



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Licenciatura en Diseño industrial

DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN AEROGENERADOR PARA USO DOMÉSTICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIATURA EN DISEÑO INDUSTRIAL

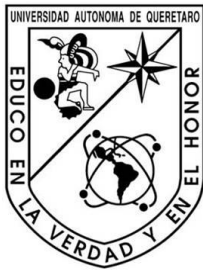
PRESENTA:

JORGE ANTONIO DÍAZ LÓPEZ

DIRIGIDA POR:

DR. MANUEL TOLEDANO AYALA

CENTRO UNIVERSITARIO, JUNIO 2013



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Licenciatura en Diseño Industrial

DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN

AEROGENERADOR PARA USO DOMÉSTICO

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Licenciado en Diseño Industrial

Presenta: Jorge Antonio Díaz López

Dirigido por:

Manuel Toledano Ayala

SINODALES

Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza

Presidente

Dr. Gonzalo Macías Bobadilla

Secretario

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa

Vocal

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

Director de la facultad

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Junio de 2013

México

Resumen

En el presente trabajo se diseñó y construyó un sistema de aerogenerador de eje vertical de tres palas, tipo Darrieus, para ser utilizado en zonas urbanas de México, a velocidades de viento aproximadas de entre 5 y 20 m/s., El mismo consta de la estructura conformada por las palas y el eje, un generador eléctrico modelo GL-MMG-1000, de la marca Ginglong y una batería de ciclo de carga profundo para el almacenamiento de la energía recolectada y su posterior uso.

Las herramientas utilizadas en el presente trabajo fueron: el software de diseño Rhinoceros 4 S.R. 9 y Unigraphics 7.5 para generar las superficies de las palas y la matriz del molde, Maxwell Render para las imágenes realistas generadas por computadora.

Se realizaron múltiples pruebas preliminares de aerogenerador tipo savonius contra Darrieus fabricados en lámina de poliestireno y fibra de vidrio respectivamente, para así comparar distintos parámetros de funcionamiento como velocidad de arranque, inercia, velocidad óptima, vibración, peso de cada pala y velocidad específica del aerogenerador, y las distintas variaciones estructurales.

Finalmente, con la configuración óptima se corrió una prueba de campo a una altura de 6.5 metros a nivel del piso, midiendo una velocidad del viento de 11.4 m/s promedio, en el municipio de El Marqués campus UAQ en Amazcala, Querétaro

Esta última prueba de campo se asemeja a construcciones urbanas y posibles puntos de instalación de un proyecto comercial.

Para la etapa de diseño se utilizaron distintos ejercicios creativos como lluvia de ideas, asociaciones lógicas y asociaciones forzadas, como resultado los bocetos con conceptos compatibles con el proyecto se llevaron hasta el modelo 3d.

Palabras clave: Darrieus, velocidad de arranque, TSR

ABSTRACT

It was designed and built a system of vertical axis wind turbine (VAWTs) of three blades, Darrieus type, to be used in urban areas of Mexico, among speed of wind approximately of 5 to 20 m/s., the wind turbine is formed by the blades, the axis, electric generator model GL-MMG-1000, of the Ginglong brand, and a deep cycle battery to store the collected energy and for subsequent use.

The main tools uses on the present work include: design software Rhinoceros 4 S.R. 9 and Unigraphics 4.5 to obtain the pale's surfaces and core of the mold, Maxwell for realistic renders.

Multiple preliminary tests were performed, Savonius versus Darrieus, made of polystyrene sheet and fiber glass respectively to test the parameters of operation like cut in speed, inertia, optimal speed, vibration, weight of each blade and tip speed ratio of the turbine, as well as different variations on the structure .

Finally, the optimal configuration ran a field test, at the height of 6.5 meters, the day 16 of June 2011, measuring an average wind speed of 11.4m/seg., on a schedule of 2:00 to 3:00 p.m., on the municipality of El Marquez, Campus Amazcala Querétaro.

This last field test is like urban construction and possible points of installation of a commercial project.

Design process step was directed by different creative exercise like brain storm, logic and forced associations, as a result the sketches with most compatible concepts with the project were conducted until 3D model.

Key words: Darrieus, cut-in speed, Tip Speed Ratio

A todos aquellos que han conmovido la razón de un hombre común como yo.

Eppur si muove!

Agradecimientos

Al Dr. Manuel Toledano Ayala, por el tiempo y trabajo consumido como director y colaborador en el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz por los apoyos y facilidades concedidas al proyecto.

Al fondo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (FIFI) 2010-2011.

A mis padres, hermanos, familiares y amigos por su amor y cariño.

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Lista de tablas.....	vi
Lista de figuras.....	vii
Capítulo I. Introducción.....	1
Panorama general de la energía eólica en México.....	2
Descripción del problema.....	11
Justificación.....	12
Objetivos e hipótesis.....	13
Capítulo II. Estado del arte y antecedentes.....	14
Fundamentación teórica.....	16
Fórmulas usadas.....	25
Capítulo III. Desarrollo.....	29
Herramientas metodológicas.....	29
Modelo matemático usado.....	54
Prototipo final.....	59
Capítulo IV. Pruebas y resultados	70
Análisis de resultados.....	72
Capítulo V. Conclusiones.....	74
Literatura citada.....	75
Apéndices.....	78

