aminoración tomado idealmente como 1/3. Depende de la velocidad de salida.

$$\eta_b = \left(1 - \frac{0.93}{b \sqrt{\lambda_0^2 + 0.445}} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$\eta_p = 85\% \quad (2.11)$$

$$P = T * \omega \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3 \eta \quad (2.13)$$

en el cual πr^2 es el área circular del rotor

$$\omega = \frac{\lambda_0 V}{r} \quad (2.14)$$

Despejando el torque de la ecuación (3.5) y relacionándola con (2.13) y (2.14)

Obteniendo :

$$T = \frac{\rho r^3 V^2 \eta}{2 \lambda} \quad (2.15)$$

Para una velocidad promedio de 63 kph o 17.5 m/s escogiendo un promedio de velocidad de un automóvil en la ciudad de Cali, con una densidad del viento de 1.07 kg/m³ , Obtenemos los siguientes gráficos de potencia y torque con diferentes números de palas a diferentes λ_0

Figura 6. Potencias y torques para $\lambda_0 = 1$

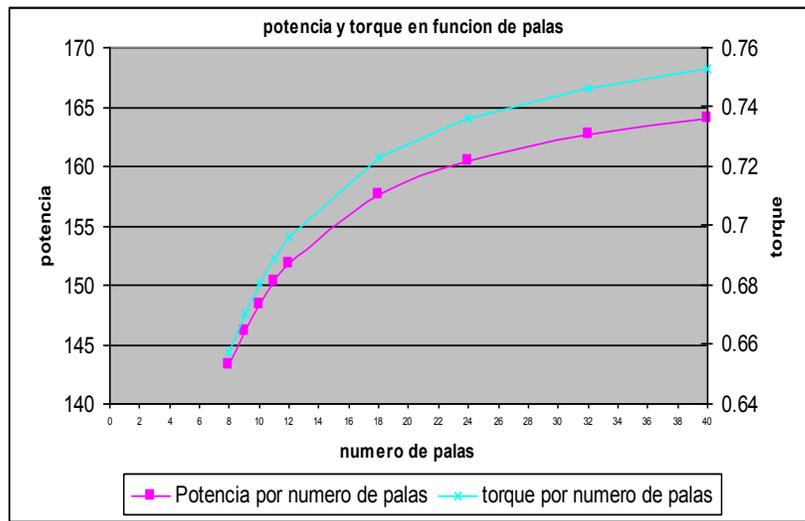


Figura 7. Potencia y torques para $\lambda_0 = 2$

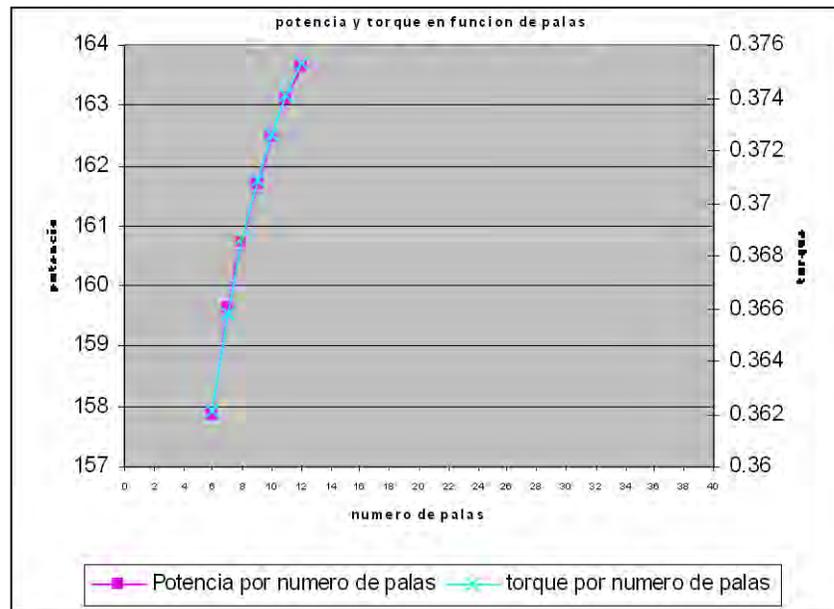


Figura 8. Potencias y torques para $\lambda_0 = 3$

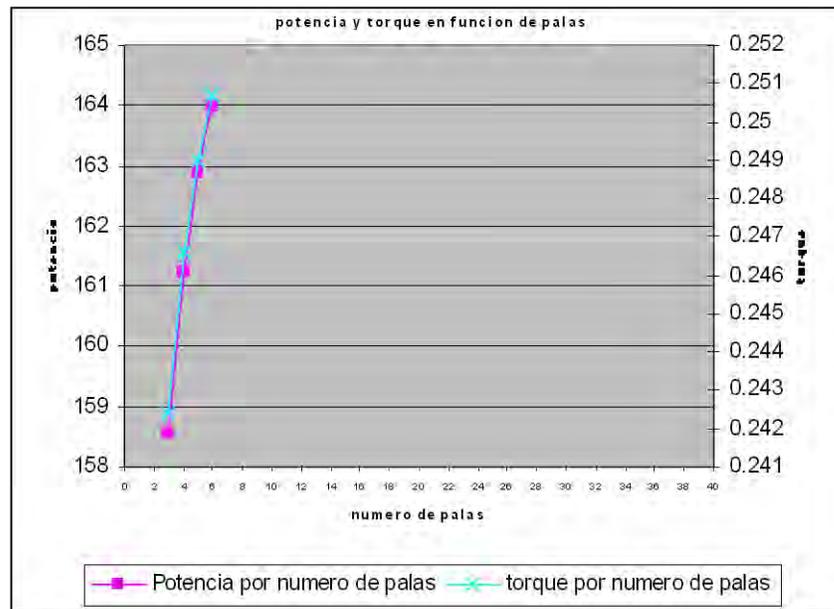


Figura 9. Potencias y torques para $\lambda_0 = 4$

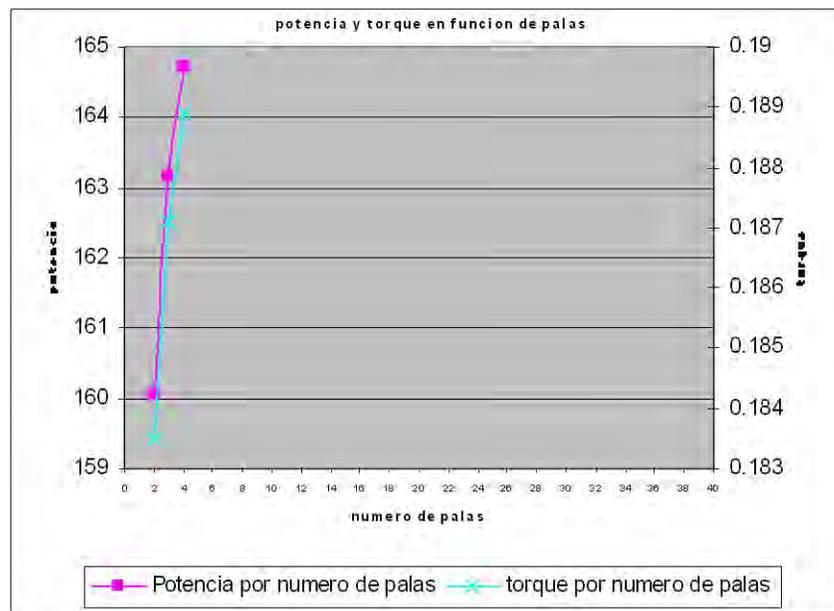


Figura 10. Potencias y torques para $\lambda_0 = 5$

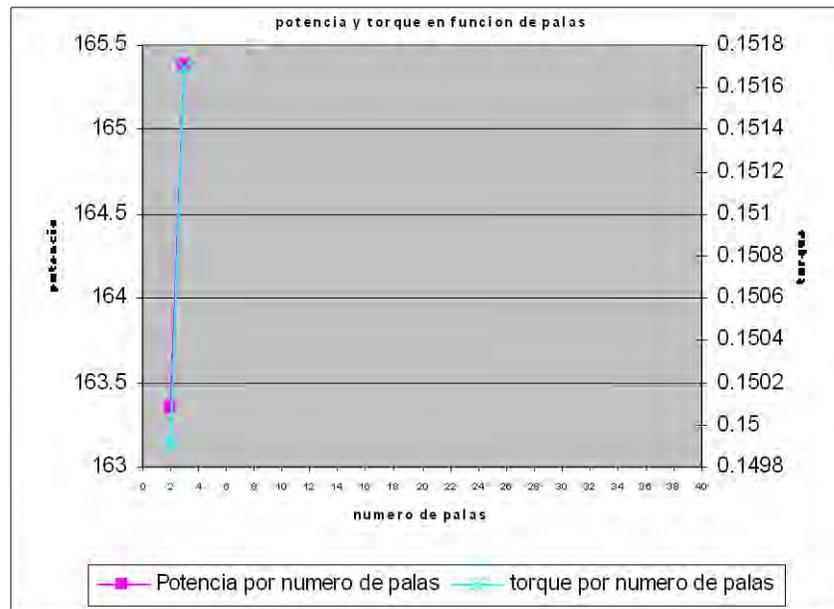


Figura 11. Para número de palas igual a 2 a diferentes λ_0

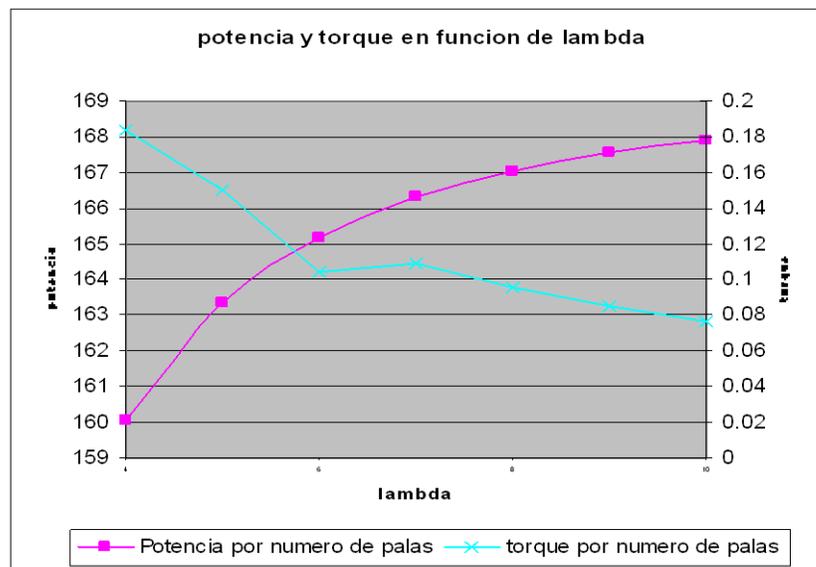
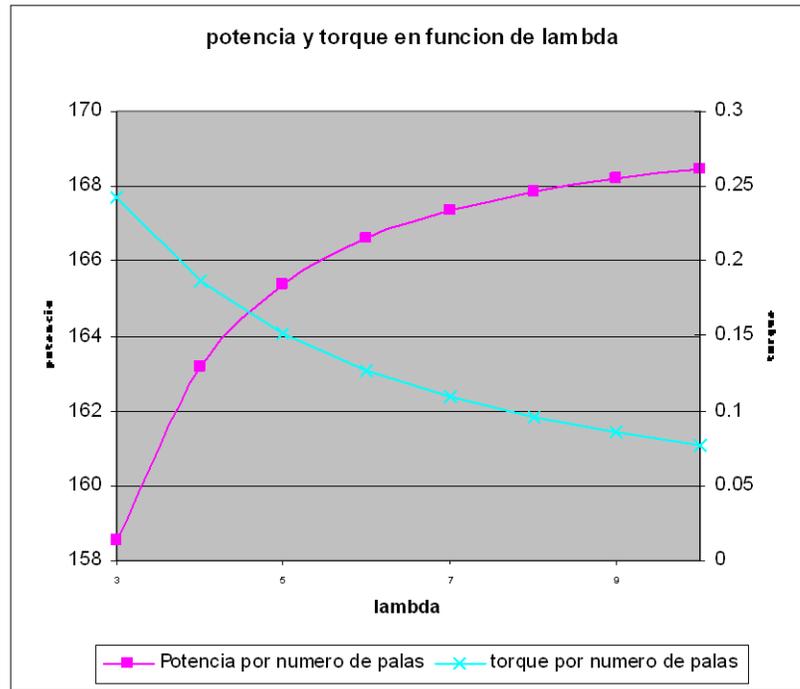


Figura 12. Potencias y torques en función de lambdas



Con cada uno de los resultados anteriores y observando las graficas, podemos ver que aun que con λ_0 bajos, valores entre 1 y 2 la potencia disminuye relativamente poco, pero con el incremento del número de palas aumenta a un buen valor y además mejora notablemente el torque.