Lista de tablas

Tabla	página
1. Programa general de uso de aerogeneradores para la generación de energía.....	4
2. TSR ideal en función del número de palas según fórmula.....	20
3. TSR máximo en función del diseño aerodinámico.....	20
4. Características generales del primer prototipo puesto a prueba.....	36
5. Desempeño del primer prototipo puesto a prueba.....	37
6. Características generales del Segundo prototipo puesto a prueba.....	38
7. Desempeño del segundo prototipo puesto a prueba.....	40
8. Especificaciones mecánicas del generador eléctrico.....	43
9. Relación rugosidad y paisaje.....	56
10. Rugosidad e índice de energía.....	57
11. Descripción general de los distintos aerogeneradores	59
12. Propiedades comparativas de algunas fibras de refuerzo de plásticos.....	63
13. Desempeño del prototipo final puesto a prueba.....	72
14. Características generales del prototipo final.....	73

Lista de figuras

Figura	página
1. Capacidad total instalada de energía eólica en el mundo.....	2
2. Primeros 10 países con mayor tasa de crecimiento en energía eólica en 2009	2
3. Capacidad total instalada en Mega watts.....	3
4. Diagrama de GEI para México	7
5. Porcentajes de los sectores que emiten Gases de efecto invernadero.....	8
6. Oferta de energía primaria y generación de electricidad	10
7. Molino de viento fabricado de manera estandarizada.....	14
8. Principales partes de una turbina eólica.....	15
9. Aerogenerador de eje vertical.....	15
10. Error de un TSR bajo.....	18
11. Error de un TSR alto.....	19
12. Esquema del efecto Venturi.....	21
13. Esquema que muestra la distribución ideal de las corrientes de aire.....	22
14. Principales componentes en una instalación de producción independiente de energía a escala doméstica.....	24
15. Esquema con las principales partes del sistema de aerogenerador para uso doméstico.....	30
16. Captura de pantalla de programa rhinoceros 4 S.R. 8, mostrando el ensamble final.....	31

17. Primer prototipo puesto a prueba.....	36
18. Esquema de la vista superior del primer prototipo construido.....	38
19. Segundo prototipo puesto a prueba.....	39
20. Esquema de la vista superior del segundo prototipo construido.....	39
21. Curva de poder del generador eléctrico usado.....	41
22. Curva de voltaje del generador eléctrico usado.....	42
23. Curva de torque del generador eléctrico usado.....	42
24. Relación velocidad rotacional – torque.....	43
25. Resultado del análisis “curvature graph” sobre perfil tangente.....	44
26. Resultado del análisis “curvature graph” sobre perfil continuo.....	44
27. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado del análisis con herramienta “curvature graph” en diferentes posiciones.....	45
28. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado del análisis con herramienta “Curvature analisis”	46
29. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado del análisis con herramienta “draft angle”	47
30. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado de análisis con herramienta “map analisis” en diferentes pocisiones	48
31. Ubicación y medidas del empaque auxiliar en la absorción de la Vibración.....	49
32. Separación entre las palas y el aerogenerador.....	50
33. Ejemplo del efecto de torque a diferentes distancias del eje del aerogenerador.	51

34. Simulación del efecto Venturi (Rhinoceros 4 SR 8)	52
35. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado de análisis con herramienta “centroide”	52
36. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado de análisis con herramienta “zebra”	53
37. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando los puntos de la superficie parametrizada.....	60
38. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el ensamble de tres palas con la mejor configuración de los parámetros, arrojados por el plug-in Grasshopper	61
39. Comportamiento esfuerzo-deformación de varios tipos de fibras reforzantes.....	62
40. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el uso de la herramienta “contour”	64
41. Matriz de molde inicial, en espuma de poliuretano y pasta automotriz.....	65
42. Matriz de molde inicial, en espuma de poliuretano y pasta automotriz, recubierta con fibra de vidrio	65
43. Matriz de molde inicial, recubierta con talco industrial.....	66
44. Primera capa de molde, con borde reforzado y aplicación de poliéster isoftálico	67
45. Primera capa de molde con recubrimiento vista 1	68
46. Primera capa de molde, con puntos de desmoldeo vista 2.....	68
47. Parte superior del molde de la pala terminado.....	69
48. Molde completo de fibra de vidrio.....	69
49. Instalación de la estructura base para el aerogenerador.....	70

50. Instalación completa del aerogenerador, vista 1.....	71
51. Instalación completa del aerogenerador, vista 2.....	71
52. Instalación completa del aerogenerador, vista 3.....	72

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Al día de hoy , existen tecnologías que permiten el aprovechamiento de fuentes de energías renovables a escala doméstica, cada una de ellas tiene inherentes ventajas y desventajas, una de estas energías es la eólica, que consiste en captar parte del movimiento de una masa de aire y transformarlo en movimientos mecánicos deseados, a este sistema se le conoce como aerogeneradores. Para el estudio y desarrollo de un aerogenerador se deben contemplar diferentes factores, de los cuales destacan por su mayor importancia: el punto de instalación, almacenamiento de la energía captada y relación con el usuario final. Como consecuencia, es de suma importancia conocer el panorama a nivel mundial del sector energético, para luego particularizar el caso de México

Actualmente se estima que del total de la energía que se consume en todo el mundo, por lo menos tres cuartas partes de esta provienen de combustibles fósiles¹ (International Energy Agency, 2008) , lo que representa, que la mayor parte de los recursos se destinen a generar la infraestructura y el desarrollo necesario para estas tecnologías, esta postura adoptada por los gobiernos ha detonado una serie de fenómenos sociales y políticos insostenibles en los próximos años, por un lado tenemos la dependencia hacia los recursos no renovables y por el otro está la seguridad energética, definida como la capacidad de un país para satisfacer la demanda nacional de energía con suficiencia, oportunidad, sustentabilidad y precios adecuados, en el presente y hacia un futuro.

La generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles contribuye al cambio climático acelerado, este se mide en emisiones de gases de efecto invernadero, en el año 2009 el 85% de esta emisión correspondía al sector energético, y la demanda en este año fue 4 veces mayor a la del siglo XX (Global environment Fund, 2011).