La tablas 5 muestra considerablemente estos cambios representados en los gráficos:

Tabla 6. Relación de palas y λ_0 para hallar Potencia, Vel. de Giro y Torque

# de palas	λ_0	Pot(Vatios)	rpm	Torque(N-m)
2	10	167.92	6626	0.077
2	9	167.56	5964	0.0854
2	8	167.05	5301	0.0958
2	7	166.32	4638	0.109
2	6	165.19	3976	0.104
2	5	163.35	3313	0.1499
3	10	168.44	6626	0.0773
3	9	168.2	5964	0.0857
3	8	167.86	5301	0.0962
3	7	167.37	4638	0.1097
3	6	166.62	3976	0.1274
3	5	165.38	3313	0.1517
2	4	160.04	2650	0.1835
3	4	163.16	2650	0.1871
4	4	164.73	2650	0.1889
3	3	158.55	1988	0.2424
4	3	161.25	1988	0.2466
5	3	162.88	1988	0.249
6	3	163.97	1988	0.2507
6	2	157.87	1325	0.3621
7	2	159.64	1325	0.3658
8	2	160.74	1325	0.3687
9	2	161.7	1325	0.3709
10	2	162.47	1325	0.3726
11	2	163.1	1325	0.3741
12	2	163.63	1325	0.3753
8	1	143.31	662.67	0.6574
9	1	146.11	662.67	0.6702
10	1	148.37	662.67	0.6806
11	1	150.24	662.67	0.6891
12	1	151.81	662.67	0.6963
18	1	157.59	662.67	0.7229
24	1	160.52	662.67	0.7363
32	1	162.74	662.67	0.7465

Los anteriores datos nos muestran la cantidad de palas y las potencias aproximadas que podemos desarrollar para así construir el generador.

Debemos tener en cuenta que estos resultados son idóneos, que nos pueden dar una visión del caso real.

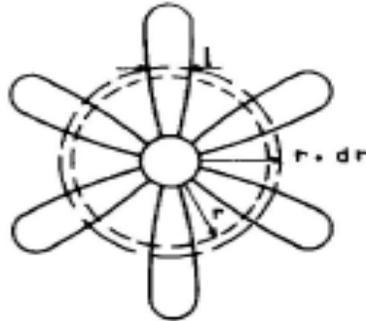
Para seguir nuestra construcción geométrica de pala, perfil y cuerda consideraremos una teoría que expondremos en el siguiente capítulo.

3. TEORIA DE LA AEROTURBINA SIMPLIFICADA.

3.1. RELACIÓN BÁSICA PARA CALCULAR LA CUERDA DE LA PALA

Para hallar la cuerda en función del radio $l(r)$ se debe evaluar la fuerza axial sobre la sección situada entre r y $r+dr$ desde el eje de rotación. Dicho cálculo se lleva a cabo asumiendo que el aerogenerador funciona en condiciones óptimas de acuerdo con la fórmula de Betz

Figura 13. Discretización de elemento de Pala



Fuente: LE GURIERS, Desire. Wind Power Plants: Theory and Design. Oxford: Pergamon Express, 1982. p. 78

3.1.1. Primera Evaluación. De acuerdo con la teoría de Betz, el empuje axial viene dado por :

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.1)$$

Y la velocidad del viento a través del rotor es:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.2)$$

Donde V_1 y V_2 son las velocidades aguas arriba y aguas abajo del rotor (**Fig. 1**)

La potencia es máxima cuando $V_2 = \frac{V_1}{3}$. Entonces, la fuerza axial será:

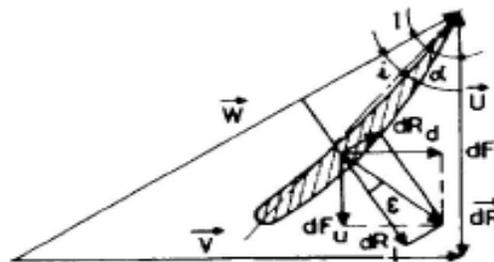
$$F = \frac{4}{9} \rho S V_1^2 = \rho S V^2 \quad (3.3)$$

Asumiendo que todo elemento del área barrida el empuje axial afecta total y proporcionalmente a su área, se encuentra que la contribución de los elementos situados entre r y $r+dr$ de acuerdo con la **figura 3** es:

$$dF = \rho V^2 dS = 2\pi \rho V^2 r dr \quad (3.4)$$

3.1.2. Segunda Evaluación. Si la velocidad de rotación es ω , la velocidad lineal del elemento de pala a distancia r es $U(r) = \omega r$ luego $\vec{V} = \vec{U} + \vec{W}$ o bien $\vec{V} - \vec{U} = \vec{W}$ ver **figura 4**. El cual V es la velocidad axial del viento a través del rotor, U velocidad de rotación de pala y W es la velocidad relativa del aire respecto de la pala

Figura 13. Relación de Velocidades y Descomposición de fuerzas en un perfil de pala.



Fuente: LE GURIERS, Desire. Wind Power Plants. Theory and Design. Oxford: Pergamon Express, 1982. p. 78

Estimamos las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el elemento de pala de longitud dr . Tenemos para las fuerzas de resistencias y sustentación:

$$dR_l = \frac{1}{2} \rho C_l W^2 l dr; \quad (3.5)$$

$$dR_d = \frac{1}{2} \rho C_d W^2 l dr; \quad (3.6)$$

Donde la superficie $dS = l dr$ y l la cuerda de la pala en la sección r

La fuerza resultante $dR = \frac{dR_l}{\cos \varepsilon}$, donde ε es el ángulo entre dR y dR_l

Con la relación de las fuerzas de sustentación y resistencia, podremos hallar la relación entre los ángulos de incidencia (i), ángulo de inclinación (I) y ángulos de sustentación podemos hallar una relación que nos permita hallar la longitud de la cuerda, teniendo el coeficiente de sustentación C_l de determinado perfil aerodinámico, b el número de palas y l la longitud de la cuerda para una sección de pala de radio (r).

Obtenemos:

$$C_l b l = \frac{16\pi}{9} * \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0 \frac{r}{R} + \frac{4}{9}}} \quad (3.7)$$

Siendo conocidos el diámetro de las palas (**$2R$, R es el radio del rotor**) y la razón de punta de pala λ_0 , el ángulo de inclinación I puede calcularse de la expresión cotangente, para cada valor de r como:

$$\cot I = \frac{3}{2} \lambda = \frac{3}{2} \lambda_0 \frac{r}{R}; \quad (3.8)$$

r es el radio de sección de pala

Si, además, el ángulo de calaje es conocido, el ángulo de incidencia es conocido e $i = I - \alpha$, se conoce C_l de las curvas características del perfil escogido.

Por consiguiente, la expresión para $C_l b l$ nos permite determinar la cuerda de cada pala en función de r , siempre que b este fijado. Además la Ecuación (4.8) demuestra que para una razón de punta de pala λ_0 fija, la cuerda se incrementa desde la punta de la pala hacia el eje.

3.2. EFICIENCIA AERODINÁMICA TEÓRICA DEL ELEMENTO DE PALA

La eficiencia aerodinámica del elemento de pala entre r y $r+dr$ puede definirse por el cociente:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{M\omega}{FV} = \frac{\text{PotenciaUtil}}{\text{PotenciaTransmitidaporelViento}} \\ &= \frac{\omega dM}{VdF_v} \\ &= \frac{UdF_u}{VdF_v}\end{aligned}$$

(3.9)

Observando la **figura 13** con dF_u y dF_v las proyecciones de dR sobre el plano de rotación y el eje de giro respectivamente, dP_u la contribución del elemento de pala dr a la potencia proporcionada por el rotor de dP_t la potencia suministrada por el viento al elemento de pala. Contando con la pérdida ε y $\tan \varepsilon = C_d/C_l$ se puede escribir la potencia

$$\eta = \frac{1 - \tan \varepsilon \cot I}{\cot I + \tan \varepsilon} \cot I = \frac{1 + \tan \varepsilon \cot I}{1 - \tan \varepsilon \cot I} \quad (3.10)$$

Es decir, η es mayor cuanto menor es $\tan \varepsilon$.

4. TEORIA DE VORTICES DE GLAUERT.

Esta teoría tiene la virtud de tener en cuenta la rotación inducida del aire que pasa a través del rotor.

Para las palas de longitud finita, una hoja de verticidad se desarrolla aguas abajo del rotor eólico, que puede representarse como dos vórtices viajeros, uno en el eje y el otro en punta de pala y otro ligado a la pala.

Como en cada extremo de pala traza una hélice en la corriente de aire conforme rota la turbina, cada vértice viajero tendrá forma helicoidal. Lo mismo le sucede al vórtice generado cerca del eje, el cual se sumará a la acción de los vórtices en las otras palas.

Un vórtice central, centrado en el rotor con intensidad de circulación $\Gamma_0 = b\Gamma$ (Γ circulación del vórtice ligado a cada pala, $\Gamma = \int (\nabla \times \vec{v}) \cdot d\vec{s} = \oint \vec{v} \cdot d\vec{l}$

Los vórtices ligados a cada pala.

Los vórtices helicoidales desprendidos en la punta de la pala.

En este sentido, la Mecánica de Fluidos nos dice que la velocidad inducida por un vórtice puede obtenerse por medio de la ley de Biot-Savart del mismo modo que se obtiene un campo magnético creado por una corriente eléctrica que posee la misma forma que los vórtices considerados.

Como resultado, sea v la velocidad axial inducida aguas abajo del rotor por el sistema de vórtices, la cual va en dirección opuesta a la velocidad del viento V_1 . Sea además Ω la velocidad angular inducida aguas abajo del rotor, la cual va en sentido contrario de la rotación de las palas.

Como se demostrará en las siguientes ecuaciones la teoría básica de Glauert en la siguiente forma que pueda ser comprensible para cualquier observador:

Entonces se tiene:

- $V = V_1 - v/2$ a través del rotor.
- $V_2 = V_1 - v$ aguas abajo del rotor

La velocidad angular del aire relativo a las palas a través del rotor se incrementa una cantidad $\Omega/2$.

La Velocidad angular del aire relativo a las palas aguas abajo del rotor se incrementa una cantidad Ω .

De las dos primeras ecuaciones se puede probar que $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$, luego conserva el valor de V obtenido por Betz es válido.

Aguas abajo del rotor la velocidad angular del aire es:

$$\omega + \Omega = h\omega \Rightarrow (h-1)\omega$$

Y en el plano del rotor:

$$\omega + \frac{\Omega}{2} = \frac{1+h}{2}\omega \quad \mathbf{(4.1)}$$

ω es la velocidad angular del rotor

h y k son parámetros numéricos dados a condiciones ideales.

Los subíndices de u y v son respectivamente fuerza par y axial del rotor, como los subíndices l y d son de las fuerzas aerodinámicas lift y drag (sustentación y arrastre).

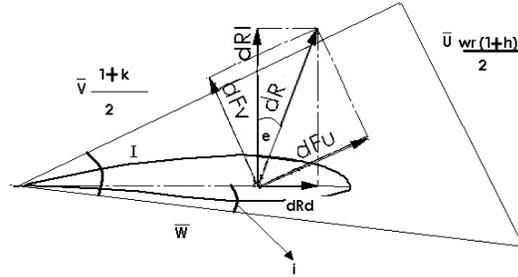
A una distancia r del eje del rotor, esto corresponde a una velocidad:

$$U = \frac{1+h}{2}\omega r \quad \mathbf{(4.2)}$$

Sea ahora la velocidad $V_2 = kV_1$, entonces la velocidad axial a través del rotor se escribe:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{1+k}{2}V_1 \quad \mathbf{(4.3)}$$

Figura 14. Velocidades y Fuerzas implicando la Teoría de Glauert



Fuente: LE GURIERS, Desire. Wind Power Plants: Theory and Design. Oxford: Pergamon Express, 1982. p. 86

El ángulo de inclinación (I) y la velocidad relativa W en r vienen dados en el plano del rotor por las relaciones:

$$\cot I = \frac{U'}{V} = \frac{\omega r}{V_1} \frac{1+h}{1+k} = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda_e \quad (4.4)$$

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2 \cos I} \quad (4.5)$$

4.1. CÁLCULOS DE EMPUJE AXIAL Y TORQUE

Consideramos de nuevo el elemento de pala entre r y $r+dr$. Se verán las acciones aerodinámicas de dos formas distintas

- Evaluando la acción aerodinámica sobre los perfiles-
- Aplicando las leyes fundamentales de la dinámica al flujo entre r y $r+dr$.