México cuenta con un gran número de regulaciones y proyectos a corto y largo plazo para la protección ambiental y el uso de energías renovables, siendo uno de los miembros con más iniciativas dentro del World Resources Institute 2010 (World Resource Institute)

¹ Combustible fósil: término general para designar los depósitos geológicos de materiales orgánicos combustibles que se encuentran enterrados y que se formaron por la descomposición de plantas y animales que fueron posteriormente convertidos en petróleo crudo, carbón, gas natural o aceites pesados al estar sometidos al calor y presión de la corteza terrestre durante cientos de millones de años.

Panorama general de la energía eólica en México

Tomando en cuenta estos datos cabe destacar la importante difusión y desarrollo que está teniendo la energía proveniente de recursos renovables, como plan emergente para adoptarse dentro de los próximos 15 años (Figura 1).

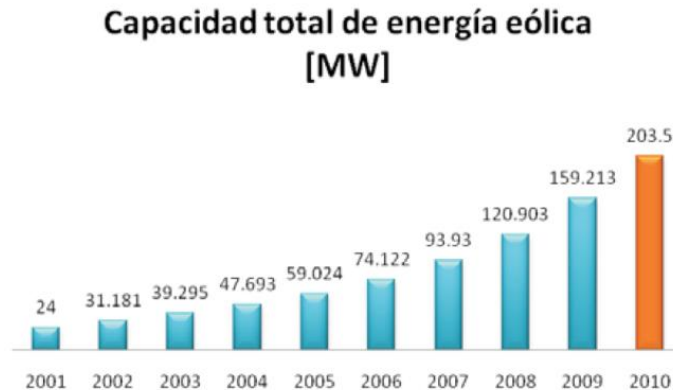
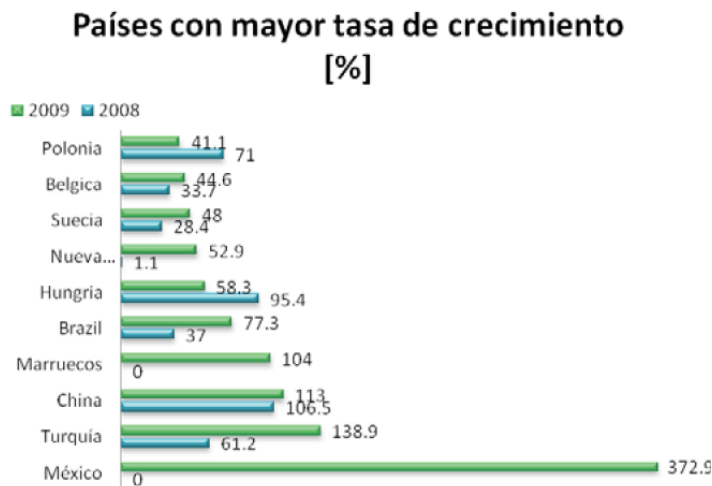


Figura 1. Capacidad total instalada de energía eólica en el mundo (World Wind Energy Association, 2010).

Por otro lado existe la problemática de que México, a pesar de haber tenido una tasa de crecimiento de 372.9%² (Figura 2) en el ciclo 2008 y 2009, y de constituir uno de los panoramas más prósperos y dinámicos para la implementación y obtención de energía renovable eólica, aún no posee ningún fabricante de aerogeneradores de carácter doméstico, por tal razón su adquisición queda limitada.



² El termino tasa de crecimiento anual se refiere a la relación de la capacidad actual instalada y la capacidad instalada del año anterior.

Figura 2. Primeros 10 países con mayor tasa de crecimiento en energía eólica en 2009 (World Wind Energy Association, 2010).

Un panorama Global tomando en cuenta los puntos más importantes: gases de efecto invernadero y cambio climático, insuficiencia en los próximos años de combustibles fósiles y la seguridad energética del país, nos permite tomar un enfoque previsor y empezar el diseño estructural, de interfaz y de sistema, perfectamente definido para las necesidades a nivel contextual, debido a que su implementación es paulatina, estamos en el momento ideal para el desarrollo de nuestra propia tecnología tomando en cuenta todo el precedente que existe en turbinas eólicas de gran escala (Figura 3).

Los aerogeneradores de uso domestico que se podrían adquirir en México tienen un costo estimado dependiendo del cambio de moneda de 150,000 MN más impuestos, (empresas consultadas: INNOVA y URBAN Green Energy, fecha de consulta: Junio del 2012), que incluyen equipo necesario para la instalación, pero no existe el soporte de mantenimiento ni ayuda técnica y no existe una empresa en México que solucione esta necesidad, por lo tanto toda la energía eólica que se genera en México es en parques eólicos, incluso se tienen previstas grandes instalaciones para el año 2014 que generarán más de tres veces la energía que se genera en la venta II en el estado de Oaxaca. (Tabla 1).