4.1.1. Primera Valoración. Viendo las ecuaciones (3.5) y (3.6)

Recordando que C_l y C_d son los coeficientes de sustentación y arrastre y ρ es la densidad del aire.

La componente axial de dR

$$dF_v = dR_l \cos I + dR_d \sin I = \frac{1}{2} \rho W^2 dr (C_l \cos I + C_d \sin I) \quad (4.6)$$

Para la componente tangencial (en el plano de rotación)

$$dF_u = dR_l \sin I - dR_d \cos I = \frac{1}{2} \rho l W^2 dr (C_l \sin I - C_d \cos I) \quad (4.7)$$

Como $\tan \varepsilon = \frac{C_d}{C_l}, \quad (4.8)$

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_l \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr; dF_u = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_l \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (4.9)$$

La contribución del elemento de pala situado entre r y $r+dr$ al empuje axial es:

$$dF = b dF_v = \frac{1}{2} \rho b l W^2 C_l \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (4.10)$$

b es el numero de palas, l es la longitud de Cuerda.
Y para el torque aerodinámico:

$$dM = r b dF_u = \frac{1}{2} \rho b l W^2 C_l \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} r dr \quad (4.11)$$

Ahora determinamos esas dos cantidades y aplicamos los teoremas generales de la dinámica al flujo de aire que fluye a través del rotor entre r y $r+dr$.

4.1.2. Segunda Valoración. Consideremos el momento axial del flujo a través de la corona circular de anchura dr , el empuje es igual al producto del flujo másico que atraviesa el elemento y el cambio de velocidad axial.

$$dF = \dot{m} \Delta V = \dot{m} (V_1 - V_2) \quad (4.12)$$

Con \dot{m} al flujo másico evaluado por discretización de elemento de pala y la valoración de la velocidad por las pérdidas de Glauert

$$\dot{m} = \rho 2\pi r dr V = \rho \pi r dr (1+k) V_1 \quad (4.13)$$

Luego de la ecuación (5.12) y la (5.13) y despejando V_2 de (5.3)

$$dF = \rho \pi r dr V_1^2 (1-k^2) \quad (4.14)$$

Del mismo modo, considerando el momento angular, se obtiene para el torque elemental:

$$dM = \dot{m} \Delta \omega r^2 = \dot{m} r^2 \Omega \quad (4.15)$$

Con $\Delta\omega = \Omega$ el cambio en la velocidad angular del aire. Entonces:

$$dM = \rho\pi r^3 dr V_1(1+k)\Omega$$

$$dM = \rho\pi r^3 dr \omega V_1(1+k)(h-1) \quad (4.16)$$

La ecuación (4.16) sale de (4.13) y (4.15)

Comparando las expresiones obtenidas para dF ((4.10) y (4.14)) en ambas estrategias se obtiene

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2\sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2\cos I} :$$

$$C_l b l = \frac{2\pi r \omega V_1(1+k^2)\cos \varepsilon}{W^2 \cos(I-\varepsilon)} = \frac{8\pi r(1-k)\cos \varepsilon \sin^2 I}{(1+k)\cos(I-\varepsilon)} \quad (4.17)$$

E igualando las expresiones para dM, ecuaciones (4.11 y 4.16)

$$C_l b l = \frac{2\pi r \omega V_1(1+k)(h-1)\cos \varepsilon}{W^2 \cos(I-\varepsilon)} = \frac{4\pi r(h-1)\sin 2I \cos \varepsilon}{(h-1)\sin(I-\varepsilon)} \quad (4.18)$$

Después de una pequeña manipulación, de (4.17 y 4.18) se obtiene G y E que son parámetros simplificados para hallar valores numéricos ideales.

$$G = \frac{1+k}{1-k} = \frac{C_l b l \cos(I-\varepsilon)}{8\pi r \cos \varepsilon \sin^2 I} \quad (4.19)$$

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_l b l \sin(I-\varepsilon)}{4\pi r \cos \varepsilon \sin 2I} \quad (4.20)$$

Y dividiendo (4.19) entre (4.20) se obtiene:

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cot(I-\varepsilon)\cot I$$

4.2. COEFICIENTE DE POTENCIA LOCAL

La potencia máxima susceptible de ser extraída del viento que pasa a través de la corona circular($r, r+dr$) es:

$$dP_{util} = \omega dM = \rho \pi r^3 dr \omega^2 (1+k)(h-1) V_1 \quad (4.21)$$

Que corresponde a un coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{dP_{util}}{\rho \pi r dr V_1^3} = \frac{\omega^2 r^2}{V_1^2} (1+k)(h-1) = \lambda^2 (1+k)(h-1) \quad (4.22)$$

Valor máximo del C_p local para una turbina ideal.

Consideremos una aeroturbina ideal con número infinito de palas, sin resistencia. $C_d=0$ entonces $\tan C_d/C_l=0$ luego:

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cot^2 I = \lambda^2 \frac{(1+h)^2}{(1+k)^2} \quad (4.23)$$

bien:

$$\lambda^2 = \frac{1-k^2}{h^2-1} \Rightarrow h = \sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} \quad (4.24)$$

Introduciendo este valor de h en la expresión de $C_d=$ se obtiene:

$$C_p = \lambda^2 (1+k) \left[\sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} + 1 \right] \quad (4.25)$$

Para cada valor fijado de λ , C_p , tiene un máximo cuando $dC_p/dk=0$, lo que nos proporciona la relación:

$$\lambda^2 = \frac{1-3k+4k^3}{3k-1} \quad (4.26)$$

Se obtiene la siguiente ecuación cúbica:

$$4k^3 - 3k(\lambda^2 + 1) + \lambda^2 + 1 = 0$$

Y escribiendo: $k = \sqrt{\lambda^2 + 1} \cos \theta$ podemos pasar de una ecuación cúbica a la ecuación lineal

$$\cos(3\theta - \pi) = \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \quad (5.27)$$

4.3 VALORES ÓPTIMOS PARA I Y C_lBL

Se ha obtenido para el ángulo de inclinación I y C_lbl los valores:

$$\begin{aligned} \cot I &= \lambda_e = \frac{1+h}{1+k} \lambda \\ &Y \\ C_{lbl} &= \frac{8\pi(1-k)\cos\varepsilon\sin^2 I}{(1+k)\cos(I-\varepsilon)} \end{aligned}$$

Por lo anterior, la determinación de θ nos da k, después h y por lo tanto el ángulo de inclinación I.

Para calcular los valores óptimos para C_lbl consideremos una turbina eólica ideal sin resistencia ($\varepsilon=0$). Se puede escribir:

$$\frac{C_{lbl}}{r} = \frac{8\pi(1-k)}{1+k} \frac{1}{\lambda_e \sqrt{\lambda_e + 1}} \quad (4.28)$$

Estas expresiones permiten determinar valores para I y C_lbl optimizados para cada condición de operación. Su conocimiento es indispensable para fijar la cuerda de la pala y ángulo de calaje para cada distancia r.

Si el ángulo de incidencia i es conocido, el coeficiente de sustentación C_i y el ángulo de calaje $\alpha = I - i$ pueden determinarse. Dado el número de palas b la cuerda de la pala a distancia r puede ser calculado.

Por tanto, el problema se reduce a la elección del ángulo de incidente o ataque i.

El C_p Local alcanzable por palas con resistencia finita

Recuperando el elemento de pala r y r+dr. El coeficiente local de potencia local está definido por:

$$C_p = \frac{\omega dM}{\rho \pi r dr V_1^3} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{\omega dM}{V dF} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{U dF_u}{V dF_v} \quad (4.29)$$

Sustituyendo dF , dF_v , dF_u y teniendo en cuenta $\cot I = \lambda \frac{1+h}{1-k}$, $\tan \varepsilon = \frac{C_d}{C_l}$ se obtiene:

$$C_p = \frac{(1+k)(1-k^2)}{(1+h)} \frac{1 - \tan \varepsilon \cot I}{1 + \tan \varepsilon \tan I} \quad (4.30)$$

4.4. CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA AEROTURBINA.

La determinación de las características mecánica (torque, coeficiente de potencia en función de λ_0) es una tarea necesaria, pues su conocimiento antes de la construcción permite realizar modificaciones en el diseño inicial para mejorar su eficiencia.

Resumamos los resultados obtenidos hasta ahora:

Empuje axial dF y torque dM aerodinámicos para cada sección local.

$$dF = \rho \pi r V_1^2 (1-k^2) dr \qquad dM = \rho \pi r^3 \omega V_1 (1+k)(h-1) dr$$

Con las expresiones:

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2 \cos I} \qquad \cot I = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda_0 \frac{r(1+h)}{R(1+k)}$$

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_l b l \cos(I-\varepsilon)}{8 \pi r \cos \varepsilon \sin^2 I} \qquad E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_l b l \sin(I-\varepsilon)}{4 \pi r \cos \varepsilon \sin 2I}$$

Integrando para hallar el empuje y torque totales, teniendo en cuenta la teoría de Vórtices de Glauert

$$F = \int_0^R \rho \pi V_1^2 (1-k^2) r dr \qquad M = \int_0^R \rho \pi V_1 \omega (1+k)(h-1) r^3 dr$$

Y los coeficientes correspondientes

$$C_f = \frac{2F}{\rho S V_1^2} = 2 \int_0^1 (1 - k^2) \frac{r}{R} \left(d \frac{r}{R} \right) \quad \text{y} \quad C_m = \frac{2M}{\rho S V_1^2 r} = 2 \int_0^1 (1 + k)^2 ECotI \frac{r^2}{R^2} d \left(\frac{r}{R} \right)$$

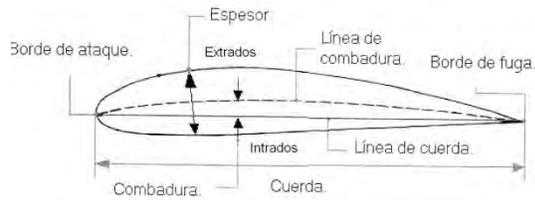
5. PERFIL AERODINÁMICO

El perfil de una pala de una aeroturbina es igual al perfil de un ala de un avión.

Este perfil es una figura geométrica que se obtiene al realizar un corte del ala en un plano perpendicular a la envergadura o largo de la pala. De la forma del perfil depende en gran medida el comportamiento de la turbina, tanto la capacidad de sustentación como la resistencia aerodinámica de la pala están influidas por el perfil.

La forma del perfil está determinada por la línea de combadura y por su alto máximo, la línea de combadura determina el punto medio del perfil a todo lo largo de la cuerda (largo del perfil). La altura máxima del perfil se localiza a 30% de la cuerda desde el borde de ataque (frente de la hélice) ⁽¹⁾

Figura 15. Partes de un perfil aerodinámico.



Un parámetro de diseño importante es la combadura máxima, que es la máxima distancia entre la línea de combadura y la línea de cuerda, que une el borde de ataque con el de fuga (extremo posterior de la hélice).

La altura y combadura máximas son los parámetros que se usan para el diseño del perfil.

Los perfiles tienen distintos nombres según su geometría. Se denominan biconvexos si el intradós y el extradós son convexos y plano convexos si tienen el extradós convexo y el intradós plano y de doble curvatura si el intradós y el extradós son cóncavos. (Ver **Figura 15.**)

En general, los tipos de perfiles utilizados en las máquinas eólicas son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), y vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría.

5.1. NOMENCLATURA DE PERFILES NACA 4 DÍGITOS

- La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en % proporcionando la máxima curvatura.
- La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura.
- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo en % respecto a la cuerda.

El perfil se obtiene mediante dos parábolas tangentes en el punto de máxima línea media.

Ejemplo el perfil NACA2415 tiene un 2% de altura máxima de la línea media, situada a un 40% del borde de ataque, con un espesor relativo del 15%.

Los perfiles NACA 44XX tienen el intradós con parte convexa, por lo que son de construcción más compleja y al igual que los anteriores, el XX indica el máximo espesor del perfil.

5.2. NOMENCLATURA DE PERFILES NACA 5 CIFRAS

- La primera cifra indica el valor del coeficiente de sustentación ideal de la curvatura del perfil, multiplicado 20 y dividido por 3
- Las dos cifras siguientes indican el doble de la posición de la flecha máxima de la línea media (curvatura) en % de la cuerda
- Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo de la cuerda en % igual al perfil NACA de 4 cifras.
- El perfil se obtiene mediante una parábola cúbica conectada a una línea recta que llega hasta el borde de salida.
- La serie 230XX muy utilizada en rotores de aeroturbinas se corresponde con

perfiles simétricos biconvexos. Indicando la relación XX el espesor máximo.

5.3. MODIFICACIONES PERFILES NACA 4 Y 5 DÍGITOS

Se pueden añadir dos cifras más a la nomenclatura básica de 4 y 5 cifras cuyo significado es el siguiente:

La primera indica el radio de curvatura de la distribución de espesores en el borde de ataque con una escala entre 0 y 8, tal que el número 6 indica perfil no modificado. La segunda cifra indica la posición de máximo espesor en décimas de cuerda, no estando localizado en el 30%.

Existen otros tipos de perfiles como los de la serie NASA (antecesora de la NACA), Göttinger, Clark, RAF que incluyen en su nomenclatura no sólo características geométricas, sino su comportamiento aerodinámico

5.4. PERFILES ZAREA SERIE SZ-1500

Esta serie es una evaluación experimental de ocho perfiles, que consisten en la obtención de un nuevo perfil combinando el intradós de un perfil existente con el extradós de otro perfil de las características experimentales conocidas o de una familia distinta. Todos los perfiles considerados para tal combinación tienen curvas características experimentales conocidas. Estos perfiles fueron evaluados por la Facultad de Ingeniería de U.C.V en Venezuela

Este tipo de perfiles aplicaciones como por ejemplo turbinas eólicas de pequeña y mediana potencia, las aspas operan con flujos caracterizados por números de Reynolds en 2×10^5 y 9×10^5 aproximadamente.

Como se ha expuesto anterior mente la serie SZ consiste en obtener un nuevo perfil combinando el intradós de un perfil A existen con el extradós de otro perfil B existente para los cuales se conocen las curvas características. Los perfiles A y B pueden pertenecer a la misma clase o a clases distintas.

El conocimiento previo de las curvas características de los perfiles A y B es necesario, tanto para seleccionar perfiles aerodinámicos eficientes como para la comparación con las curvas características de los perfiles C resultantes de la combinación y así determinar cuáles de los nuevos perfiles son mejores que los perfiles base.

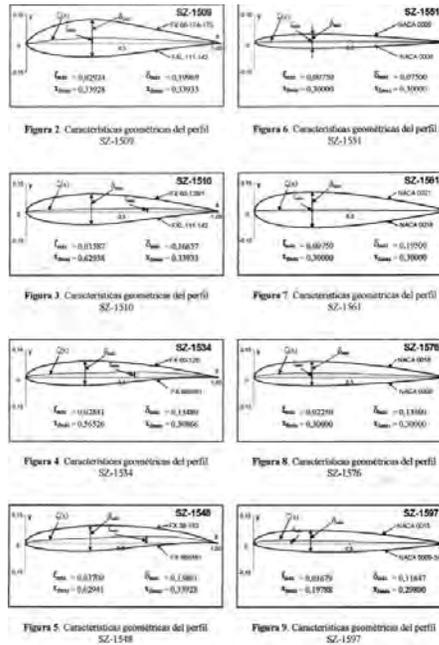
Se seleccionaron perfiles NACA de cuatro y cinco dígitos y perfiles de las clases FX y FXL.

5.4.1. Características Geométricas. Los ocho perfiles evaluados experimentalmente son identificados como: SZ-1509, SZ-1510, SZ-1534, SZ-1548, SZ-1551, SZ-1561, SZ-1576 y SZ-1597. Ver **figura 7**.

Para el estudio de la micro turbina eólica se experimentara con los perfiles comúnmente usados en turbinas eólicas, así como las serie NACA 4 dígitos 4412, las series NACA 5 dígitos 23013 y 23015 y los perfiles Zarea serie 1500.

Estos últimos perfiles se escogieron por ser adecuados a la realidad de nuestra investigación.

Figura 16. Perfiles Zarea serie SZ-1500



ZAREA Stefan, IRUSQUIN Ignacio, LEAÑEZ Eduardo. Evaluación Experimental de ocho perfiles aerodinámicos Serie SZ-1500 para bajo números de Reynolds. En: Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. Vol. 17, No.2 (Mar.-Sep.2002); p. 39-58

6. RESEÑA AERODINAMICA DEL AUTOMOVIL.

La aerodinámica tiene su mayor impacto en los carros y camiones modernos a través de su contribución a las cargas sobre el carro. Las fuerzas aerodinámicas interactúan con el vehículo causando arrastre, sustentación, fuerzas laterales, momentos y ruidos. Todo aquello trae como consecuencia alteraciones en el consumo de combustible, el manejo y la estética del vehículo.

Los parámetros que rigen las formas de un auto de calle son muy diferentes a los de un auto de carreras. Aunque los dos son producto de limitaciones impuestas por el hombre y por la naturaleza, estas imposiciones surgen de requerimientos muy diferentes: mientras que en los autos de carreras la eficiencia aerodinámica, la sustentación negativa y las reglas propias de cada categoría son las que dan forma al auto en los autos de calle la estética, la funcionalidad, el consumo de combustible, la seguridad y el uso particular del carro son los que determinan su forma.

6.1. MECÁNICA DE FLUIDOS A TRAVÉS DE UN VEHÍCULO

El flujo sobre el cuerpo de un carro está gobernado por la relación entre velocidad y presión expresada en la ecuación de Bernoulli:

$$P_{estatica} + P_{dinamica} = P_{total}$$
$$P_s + \frac{1}{2} \rho V^2 = P_{total} \quad (6.1)$$

Donde:

r es longitud característica.

V: velocidad

Antes de aproximarse al vehículo la presión estática es simplemente la ambiental. La presión dinámica es producida por la velocidad relativa, que es constante para todas las líneas de corriente aproximándose al vehículo. Por lo tanto la presión total es la misma para todas las líneas de corriente. Al aproximarse el fluido

vehículo, las líneas de corriente se “parten”, algunas van hacia la parte de arriba y otras por la parte de abajo del vehículo. Por interferencia, una línea de corriente debe ir derecho al cuerpo y estancarse (generalmente en el parachoques del carro), con lo cual la velocidad relativa se va a cero y la presión dinámica observada en ese punto debe ser cero.

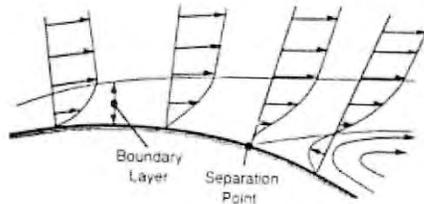
La situación de las líneas de corriente al aproximarse al capó es similar a lo que sucede con fluido que pasa a través de un cilindro. Para que las líneas de corriente se doblen hacia arriba la presión estática en esta región debe ser mayor que la ambiente para así proveer la fuerza necesaria para doblar el fluido. De la misma forma cuando el flujo se voltea para seguir la primera parte del capó, la presión debe ser menor que la ambiental de tal forma que el fluido se “doble” hacia abajo, y por lo tanto, la velocidad se debe incrementar.

La ecuación de Bernoulli explica como la presión y la velocidad debe variar sobre el cuerpo de un auto. Si no existiera la fricción el aire simplemente subiría hasta el techo del carro y bajaría por la parte de atrás, intercambiando presión por velocidad como lo hizo adelante. Para este caso las fuerzas de presión en la parte de atrás del vehículo balancearían exactamente las de enfrente (no se produciría arrastre) Pero se produce arrastre como todos sabemos. El arrastre se debe en parte a la fricción del aire sobre la superficie del vehículo y en parte a las alteraciones del flujo en la parte de atrás del vehículo. Estas alteraciones se producen debido a la separación de la capa límite.

La capa límite en la parte frontal de un vehículo empieza en el punto de estancamiento. En esta para de la dirección del flujo se produce el llamado “gradiente de presión favorable”, es decir, debido a que la presión empuja el aire a lo largo de la capa límite impidiendo su crecimiento. Desafortunadamente, cuando el fluido se voltea nuevamente, la presión se incrementa nuevamente, desacelerando el flujo de la capa límite y haciéndola crecer (“gradiente de presión adverso”).

Existe un “Punto de Separación” donde el flujo cerca de la superficie es reversado debido a la presión (ver Figura 17)

. Figura 17. Punto de Separación



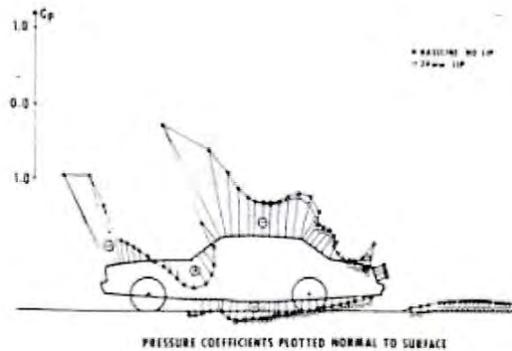
Fuente: CARRERA AKUTAIN Xabier; PASTOR Miguel. Aerodinámica [en línea]. Navarra: Tecnum, 2001. [consultado 16 de Mayo de 2006]. Disponible en [http://www.tecnum.es/asignaturas/transportes/trabajos_pdf_00_01/Aerodin%](http://www.tecnum.es/asignaturas/transportes/trabajos_pdf_00_01/Aerodin%c3%A1mica.pdf)

En este punto el flujo principal ya no está adherido al cuerpo y ahora es capaz de romperse e irse en línea casi recta. Debido a que trata de ingresar aire desde la región detrás del cuerpo, la presión en esta parte cae a menos de la ambiente. Se forman vórtices y el fluido es muy irregular en esta región.

La presión en la región de separación es menor que la de la parte frontal del vehículo, la diferencia de estas fuerzas totales de presión es la responsable de “Arrastre de Forma”. La fuerza de arrastre resultado de la acción de fricción viscosa en la capa límite de la superficie del carro es la llamada “Arrastre de Fricción”

6.1.1. Distribución de presiones sobre un vehículo. La distribución de presión estática es resultado del mecanismo básico explicado en el anterior punto. En la figura se ve la distribución de la presión estática para un sedan estándar.

Figura 18. Presión estática para un sedan estándar



Fuente: VEGA RENGIFO, Jorge Iván. Mecánica de Fluidos sobre un automóvil comercial [en línea]. Bogotá, D.C.: Revista Aerodinámica 2001.[consultado 16 de Mayo de 2006].Disponible en internet <http://triton.uniandes.edu.co/depmecanica/websides/apinilla/documentos/revista/Vega/vega.html>

Una presión negativa se desarrolla en la punta frontal del capo cuando el flujo que sube de la parte frontal intenta seguir la forma horizontal del capo. El gradiente de presión adverso en este punto tiene el potencial de atascar el flujo de capa límite creando arrastre en esta área.

Cerca de la base del parabrisas el flujo debe ser doblado hacia arriba por lo cual se experimenta una alta presión. Esta región de alta presión es el sitio para colocar entradas de aire. La baja velocidad de esta región hace adecuada la colocación de limpia brisas.

La presión se hace nuevamente negativa sobre el techo cuando el flujo intenta seguir el contorno de este. La presión sobre el vidrio trasero y sobre el baúl continúa baja debido a la curvatura continua. Es en esta región donde sucede con más frecuencias la separación. El diseño de los ángulos y los detalles del contorno del vehículo requiere una especial atención desde el punto de vista aerodinámico.