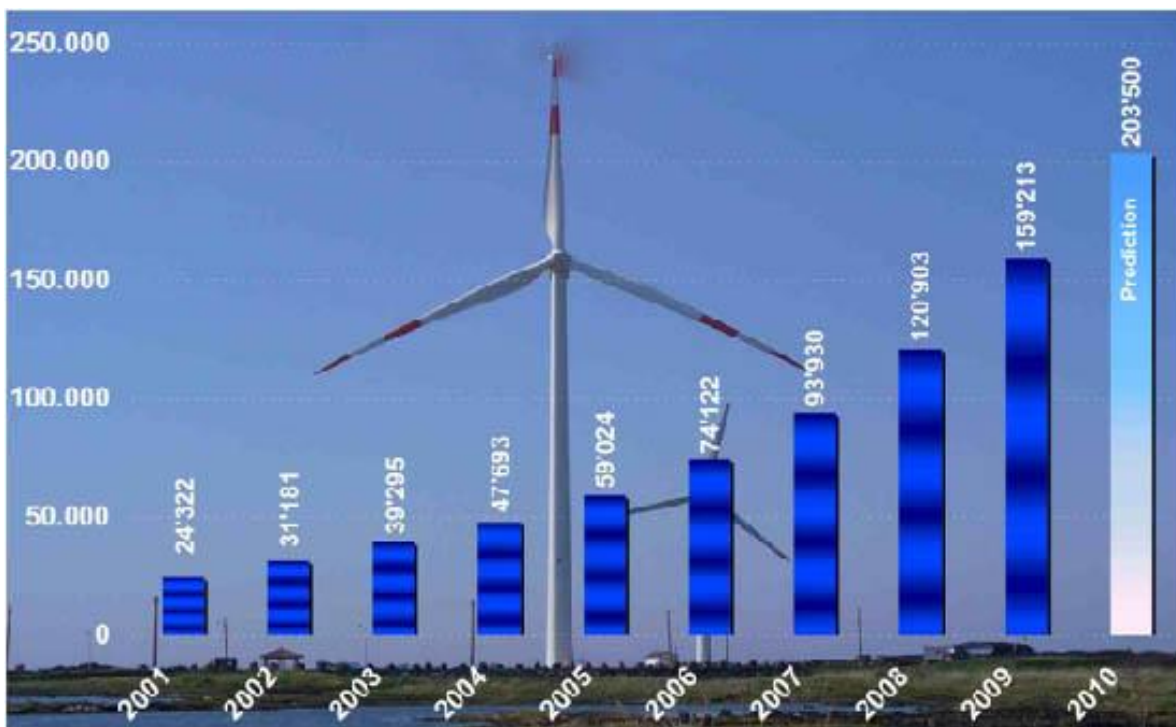


Figura 3. Capacidad Total Instalada en Mega watts

(World Wind Energy Association, 2010).

Tabla 1. Programa general de uso de aerogeneradores para la generación de energía, (Asociación Mexicana de Energía Eólica, 2010).

Proyectos en operación						
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW
La Venta	Oaxaca	OPF	CFE	Vestas	1994	1.6
La Venta II	Oaxaca	OPF	CFE	Gamesa	2006	83.3
Parques Ecológicos de México	Oaxaca	Autogeneración	Iberdrola	Gamesa	2009	79.9
Eurus 1ra Fase	Oaxaca	Autogeneración	Cemex, Acciona	Acciona	2009	37.5
						202.28

Proyectos en Desarrollo						
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW
Oaxaca II, III y IV	Oaxaca	PEE	CFE	Por definir	2011	304.2
Vientos del Istmo	Oaxaca	Autogeneración	Preneal	Por definir	2011 - 2012	395.9
Bii Hioxio	Oaxaca	Autogeneración	Unión Fenosa	Por definir	2010 - 2011	227.5
Bii Sitinú	Oaxaca	Autogeneración	Eoliatec del Istmos (Eolia)	Por definir	2010 - 2014	164

Santo Domingo	Oaxaca	Autogeneración	Eoliatec del Pacífico (Eolia)	Por definir	2010 - 2014	160
Bii Nee Stipa	Oaxaca	Autogeneración	CISA – Gamesa	Gamesa	2010 - 2014	288
Desarrollo Eólicos Mexicanos	Oaxaca	Autogeneración	Renovalia	Por definir	2010 - 2014	227.5
Unión Fenosa	Baja California	Exportación	Gas Natural / Unión Fenosa	Por definir	2011 - 2014	400
Sempre	Baja California	Exportación	Sempre	Por definir	2011 - 2014	300
Fuerza Eólica	Baja California	Exportación	Fuerza Eólica	Por definir	2011 - 2014	400
						2,867.1

Proyectos en construcción						
Proyecto	Ubicación	Esquema	Desarrollador	Turbinas	FOC	MW
Bii Nee Stipa I	Oaxaca	Autogeneración	CISA – Gamesa	Gamesa	2010	26.35
Gobierno Baja California	Baja California	OPF	GBC / Turbo Power Services	Gamesa	2010	10
La Venta	Oaxaca	PEE	CFE /	Gamesa	2010	101

III			Iberdrola			
Oaxaca I	Oaxaca	PEE	CFE / EYRA	Vestas	2010	101
La Mata – La Ventosa	Oaxaca	Autogeneración	Electricidad del Valle de México (EDF -En)	Clipper	2010	67.5
Eurus 2da Fase	Oaxaca	Autogeneración	Cemex / Acciona	Acciona	2010	212.5
Fuerza Eólica del Istmo	Oaxaca	Autogeneración	Fuerza Eólica	Clipper	2001 - 2011	50
						568.35

OPF: Obra Pública Financiada

FOC: Fecha de Operación Comercial

PEE: Producto Externo de Energía

Existe discrepancia en la magnitud global y local del impacto de los gases de efecto invernadero, pero la relación entre los GEI's y el cambio climático es ampliamente reconocida, (Institute for the study of society and environment, 2008), dentro de los principales GEI's emitidos a la atmósfera se encuentran el dióxido de carbono, metano, dióxido nitroso, y los gases de refrigeración de origen sintético como los clorofluorocarbonos.