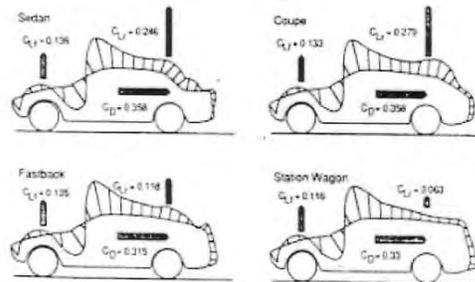
Debido a la baja presión en el techo, el flujo sobre los lados del carro intentará alimentar de aire esta región y dará pie a potencial separación. Este flujo, combinado con el del techo, formará vértices que se desprenden desde atrás del carro.

La escogencia de los ángulos del vidrio trasero y de la longitud del baúl tendrá impacto directo sobre el control del punto de separación y las fuerzas aerodinámicas. A menor área del punto de separación, menor el arrastre.

Teóricamente, la forma de la gota con una forma cónica afiliada en un Angulo de 15° o menor. Desde 1930 ya se recocida que, debido a que el área hacia la punta

del cono es muy pequeña, la punta de un vehículo ideal puede ser cortada sin una penalización muy grande del área de separación, permitiendo de esta forma mas espacio para las plazas traseras (ver fig. 10).

Figura 19. Sustentación Arrastre en Vehículos Comerciales.



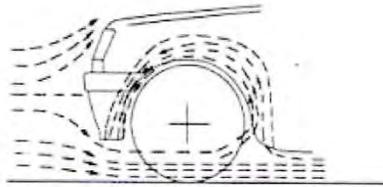
Fuente: VEGA RENGIFO, Jorge Iván. Mecánica de Fluidos sobre un automóvil comercial [en línea]. Bogotá, D.C.: Revista Aerodinámica 2001.[consultado 16 de Mayo de 2006].Disponible en internet <http://triton.uniandes.edu.co/depmecanica/websides/apinilla/documentos/revista/Vega/vega.html>

6.1.2 Componente de arrastre. El arrastre es la mayor y más importante fuerza aerodinámica encontrada en autos de pasajeros a velocidades normales de autopista. El arrastre total en los vehículos se deriva de varias fuentes. Existe un gran potencial de reducción de arrastre en esas áreas. Para un vehículo normal, aproximadamente un 65% del arrastre proviene de la carrocería.

- **Parte Trasera:** La mayor contribución de arrastre proviene de la parte trasera debido a la zona de separación. Aquí es donde existe el mayor potencial de reducción.
- **Parte delantera:** el arrastre delantero es influenciado por el diseño del frontal y del ángulo del para brisas. la localización de la altura de la punta frontal del vehículo establece el punto de estancamiento y la separación del flujo hacia arriba y abajo del auto.
- **Parabrisas:** ángulos bajos reducen el arrastre pero complican el diseño del vehículo pues inducen un mayor calentamiento del interior e incrementan la distorsión óptica.

- **Parte inferior:** las suspensiones, el exhosto y otros elementos protuberantes en la parte inferior de la carrocería son responsables de arrastre.
- **Protuberancia:** una segunda área de reducción de arrastre son las protuberancias de la carrocería. por ejemplo, las ruedas producen un flujo turbulento re circulante en las cavidades, aumentado el arrastre.

Figura 20. Recirculación del Aire en las ruedas.



Fuente: VEGA RENGIFO, Jorge Iván. Mecánica de Fluidos sobre un automóvil comercial [en línea]. Bogotá, D.C.: Revista Aerodinámica 2001.[consultado 16 de Mayo de 2006].Disponible en internet <http://triton.uniandes.edu.co/depmecanica/websides/apinilla/documentos/revista/Vega/vega.html>

- **Flujo interno:** El sistema de refrigeración, con el aire pasando a través del radiador, impactando el motor y frente de la cabina producen presión dinámica que actúa como arrastre en esa zona. Un diseño cuidadoso puede dirigir el flujo de tal forma que mantenga su velocidad.

6.2. FLUENT

Existen en la actualidad numerosos programas de análisis por elementos finitos, tales como: ALGOR, ABAQUS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, CAEPIPE, ANSYS etc.; de entre todos ellos hemos elegido FLUENT por tratarse de una herramienta de análisis por elementos finitos versátil y de fácil manejo proporcionando cierta capacidad de programación para ejecutar determinadas tareas. Esto hace que este paquete sea de fácil uso. En resumen, FLUENT® no es un programa especializado para resolver problemas específicos, sino que permite satisfacer variadas necesidades de diseño y análisis de mecánica de fluidos.

En nuestro caso FLUENT®, se utiliza para observar el comportamiento aerodinámico de el vehículo como de la turbina.

7. RESULTADO DE CÁLCULOS CONSTRUCCIÓN TURBINA

De acuerdo con la Tabla 2 se vio que para $\lambda > 1$ y número de palas menores a 8, encontramos que se obtienen potencias altas a bajos torques, en ingeniería debemos tener en cuenta ambos.

Para la construcción de la turbina, optaremos por $\lambda < 1$ para observar el comportamiento del torque. Además la razón de punta de pala dio velocidades rotacionales demasiado altas que pueden afectar la estructura de la turbina.

Teniendo en cuenta esto, de acuerdo con las ecuaciones descritas y una discretización del radio, que nos permitirá ver los valores locales y totales, programados en una hoja de cálculo de *Microsoft Office Excel*.

Resumiendo los valores para hallar la cuerda, fuerza, momento y potencia se calcularon los resultados para los perfiles 4412, 23013, 23015, SZ-1509, SZ-1510, SZ-1534, SZ-1548, SZ-1551, SZ-1561, SZ-1576 Y SZ-1597, para los $\lambda = 0.5$, $\lambda = 0.6$, $\lambda = 0.7$, $\lambda = 0.8$, $\lambda = 0.9$, $\lambda = 1.0$ a velocidades de 13.83 m/s o 49.8 kmh, 17.5 m/s o 63 kph, 22.5 m/s o 81 kph. Velocidades que se toman en carretera dentro de la ciudad o carreteras intermunicipales.

También se tiene en cuenta el número de palas que van desde 8, 16, 24, 32 y 40 palas para determinar el efecto de cada una de las incógnitas planteadas anteriormente.

Los perfiles escogidos fueron de la SZ-1500 ya que son perfiles con datos reales y estos a su vez son analizados a través de una estadística a través de un promedio ponderado, escogiendo de acuerdo a mejor potencia y torque respectivamente a cada velocidad de incidencia evaluándolos entre los valores de **$\lambda = 0.6$ y $\lambda = 1.0$**

Los mejores resultados teniendo en cuenta la observación anterior fueron los valores de potencia y torque para $\lambda = 0.8$ a diferentes velocidades de viento:
Valores de potencia y torque para $\lambda = 0.8$

Tabla 7. Resultados para cada perfil variando Velocidad y Número de palas

Perfil/vel. (m/s)	13.83	17.5	22.5	N. Palas
1509				
1510	x		x	24,32,40
1534	x	x	x	24,32,40
1548	x		x	40
1551	x	x	x	24,32,40
1561	x		x	24,32,40
1576				
1597	x		x	40

De acuerdo con esta **tabla 6** los mejores perfiles que trabajan a las diferentes velocidades son el SZ-1534 y el SZ-1551.

Analizando los perfiles podremos observar que el SZ-1534 obtenemos mejores resultados que su oponente quedando y la diferencia de potencia entre 32 y 40 palas no es significativa

Tabla 8. Resultados Perfil SZ-1534

		pot1	pot2	torque1	torque2	Vel. (m/s)
sz1534	24	77,601	80,121	1,590	1,641	80,121
		157,167	162,271	2,831	2,923	162,271
		333,904	344,748	4,679	4,831	344,748
	32	79,045	81,612	1,619	1,672	81,612
		160,091	165,290	2,884	2,977	165,290
		340,116	351,162	4,766	4,921	351,162
	40	79,917	82,513	1,637	1,690	82,513
		161,858	167,115	2,916	3,010	167,115
		343,871	355,039	4,819	4,975	355,039

Tabla 9. Resultados Perfil SZ-1551

		pot1	pot2	torque1	torque2	Vel. (m/s)
sz1551	24	69.924	80.480	1.433	1.649	13.83
		141.617	162.996	2.551	2.936	17.5
		300.869	346.289	4.216	4.853	22.5
	32	71.224	81.977	1.459	1.680	13.83
		144.252	166.029	2.598	2.991	17.5
		306.466	352.732	4.295	4.943	22.5
	40	72.011	82.882	1.475	1.698	13.83
		145.844	167.862	2.627	3.024	17.5
		309.849	356.626	4.342	4.998	22.5

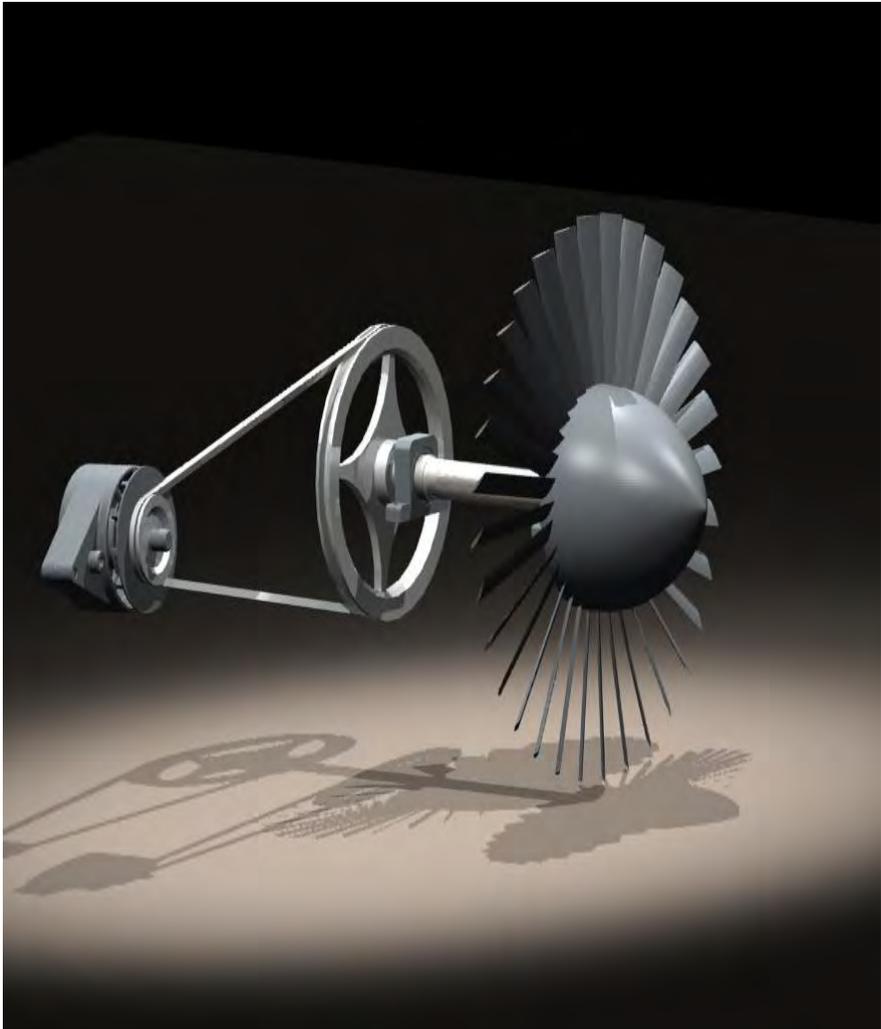
Los sufijos pot1 y Torque1 son perfiles con el $C_{l_{max}}$ y pot2 y Torque2 es $C_{l_{(Cd/Cl)_{max}}}$.
Quedando definido el diseño de turbina:

Tabla 10. Datos General Micro turbina

Datos del diseño		unidades
Cantidad De Palas	32	
Radio Del Rotor	250	mm
Densidad Del Aire	1.07	kg/m³
Viscosidad Del Aire	1.55E-05	m²/s
Perfil Aerodinámico Utilizado	SZ-1534	
Velocidad Auto.	17.5	m/s
Velocidad De Giro Rotor	55.52	rad/seg
Potencia Captada	239	watts
Potencia Disponible	160.42	watts
Coeficiente De Potencia	0.62	
Fuerza. Axial Por Pal	2.02	Newton
Fuerza Tangencial Por Pala	1.53	Newton
Ángulo De Paso	12	grados
Cuerda	30	mm
Longitud Palas	150	mm
Área Superficie Pala	9360.53	mm²
Volumen Pala	11330.3	mm³
Material Pala	Aluminio	
peso pala	31.72	gramos

La configuración de la Turbina se muestra en la figura 21.