El conocimiento de la magnitud de las emisiones de GEI's se realiza mediante la elaboración de inventarios, los medios para reducirlas y/o las adaptaciones para enfrentar el calentamiento global de la tierra, juegan un papel preponderante para mejorar nuestro entendimiento, las implicaciones sociales, económicas y políticas de este efecto. A nivel mundial, ya se tomaron medidas para evitar en lo posible modificaciones al cambio climático, un ejemplo es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático CMNUCC (Naciones Unidas) firmada por 154 países, incluido México desde 1998.

Otro ejemplo es la Cumbre del Río, que implica un compromiso, principalmente por parte de las naciones industrializadas, para disminuir las emisiones de dióxido de carbono a los niveles de 1990 (Naciones Unidas, 1992)

A nivel local, en México en el año 2005, las emisiones de dióxido de carbono tan solo en el sector energético - residencial fueron de 18,866.27 giga toneladas (1gTon = 1000 toneladas) (figura 4), además se estimaron porcentajes de distintos sectores siendo el más grande el de la generación de energía y transporte (Figura 5).

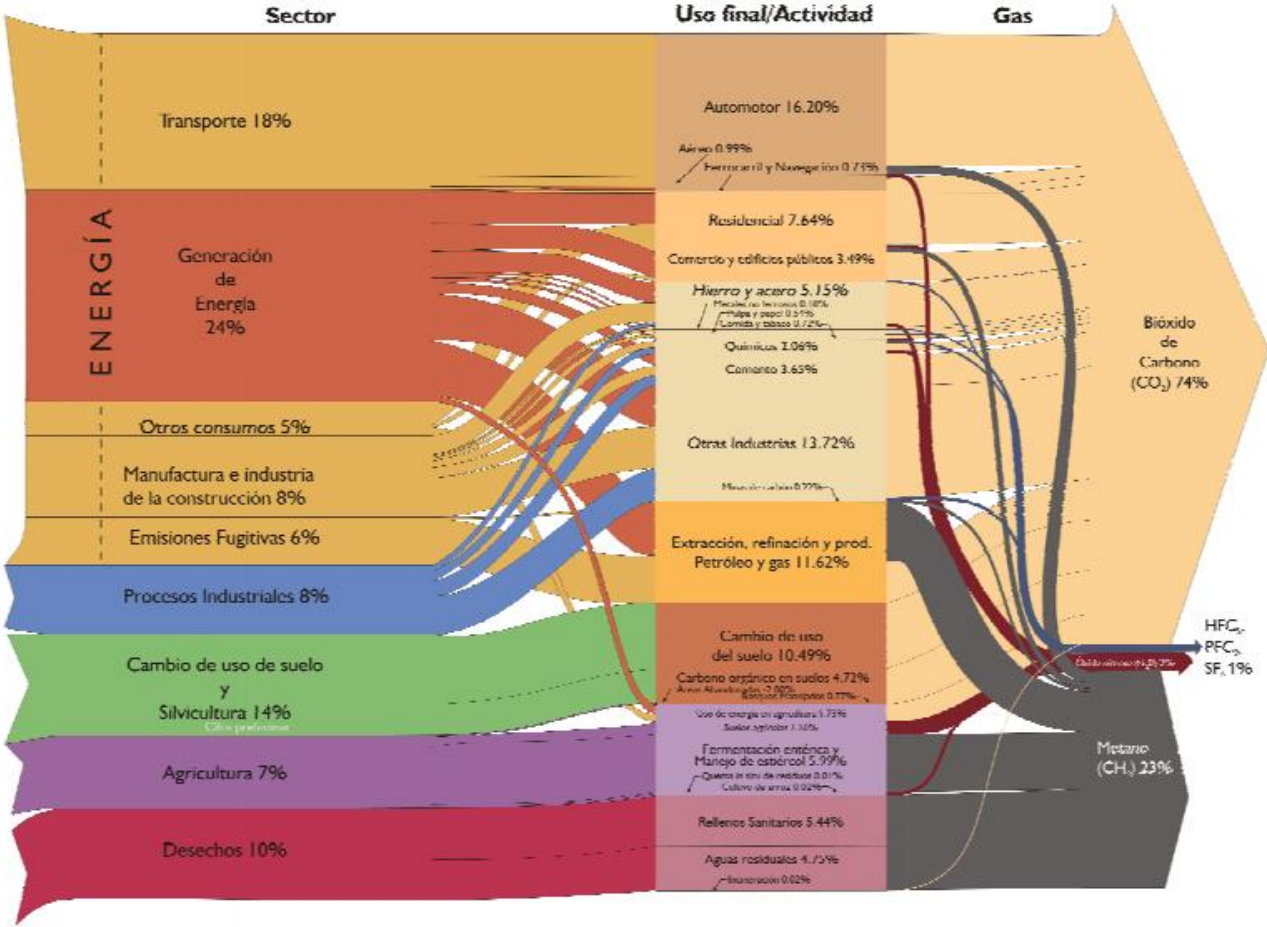


Figura 4. Diagrama de GEI para México (Instituto Nacional de Ecología, 2005).