Figura 21. Forma de Micro turbina



8. DISEÑO MECANICO

Teniendo ya el diseño de pala y considerando las fuerzas que resultan de ellas, se analizara la transmisión de potencia y el diseño del eje respectivamente. Para el diseño del eje se empleará métodos de resistencia de materiales, deflexión y vibración.

8.1. TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Teniendo en cuenta que el torque del generador es relativamente pequeño, se analizó los tipos de transmisión de potencia como engranajes, cadenas y correas; cada uno de ellos presento ventajas y desventajas pero al observar la relación costo beneficio se observo que la transmisión por correa era práctica y beneficiosa para el proyecto.

Para el análisis se toma como referencia la transmisiones por banda del catalogo de Martin.

Para seleccionar la transmisión se requiere:

- Los caballos de fuerza necesarios
- RPM de la unidad matriz
- RPM de la máquina impulsada
- La distancia de centros aproxima de la transmisión
- El promedio de horas al día de la transmisión

El tipo de banda escogido es tipo V ya que presenta mejores condiciones para nuestro caso.

Los diámetros de las poleas se calculan debido a la rpm de entrada que son de 530 y salida se estima para el generador de aproximadamente de 1750 del sistema teniendo en cuenta la formula $\omega_e r_e = \omega_s r_s$ y aplicando el radio de entrada en 80mm.

Aplicando las formulas del libro de Shigley :

$$L_p = 2C + 1.57(D + d) + \frac{(D + d)^2}{4C} \quad (8.1)$$

$$C = \frac{K + K^2 - 32(D + d)^2}{16} \quad (8.2)$$

$$K = 4L_p - 6.28(D + d) \quad (8.3)$$

$$H_r = \left[C_1 - \frac{C_2}{d} - C_3(rd)^2 - C_4 \log(rd) \right] (rd) + C_2 r \left(1 + \frac{1}{K_a} \right) \quad (8.4)$$

Utilizando las tablas 17-4, 17-5, 17-6 y 17-7 de Shigley obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 11. Especificaciones de transmisión de potencia

Especificación	Unidades
Diámetro Polea Conducida	265. mm
Diámetro Polea Conconductora	80 mm
Distancia entre ejes	400 mm
Volumen Polea Conducida	565067.40 milímetros³
Peso Polea Conducida	1582.19 gramos
material	Acero 1020
Potencia máx. transmitida	9. kilowatios
Torque Trasmitido	12.3 Nm
Frec. Criti. Torsional	23445.87 Nm/rad

FUERZA EN LA
POLEA

Dp	80
(mm)	
rpm	1760
fb	1.8

$K_t = 1.91E6 * HP / (D_p * N)$
 $K_r = K_t * f_b$

EN DONDE K_t = fuerza
tangencial

K_t	21.76	newton
-------	-------	--------

K_r = fuerza radial

K_r	39.17	newton
-------	-------	--------

HP = potencia en KW

W_p	16.67	newton
-------	-------	--------

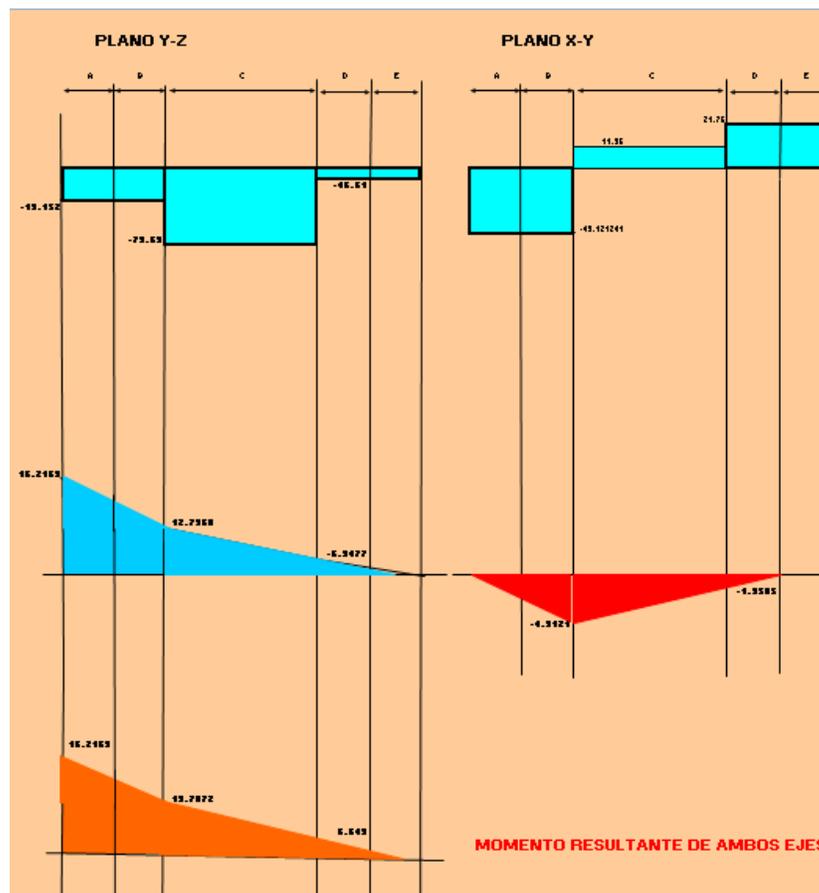
N en rpm

W_t	38.31	newton
-------	-------	--------

D_p = diámetro de la polea
menor

f_b = factor de correa

Figura 23. Diagrama de fuerzas y momentos



Aplicando la formulas para hallar el diámetro:

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S_e' \quad (8.5)$$

donde $C_{carga}=1$, $C_{superficie}$ =relativo al tamaño , $C_{temperatura}= 1$, debido que a que se trabaja a temperaturas ambiente, $C_{confiabilidad}=1$, $S_e'=0.5S_{ut}$ donde S_{ut} es la resistencia ultima del material.

El factor $K_f=1+q(K_t-1)$ factor de concentración de esfuerzos.

aplicándola a la forma general para hallar el diámetro nominal del eje:

$$D = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\left(k_f \frac{M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fsm} \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (8.6)$$

Aplicando las anteriores formulas a Microsoft Office Excel, en una macro obtenemos para cada sección:

Tabla 12. Diámetros de eje prueba.

	A		B		C		D		E	
	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER
Factor de seguridad	2.5	2.5	4	4	2.5	2.5	4	4	2.5	2.5
Sy - Esf. Fluencia	1.79E +08	1.79E +08	1.79 E+0 8	1.79 E+0 8	1790 0000 0	1790 0000 0	1790 0000 0	1.79 E+0 8	1.8 E+0 8	1.79 E+0 8
S`n - Resist fatiga	58482 936.	5848 2936.	5848 2937	5848 2937	5848 2937	5848 2937	5848 2937	5848 2937	5.8 E+0 7	5848 2937
Kf- Factor conc. Esf.	1.663	2.036	1.16 5	1.41 4	1.414	1.414	1.165	1.41 4	1.66	2.03 6
M - momento	16.21 6	16.21	16.2 1	16.2 1	13.70	13.70	6.643	16.2 1	16.2	16.2 1
T - Torque	12.28 03101 8	12.28 0310 2	12.2 8031	12.2 8031	12.28 031	12.28 031	6.643 003	6.64 3003	6.64 3	6.64 3003
Diámetro Mínimo(flex alt. Torsion Unif.) en metros	0.023	0.023	0.02 4	0.02 4	0.021	0.021	0.024	0.02 4	0.02	0.02 3

8.2.2. Diseño por deflexión. Aplicando la deflexión máxima obtenida en los extremos la deflexión esta representada por:

$$y = \frac{PL^3}{3EI} \quad (8.7)$$

donde P es la carga, L la longitud de análisis de eje , E modulo de elasticidad del material e I momento de inercia longitudinal.

donde la deflexión máxima fue $y_a=0.00030\text{mm}$ e $y_e=0.00034\text{mm}$ muy por debajo del límite máximo de 0.0127mm .

8.2.3. Diseño por vibración. Se tomaran las dos formas de velocidades críticas de flechas que son:

Vibración Método Rayleigh. Sobre estima la velocidad critica y su formula es:

$$\omega_n = \sqrt{g \frac{\sum_{i=1}^n W_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n W_i \delta_i^2}} \quad (8.8)$$

donde W son las cargas y δ son las deflexiones en los puntos de carga.

Vibración Método Dunkerley. Sub estima la velocidad critica y su formula es:

$$\frac{1}{\omega_{crit}^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} + \frac{1}{\omega_3^2} + \dots + \frac{1}{\omega_n^2} \quad (8.8)$$

La frecuencia torsional esta dada por:

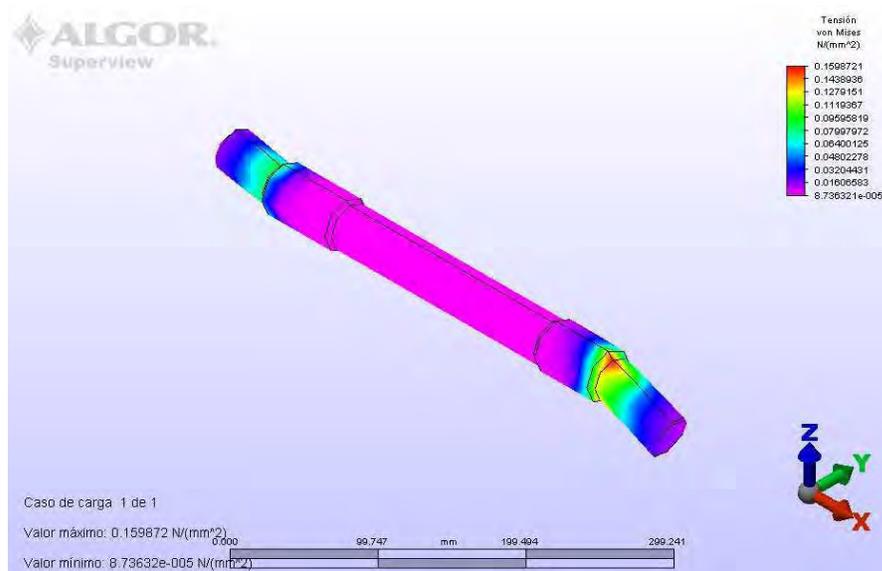
$$\omega = \sqrt{k_{teff} \frac{I_1 + I_2}{I_1 * I_2}} \quad (8.9)$$

Teniendo los anteriores datos y analizándolos en una macro de Microsoft Excel se obtiene la siguiente tabla resumida del eje:

Tabla 13. Parámetros de eje.

Especificación	Unidades
Diámetro del eje	33 mm
longitud eje	417 mm
peso del eje	3.43 kg
Volumen eje	434711.69 mm³
Deflex. Máx.	3e-7 ms.
Deflex. Torsional	0.003380 grados
Vel. Criti (Raileigh)	5559.91 rad/seg
Vel. Criti (Dunkerley)	3905.53 rad/seg
Frec. Criti. Torsional	23445.87 Nm/rad

Figura 24. Análisis de Tensión por Algor.



9. ANÁLISIS AERODINÁMICO DE VEHICULOS

Para analizar el comportamiento del aire (presión y velocidad) en un vehículo dispondremos como se ha dicho anteriormente del programa FLUENT®.

A través de un análisis estable con variable $k-\epsilon$, el programa nos pide una velocidad de entrada que estipularemos entre 13.83 m/s, 17.5 m/s y 22.5m/s.

Con el programa también se puede calcular los coeficientes de arrastre y sustentación (C_d y C_l , respectivamente), dando valores de referencia y luego analizar por fuerzas. Determinado así los coeficientes mencionados Se analizará tres propuestas: La primera será un vehículo tipo solar con características de tipo comercial en primera instancia.

Luego un camión de carga pesada (Tractomula) y por último un vehículo con forma muy aerodinámica.