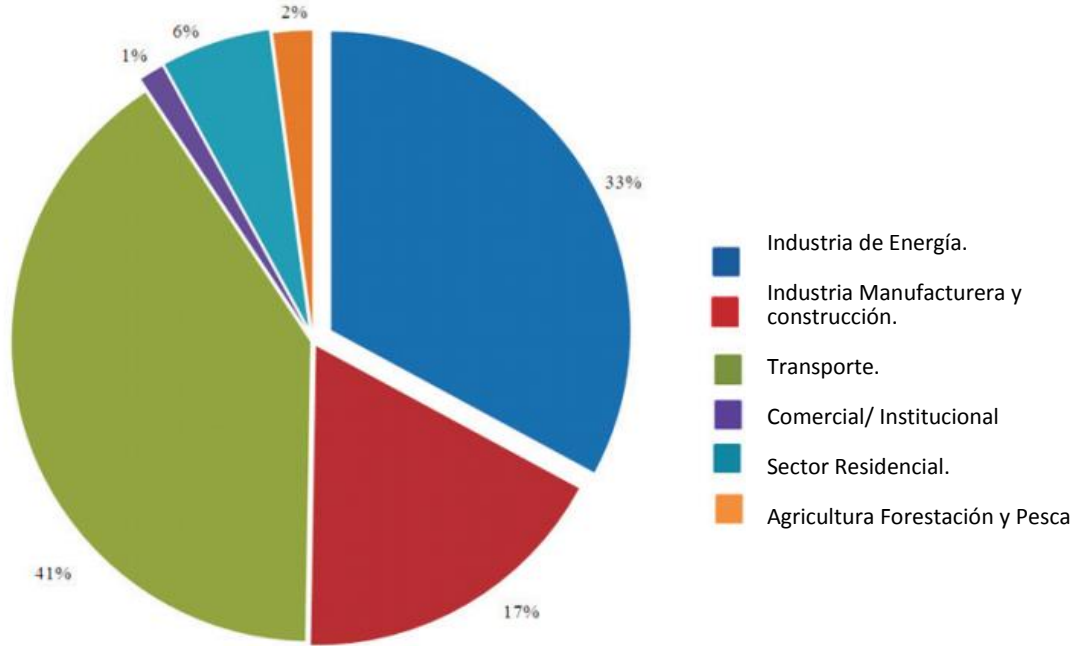


Figura 5. Porcentajes de los sectores que emiten gases de efecto invernadero (Instituto Nacional de Ecología, 2005).

Legislación

A continuación se cita la información más relevante en cuanto a legislación y otros aspectos de marco legal relacionados con el aprovechamiento de energías renovables en México.

Tecnología: en 1997 la turbina promedio era de 600 a 750 kW. Para el 2005 ya existen en el mercado a nivel comercial turbinas con capacidades entre 2 y 3 MW, así como prototipos de hasta 6 MW. El diámetro llegaba a 80 metros en 2000, hoy llega a los 120 metros.

Estado actual: en el 2004 se tenían instalados 3 MW; 2 MW en la zona sur-sureste y 1 MW en la zona noreste, con los que se generaron 6 GWh de electricidad. En el ciclo 2004–2005.

Potencial: los estudios del National Renewable Energy Laboratory NREL (National Renewable Energy Laboratory, 2011), y diversas instituciones mexicanas como la Asociación Nacional de Energía Solar, la Asociación Mexicana de Energía Eólica y el Instituto de investigaciones Eléctricas han cuantificado un potencial superior a los 40,000 MW, siendo las regiones con mayor potencial, el Istmo de Tehuantepec y las penínsulas de Yucatán y Baja California.

Las condiciones eólicas en el Istmo de Tehuantepec son de las mejores a nivel mundial. En Oaxaca hay zonas con velocidades del viento medidas a 50m de altura superiores a 8.5 m/s, con un potencial de 6,250 MW, y otras con velocidades entre 7.7 y 8.5 m/s, con un potencial de 8,800 MW.

En Baja California, las mejores zonas están en las sierras de La Rumorosa y San Pedro Mártir (274 MW). Yucatán (352 MW) y la Riviera Maya (157 MW) tienen suficiente potencial para sustituir plantas que operan con combustóleo, diesel y generadoras de turbogas.

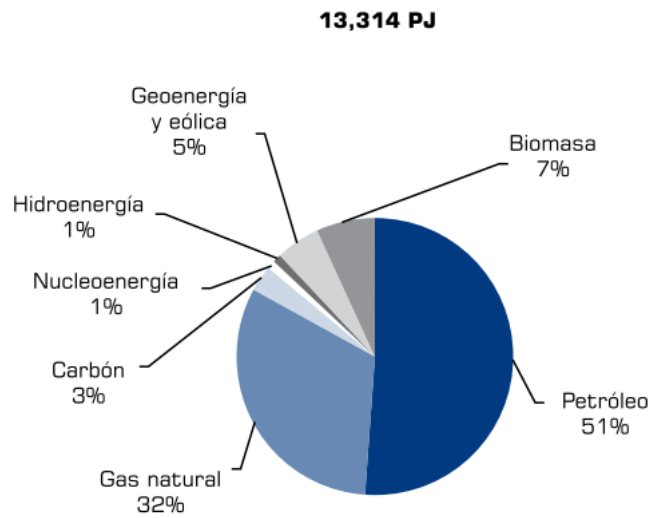
Costos: de acuerdo con CFE, los montos de la inversión para estos sistemas son de 1,400 USD/kW, con un costo de generación de 4.34 centavos de dólar por kWh (¢USD/kWh) 9 y se estima que para el 2020 sean menores a los 3¢ de USD por kWh 10.

Existen diferentes tipos de barreras para el desarrollo de energías renovables en México, las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

Barreras institucionales: la planeación energética del país está basada en metodologías que evalúan sólo el costo económico de corto plazo de la generación de energía.

La falta de valoración de los beneficios que las energías renovables aportan a la economía nacional, tales como la estabilidad de precios de la energía en largo plazo, y la reducción de riesgos en el abasto energético, aunado al hecho de contar con importantes recursos energéticos fósiles nacionales, hace que las políticas y prospectivas energéticas nacionales sigan basándose en combustibles convencionales.

Legales y Regulatorias: existen normas que delimitan la participación privada en el sector energético. Para el caso específico de la generación de energía eléctrica, La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) solamente permite la generación a particulares, a través de permisos, para casos específicos.



Generación

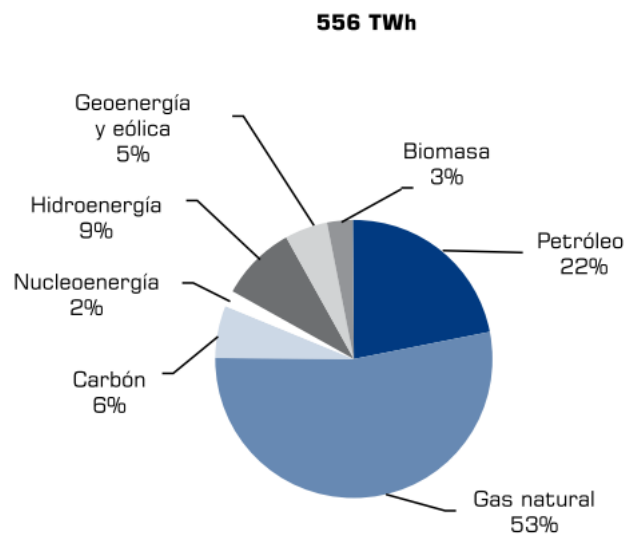


Figura 6. Oferta de energía primaria y generación de electricidad (Comisión Reguladora de Energía, 2011).

Descripción del problema

De acuerdo al contexto descrito, se puede observar que a nivel nacional, no se cuenta con una infraestructura por parte de las instituciones encargadas, para implementar energías renovables o fuera de su sistema, pero al mismo tiempo existen informes que demuestran que México no posee seguridad energética, y que si sigue con planes de energía basados en combustibles fósiles, el panorama puede empeorar, razón por la cual se apuesta por las energías renovables, y proyectos de investigación por parte de instituciones y universidades, el enfoque de esta tesis esta en conseguir cierto grado de independencia energética de la comisión federal de electricidad de manera micro, es decir que cada familia o individuo pueda implementar este sistema, tener un financiamiento los primeros años y después recuperar su inversión a lo largo de un periodo aproximado de seis años.

Se considera que el problema es infranqueable solamente desde la creación de parque eólicos a gran escala, con inversiones por encima de los 100 millones de dólares. El consumo energético por hogar ha crecido los últimos años pero no se ha elevado los índices de calidad de vida proporcionalmente, lo que significa que el enfoque desde el punto de vista de obtener energía renovable de manera doméstica tiene también tintes sociales, y puede ser visto como un detonador para la conciencia de futuras generaciones, teniendo el respaldo de contar con un productor de esta tecnología a nivel nacional.

Para volver el uso de aerogeneradores una alternativa viable para su uso en zonas urbanas, se necesita redefinir los parámetros de diseño, principalmente la velocidad de arranque y energía captada por el giro a partir de la energía cinética existente en el aire.

Se debe analizar profundamente los recursos eólicos en México, hacer una correcta interpretación de estos datos, y encontrar áreas de investigación y desarrollo, un claro ejemplo de esto es por ejemplo que en México las zonas con mayor recurso eólico, son también zonas de riesgo de huracanes y de otros fenómenos climáticos (Herrera - Sánchez, Wolfgang, & González - Fernandes, 2010), así como también son zonas de migración masiva de aves y tránsito de murciélagos, en las que se calcula que anualmente 12 millones de aves de 130 distintas especies sobrevuelan la zona del sur del istmo como parte de su recorrido, que empieza cada año en Canadá y termina en Chile (Magella Guillemette, 1998).

Las razones antes mencionadas hacen difícil o imposible la instalación de un parque eólico a gran escala, mas no así de instalación de aerogeneradores en micro zonas urbanas.

Actualmente existen fabricantes de generadores eléctricos, modelos genéricos que permiten operar con un torque³ muy bajo, aunado a diseños inteligentes de palas, existen aerogeneradores que arrancan a velocidades que hace algunos años se consideraban no aprovechables. (3.6 m/s).

Uno de las componentes de un aerogenerador sobre el cual se debe tener mayor cuidado es sobre las palas, ya que se plantea una vida útil entre el rango de 15 a 20 años, en comparación con las piezas electro-mecánicas, y es donde coinciden parámetros como, el límite de vibraciones, nivel de ruido, variaciones de momento de torsión, velocidades nominales y máximas de viento y temperatura.

La obtención de energía a partir del viento, representa a nivel contextual varios avances, por ejemplo:

A nivel antropológico, representa una sociedad avanzada, consciente y responsable del medio ambiente, permite tener diferentes alternativas energéticas y tomar una postura preventiva.

A nivel político, representa un marco legislativo y una infraestructura adelantada, con tomas de decisiones provisionarias y avanzadas.

En este punto es donde México flaquea, por un lado existe la paraestatal CFE, que regula el uso y venta de celdas solares, o no plantea la instalación de una red inteligente, limitando en ocasiones de manera arbitraria a su uso exclusivo en zonas rurales.

Justificación

Considerando:

En el año 2010 solo se contabilizó la obtención de 20 terawatts de energía eólica, mientras que se calcula que existen 190 terawatts disponibles a nivel mundial (world Energy Association, 2011), además también se estima que emite solo 6.7 litros de dióxido de carbono por cada kilowatt-hora, al mismo tiempo que no es necesaria el agua para dicha obtención.

³ Torque o momento de torsión, se refiere a la componente paralela al eje longitudinal del momento de fuerza; resultante de una distribución de tensiones sobre una la sección transversal de prisma mecánico.