En las siguientes figuras se mostraran los vehículos a analizar:

Figura 25. Automóvil Solar Comercial

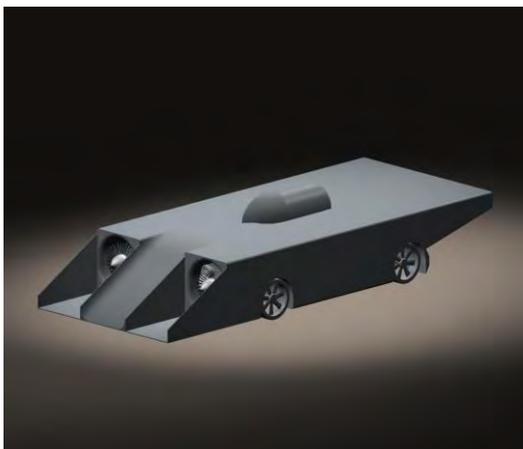
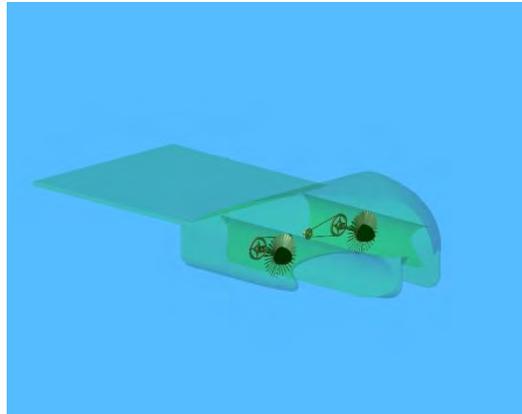


Figura 26. Tractomula Mack



Figura 27. Proyecto Eólico Solar Aerodinámico



Los resultados de las simulaciones de cada uno de los vehículos fueron:

Tabla 14. Resultados FLUENT® para Vehículo Solar Comercial

V(m/s)	Pressure forcé (N)	Total force	Coefficient	Cd
13.83	10.65	19.37	0.09024	0.164
17.50	10.65	19.37	0.09024	0.1024
22.50	10.65	19.37	0.09024	0.0619

Tabla 15. Resultados FLUENT® para Vehículo Tracto Camión

V(m/s)	Pressure forcé (N)	Total forcé	Pressure	Cd
13.83	497.5	535.39	0.8854	0.9563
17.50	497.5	535.39	0.5529	0.5969
22.50	497.5	535.39	0.334	0.3604

Tabla 16. Resultados FLUENT® para Vehículo Solar Aerodinámico

V(m/s)	Pressure forcé (N)	Total forcé (N)	Pressure Coefficient	Cd
13.83	30.77	31.0033	0.2739	0.275
17.50	30.77	31.0033	0.1711	0.172
22.50	30.77	31.0033	0.1035	0.104

9.1 RESULTADOS GRAFICOS POR MEDIO DE FLUENT®

El programa también saca resultados gráficos que muestran las presiones estáticas, dinámicas, contorno de velocidades como se mostrará en las siguientes figuras:

Figura 28. Presión Estática Veh. Solar Comercial

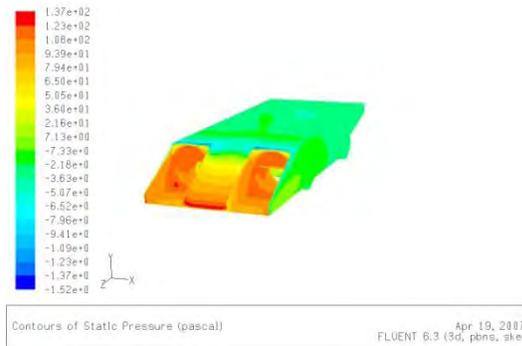
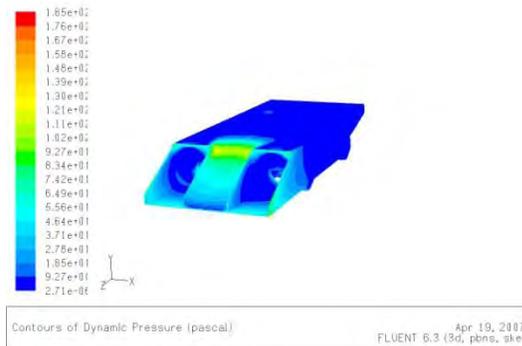


Figura 29. Presión Dinámica Veh. Solar. Comercial



Los gráficos las zonas rojas indican las zonas de concentración alta de presión mientras que las zonas que se acercan al azul. on de baja presión tanto para la presión estática como la dinámica.

Figura 30. Contorno de Velocidad Para Tractomula

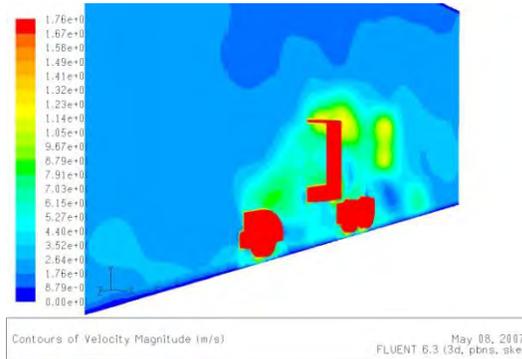
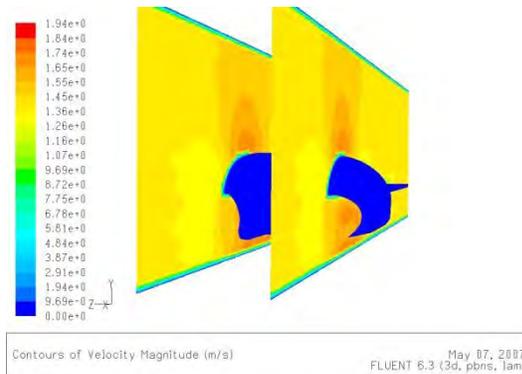


Figura 31. Contorno de Velocidad para Vehículo Solar Aerodinámico



En los gráficos de Velocidad también se aplica que las altas velocidades se acercan a la zona roja mientras que las bajas velocidades se acercan hacia la zona azul.

El Programa también ejecuta otras características de un fluido como la turbulencia.

. Figura 32. Contorno de Turbulencia para Vehículo Solar Comercial

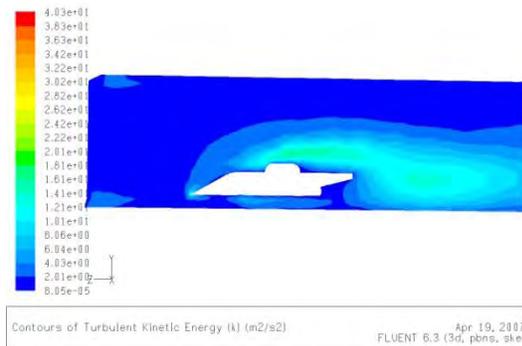
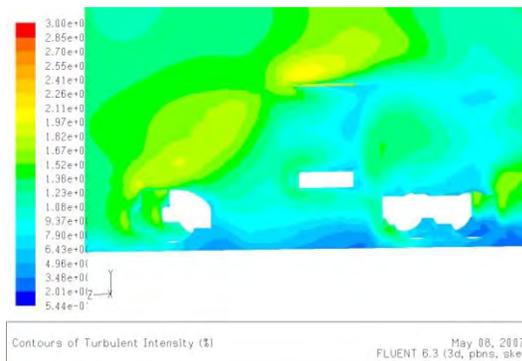


Figura 33. Contorno de Turbulencia para Vehículo Tractomula



Como puede verse en el caso de el vehículo solar comercial se nota claramente que en la zona donde están las turbinas no entra el aire a una velocidad aceptable, mientras que el tractomula es un poco mejor , en el vehículo solar aerodinámico es buena la velocidad de entrada en las turbinas.

Esto significa que para colocar las turbinas debe tenerse en cuenta la forma de colocar las turbinas en el vehículo para un mejor aprovechamiento de la velocidad.

10. RESULTADOS

Para determinar la potencia que necesita un automóvil para desplazarse utilizamos la siguiente formula:

$$P = mC_{rr1}V + NC_{rr2}V^2 + 0.5\rho C_d AV^3$$

(10.1)

En la cual:

C_{rr1} = Coeficiente de Perdida por rodadura. (m/s)

C_{rr2} = Coeficiente de perdidas en ruedas (kg/s)

ρ = Densidad del aire (1.07 kg/m³ en la ciudad de Cali)

N = número de Ruedas que tiene el vehículo.

A = Área frontal del vehículo.

- Coeficiente de perdidas de rodadura = C_{rr1} oscila entre (0.010-0.018) depende del estado de la vía.
- Coeficiente de pérdidas en ruedas. C_{rr2} .
Oscila entre 0.015-0.028
dependiendo de todo el sistema
de amortiguación y muelle.

Aplicando la Formula para la Perdida de Potencia debido al arrastre:

$$C_x * A * V^3 / 1225 \quad \text{(10.2)}$$

Donde C_x es el coeficiente de arrastre, A es el área frontal del vehículo y V es la velocidad del automóvil.

Son las formulas que podemos utilizar para la potencia para mover un automóvil y observar la potencia consumida por un automóvil.

Los resultados de acuerdo a estas formulas teniendo ya el área frontal y el coeficiente de drag en las tablas 14, 15 y 16 se tiene:

Tabla 17. Resultados de Potencia Automóvil Solar Comercial

	300	KG				
Vel.(m/s)	RAer. (n)	PAbs (w)	PMV(w)	P2G(w)	PCS (w)	PT(W)
13.83	17.92	281.10	266.89	158.09	1000	1158.1
17.5	17.92	355.60	540.54	320.2	1000	1320.2
22.5	17.90	456.86	1148.58	681.74	1000	1681.7

Tabla 18. Resultados de Potencia Automóvil Solar Aerodinámico.

	300.00	KG				
Vel.(m/s)	RAer. (n)	PAbs (w)	PMV(w)	P2G(w)	PCS (w)	PT(W)
13.83	25.57	400.98	266.99	158.09	1000	1158.1
17.5	25.53	506.76	540.67	320.2	1000	1320.2
22.5	25.56	652.11	1148.75	681.74	1000	1681.7

Tabla 19. Resultados de Potencia Tractomula

	7450.00	KG		
Vel.(m/s)	RAer. (n)	PAbs (w)	PMV(w)	P6G(w)
13.83	468.52	7348.21	1.64E+08	474.27
17.5	468.24	9292.59	3.33E+06	960.6
22.5	467.35	1.19E+04	7.08E+09	2045.2

En las tablas 17, 18 y 19 para PMV (potencia para mover vehículo) se utilizó la ecuación (10.1), en PAbs (Potencia absorbida aerodinámica) la ecuación (10.2), Raer. Es la resistencia aerodinámica

En las tablas 16 y 17 P2G es la potencia de dos generadores a la velocidad correspondiente y por último PCS es la potencia entregada por celdas solares , para los vehículos pequeños.

Ya analizando las tablas de la 16 a la 18 vemos que las potencias necesarias para movilizar el carro son demasiado grandes y la potencias que da la turbina a a las velocidades estimadas son demasiado bajas.

Para esto necesitaríamos otra fuente que proporcione la potencia requerida.

Para nuestro caso un vehículo solar liviano con área de captación solar de 5 metros cuadrados, que es un requisito mínimo para mover un vehículo solar¹², a condiciones normales da una potencia de 900 a 1500 vatios, si le sumamos la potencias de dos generados nos da de 1200 a 1600 vatios lo suficiente para mover un vehículo.

De acuerdo con estos resultados es posible que sea una fuente alterna para un vehículo solar.

Para un vehículo grande como la tractomula la potencia no alcanza ni siquiera para recuperar la potencia absorbida por la resistencia aerodinámica y la potencia a mucho llega 2 kilovatios, que servirían para almacenar y ser sistema auxiliar de potencia.

11. CONCLUSIONES

Para el diseño de pala se centro en tres procesos: Obtener la geometría óptima, para una turbina pequeña se adapte a un vehículo. En un inicio se deja con un diámetro de 50 centímetros para hacer el análisis de diseño.

Para el diseño de la turbina se utilizó el programa Microsoft Office Excel insertando las formulas propuestas por el libro de LeGurieres, más la teoría Turbillonaria que es un complemento que se tomo para rectificar resultados.

El segundo fue el que mayor satisfacción dejo ya que se obtuvo que el modelo, puede acomodarse en cualquier parte del vehículo con potencias pequeñas pero que en el proceso se tenía que observar muy bien donde instalar la turbina.

La micro turbina no desarrollo lo suficiente para utilizarla para algo útil, además la estética de estese vería muy afectado, así como la comodidad de pasajeros, factores muy importantes en el diseño de automóviles comerciales.

Se opto entonces por desarrollar un vehículo híbrido combinando energía solar y energía eólica que mostro anteriormente resultados interesantes.

El tercer enfoque fue el diseño de transmisión de potencia básico, desde el diseño de eje y poleas para desarrollar la potencia requerida.

El desarrollo aerodinámico debe tener en cuenta que el sitio donde poner la turbina debe ser un lugar donde circule el viento a muy buena velocidad.

El vehículo solar a nivel comercial no es viable por sus altos costos pero es un laboratorio de oportunidades e investigación de utilización de la energía solar y en nuestro caso en la energía eólica en el transporte.

12. RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo anterior, se debe tener en cuenta de que para el diseño de la micro turbina se desarrollo bajo teorías en la que se desarrollan los grandes generadores eólicos. Aunque puede ser aproximado, se recomienda una investigación sobre micro turbinas desarrolladas como por ejemplo el señor Michael Leung de la Universidad de Hong Kong, mostradas días después de sustentación de este trabajo.

También se sugiere una nueva forma de almacenar eficiente la energía, la puesta de las turbinas y mirar mejor el mecanismo de transmisión de potencia que depende en gran parte que su eficiencia sea mayor.

BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, John. Fundamentals of aerodynamics. 3 ed. New York: McGraw Hill, 2001. 892 p.

CARRERA AKUTAIN Xabier; PASTOR Miguel. Aerodinámica. [en línea]. Navarra: Tecnum, 2001. [Consultado 16 de Mayo de 2006]. Disponible en http://www.tecnum.es/asignaturas/transportes/trabajos_pdf_00_01/Aerodin%c3%A1mica.pdf

CÁDIZ DELEITO, Juan Carlos. La energía eólica: Tecnología e historia. Madrid: Hermman Blume, 1984. 215 p.

COLMENARES, Rodrigo. Diseño y construcción de un molino de viento para suministrar energía a una casa rural. Bogotá, D.C., 1977. 157 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingenierías.

FERNANDEZ DÍEZ, Pedro. Energía Eólica. Departamento de Energía Eléctrica y Energética. [en línea]. Barcelona: Grupo T-online France Telecom ESPAÑA INTERNET SERVICE PROVIDER S.A. 2002. [Consultado 16 de Mayo de 2006]. Disponible en internet: <http://www.personales.ya.com/universal/termoweb/EnergiasAlternativas/index.html>.

HUSAIN, Iqbal. Electric and hybrid Vehicles: design fundamentals. Boca Raton. Fl: CRC press LLC, 2003. 261p

LE GURIERS, Desire. Wind Power Plants, Theory and Design. Oxford: Pergamon Express, 1986. 277p.

MC BEATH, Simon. Aerodinámica del automóvil de competición. Barcelona: CEAC técnico. 1998. 247p.

MONTEMIRANDA, José Fernando. Generador Eólico. Santiago de Cali, 1991. 290 p. Trabajo de tesis (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de ingenierías.

NORTON, Robert. Diseño de Maquinas. México: Practice Hall, 1999. 988 p.

SHIGLEY, Joseph E. Diseño en Ingeniería Mecánica. 3 ed. México: McGraw Hill. 804 p.

VALERO FRIAS. Eduardo. Aportaciones de las máquinas Eléctricas de Flujo Axial mediante la aplicación de Elementos finitos. Tesis Doctoral. [en línea]. Tesis Doctoral en Xarxa. Catalunya. 2000. [Consultado 16 de Mayo de 2006]. Disponible en internet: http://www.tdx.cesca.es/tesis_upc/avaible/tdx-1214104-114808//12efv12de23

VEGA RENGIFO, Jorge Iván. Mecánica de Fluidos sobre un automóvil comercial [en línea]. Bogotá, D.C.: Revista Aerodinámica 2001. [Consultado 16 de Mayo de 2006]. Disponible en internet <http://triton.uniandes.edu.co/depmecanica/websides/apinilla/documentos/revista/Vega/vega.html>

WISSART Thomas. Análisis de estático-dinámico de un Formula 1. Barcelona. 2000., 200 p Tesis de Grado (Ingeniero Industrial) Universidad de Cantabria. Facultad de Ingenierías

ZAREA Stefan, IRUSQUIN Ignacio, LEAÑEZ Eduardo. Evaluación Experimental de ocho perfiles aerodinámicos Serie SZ-1500 para bajo números de Reynolds. En: Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. Vol. 17, No.2 (Mar.-Sep.2002); p. 39-58

ZUVICH, Ted. Vehicle Dynamics for racing games. [en línea]. San Francisco, CA: Resource Guides 2001-2002 Physics Resource Guides. 2002. [Consultado 16 de Mayo de 2006]. Disponible en internet: http://www.gamasutra/race_car.html.

ANEXOS

Anexo 1. Valores de λ , λ_e , k , h , C_p , y Cl_{bl}/r para valores entre 0 y 2

	λ	λ_e	k	h	C_p	Cl_{bl}/r	l (grados)
1	0.01	0.224	0.572	34.173	0.03	29.845	77.388
2	0.02	0.356	0.562	26.773	0.04	18.673	70.424
3	0.03	0.430	0.55	21.2	0.05	15.602	66.748
4	0.04	0.472	0.537	17.159	0.06	14.476	64.710
5	0.05	0.503	0.524	14.312	0.07	13.977	63.320
6	0.06	0.529	0.512	12.34	0.08	13.543	62.105
7	0.07	0.561	0.504	11.05	0.09	12.902	60.707
8	0.08	0.576	0.495	9.7668	0.1	12.768	60.052
9	0.09	0.575	0.492	8.527	0.119	12.910	60.115
10	0.1	0.670	0.473	8.866	0.116	11.154	56.186
11	0.12	0.654	0.473	7.024	0.143	11.519	56.822
12	0.14	0.693	0.463	6.241	0.159	10.937	55.285
13	0.15	0.704	0.461	5.850	0.168	10.793	54.873
14	0.16	0.720	0.457	5.559	0.176	10.550	54.238
15	0.18	0.751	0.451	5.051	0.191	10.135	53.103
16	0.2	0.768	0.451	4.574	0.207	9.815	52.465
17	0.21	0.788	0.447	4.430	0.213	9.570	51.764
18	0.24	0.835	0.436	3.998	0.233	9.069	50.126
19	0.25	0.850	0.434	3.877	0.239	8.890	49.625
20	0.27	0.877	0.43	3.644	0.251	8.591	48.757
21	0.28	0.888	0.428	3.527	0.258	8.479	48.408
22	0.3	0.873	0.432	3.168	0.279	8.600	48.873
23	0.32	0.937	0.422	3.164	0.281	7.959	46.851
24	0.35	0.974	0.417	2.942	0.297	7.607	45.768
25	0.36	0.985	0.416	2.876	0.302	7.496	45.420
26	0.4	0.984	0.416	2.483	0.336	7.510	45.465
27	0.42	1.055	0.408	2.537	0.332	6.887	43.475
28	0.45	1.088	0.405	2.398	0.346	6.614	42.579
29	0.48	1.121	0.402	2.276	0.359	6.360	41.723
30	0.49	1.111	0.403	2.181	0.369	6.444	41.981
31	0.5	1.100	0.403	2.086	0.381	6.542	42.279
32	0.54	1.186	0.397	2.068	0.384	5.900	40.131
33	0.56	1.207	0.395	2.008	0.391	5.758	39.633
34	0.6	1.219	0.393	1.830	0.416	5.698	39.365
35	0.63	1.273	0.39	1.808	0.420	5.354	38.156
36	0.64	1.291	0.389	1.801	0.421	5.247	37.766
37	0.7	1.343	0.384	1.655	0.444	4.975	36.675
38	0.72	1.372	0.384	1.637	0.448	4.807	36.083
39	0.75	1.402	0.382	1.583	0.457	4.657	35.494
40	0.8	1.470	0.377	1.530	0.467	4.352	34.229
41	0.81	1.476	0.377	1.509	0.471	4.323	34.125
42	0.84	1.491	0.377	1.444	0.483	4.250	33.847
43	0.9	1.600	0.371	1.437	0.485	3.820	32.009
44	0.96	1.664	0.371	1.376	0.498	3.571	31.007
45	1	1.732	0.366	1.366	0.500	3.367	30.000
46	1.05	1.795	0.367	1.337	0.506	3.156	29.124
47	1.08	1.838	0.366	1.324	0.509	3.035	28.553
48	1.1	1.866	0.362	1.311	0.512	2.979	28.181
49	1.2	2.002	0.359	1.267	0.522	2.647	26.545
50	1.26	2.095	0.359	1.260	0.524	2.436	25.517
51	1.3	2.140	0.356	1.232	0.531	2.362	25.048
52	1.35	2.221	0.356	1.232	0.531	2.204	24.235
53	1.4	2.280	0.353	1.203	0.538	2.118	23.686
54	1.44	2.348	0.354	1.207	0.537	2.002	23.071
55	1.5	2.419	0.351	1.179	0.544	1.906	22.457
56	1.6	2.561	0.349	1.159	0.549	1.723	21.331
57	1.62	2.593	0.349	1.159	0.549	1.684	21.090
58	1.7	2.701	0.348	1.142	0.553	1.562	20.314
59	1.8	2.846	0.346	1.128	0.557	1.423	19.361
60	1.9	2.988	0.345	1.115	0.560	1.300	18.505
61	2	3.132	0.344	1.105	0.563	1.191	17.705

Anexo 2. Características perfiles

perfil	Cl	Cd (Cl)	(Cl/Cd) Cl	i (Cl)	(Cl/Cd)	Cl	Cd	i ((Cl/Cd)	Cl	Cd	i ((Cl/Cd)	observacione
23013	1.7666	0.03583	50	16.7272	90.83	1.0000	0.010833	9.4545	0.20833	0	1.0909	sin
23015	1.7413	0.03534	47.41	17.0909	90.51	1.0170	0.011207	9.0909	0.14655	0	0.3636	Re=6*10^6
23015	1.5	0.02413	58.96	15.2727	90.51	1.0170	0.011207	9.0909	0.14655	0	0.3636	Re=2.6*10^6
4412	1.73	0.056	30	17.6363	86	0.9000	0.010000	5.0909	0.54	0	1.6363	
SZ-	1.0692	0.1877	5.696	16	17.3288	0.7500	0.043281	6	0.172	0	1.0153	Re=281360
SZ-	1.0696	0.1413	7.570	14	17.1671	0.7500	0.043688	6	0.185	0	1.02	Re=306758
SZ-	1.0283	0.0765	13.442	12	21.944	0.4666	0.021263	4	0.0182	0	1.20228	Re=281360
SZ-	1.0295	0.0809	12.726	12	21.2531	0.4666	0.021954	4	0.0254	0	1.28437	Re=306758
SZ-	1.1655	0.11	10.595	12	21.3949	0.6521	0.030479	4	0.0637	0	1.36647	Re=281360
SZ-	1.7323	0.115	15.063	12	19.3587	0.4402	0.022739	2	0.0378	0	1.44856	Re=306758
SZ-	1.0829	0.0904	11.979	10	18.9184	0.5333	0.028189	2	0.0120	0	1.53066	Re=281360
SZ-	1.048	0.0877	11.950	10	17.6127	0.7000	0.039744	4	0.0139	0	1.61275	Re=306758
SZ-	0.6569	0.0371	17.706	6	20.1072	0.3913	0.019461	3.2	0.0398	0	1.69485	Re=281360
SZ-	0.7687	0.0877	8.765	8	20.181	0.3913	0.019390	3.2	0.0657	0	1.77694	Re=306758
SZ-	1.3965	0.1152	12.122	16	18.3322	0.6	0.032729	8	0.0916	0	1.85903	Re=281360
SZ-	1.4018	0.1189	11.790	16	20.0885	0.75	0.037335	7.47	0.1175	0	1.94113	Re=306758
SZ-	1.2937	0.1124	11.510	12	17.9838	1.009	0.056106051	4	0.1434	0	2.02322	Re=281360
SZ-	1.2965	0.113	11.473	12	17.7819	1.015	0.057080514	4	0.1693	0	2.10532	Re=306758
SZ-	1.1746	0.0915	12.837	12	19.5477	0.5105	0.026115604	4	0.1952	0	2.18741	Re=281360
SZ-	1.1809	0.0916	12.892	12	21.1474	0.4987	0.023582095	4	0.2211	0	2.26951	Re=306758