El consumo energético cada vez mayor por persona, y el uso de combustibles fósiles para responder a este déficit, ha traído como consecuencias el calentamiento global.

debido a que el uso de energía en zonas urbanas a nivel nacional es un área nueva de conocimiento y la parte estructural de las palas es una invención patentable, se considera justificada la elaboración del presente trabajo

Citados todos estos ejemplos se comprende la importancia de adoptar políticas, y sistemas que ayuden a reducir nuestro consumo de energía, así como obtenerla de manera limpia y eficiente.

Objetivos e Hipótesis

Objetivo

Diseñar y construir un aerogenerador de tipo Darrieus de manufactura nacional enfocado a la microgeneración de energía eléctrica de uso doméstico

Hipótesis

Sometido a condiciones de campo similares un aerogenerador Darrieus puede reaccionar mejor ante las turbulencias del viento en comparación a un Savonius y con una eficiencia notablemente mayor.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

Como se mencionó antes, existen muchas patentes que resuelven perfectamente los parámetros de funcionamiento que un aerogenerador debe cumplir, pero que no han sido adaptadas, por ejemplo, en los años setenta se diseñó un molino de viento, de aproximadamente tres metros de diámetro utilizado para bombeo, un modelo de fabricación e instalación genérica, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento (Figura 7).



Figura 7. Molino de viento fabricado de manera estandarizada.

Al comparar estos diseños se llega a la conclusión de que la respuesta es compleja ya que cae dentro de dos ámbitos, el primero de ellos el ámbito antropológico, y el segundo el industrial, se deben tener en cuenta muchos factores perceptuales y contextuales, el marco legal, así como el ámbito industrial, generar piezas de fácil manufactura y mantenimiento así como un diseño enfocado en la estandarización, por lo tanto es muy difícil adaptar un aerogenerador que ha sido diseñado para otro contexto, ya que ni siquiera toma en cuenta al usuario, usos y costumbres, ni los parámetros climáticos.

La energía eólica ha tenido un desarrollo exponencial en los últimos años, sobre todo en el área de diseño y manufactura, ya que proporciona energía limpia y

renovable, los principios de su funcionamiento se remontan a molinos para moler granos o extraer agua, sus piezas esenciales siguen siendo las mismas. (Figura 8)

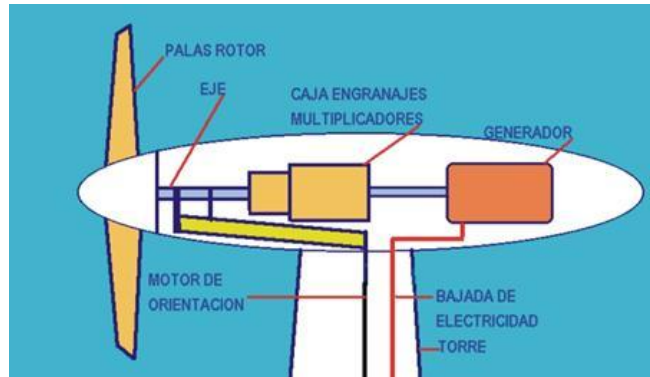


Figura 8. Principales partes de una turbina eólica.

Su evolución ha dado como resultado piezas con muy alto grado de eficiencia y de potencia, esta última se consigue aumentando la longitud de las palas, lo que implica un desafío de diseño, ya que se debe conservar su aerodinamismo y tener una torre cada vez más alta, paralelo a esta configuración existen aerogeneradores conocidos como de eje vertical (Figura 9), esto debido al ángulo del eje del rotor con la superficie de instalación.



Figura 9. Aerogenerador de eje vertical.

Aunque su instalación es más sencilla, aún siguen teniendo los mismos problemas: velocidades de viento lentas no los hacen funcionar, ya que tienen un momento de torsión muy reducido, y velocidades muy altas pueden llegar a destruirlos, los costos de mantenimiento, la fabricación e instalación siguen siendo complejos, generan impacto visual y frecuencias sonoras problemáticas para habitantes cercanos al lugar de instalación.

Fundamentación Teórica

En el siguiente capítulo se describen los conceptos físicos y mecánicos básicos así como la explicación de principios en el funcionamiento del aerogenerador diseñado en este proyecto.

Velocidad específica o más ampliamente usado en textos científicos, incluso en español, como Tip Speed Ratio, λ , lambda.

El tip speed ratio es un concepto clave en el diseño de la pala, es la razón entre la velocidad angular (radian/segundo) de la pala y la velocidad del viento que provoca ese movimiento (metro/segundo), por lo tanto es un factor y no posee unidad.

$$\frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V} = \lambda = \text{Tip Speed Ratio}$$

V = velocidad del viento en m/seg

$v = \omega r$ = velocidad límite del rotor en m/seg

r = radio del rotor en metros

$\omega = 2\pi f$ velocidad angular en radian/segundo

Considerando estos factores se podría calcular entonces el TSR óptimo de la siguiente manera:

$$Tsr \text{ Max} = 4 \pi / n$$

Donde n es el numero de palas.

La relación directa del TSR con el aerogenerador queda demostrada en dos casos extremos.

El primero de ellos, cuando la velocidad del rotor es lo suficientemente baja, la corriente de viento atravesará el aerogenerador sin producir alguna reacción, al no tener resistencia relativa en las zonas vacías de entre las palas, véase figura 10.

En el caso contrario si la velocidad del rotor es muy rápida, al viento actuará como si chocase en una superficie sólida, véase figura 11

De estos dos casos se puede deducir lo siguiente:

Cuando una pala del aerogenerador gira sobre el rotor, independientemente de la forma, deja turbulencia a su paso, si la siguiente pala llega a este punto y sigue existiendo turbulencia, no será posible que ésta pueda extraer energía del viento de manera eficiente, lo que se pretende entonces es que el viento que tenga contacto con cada pala no tenga turbulencia.

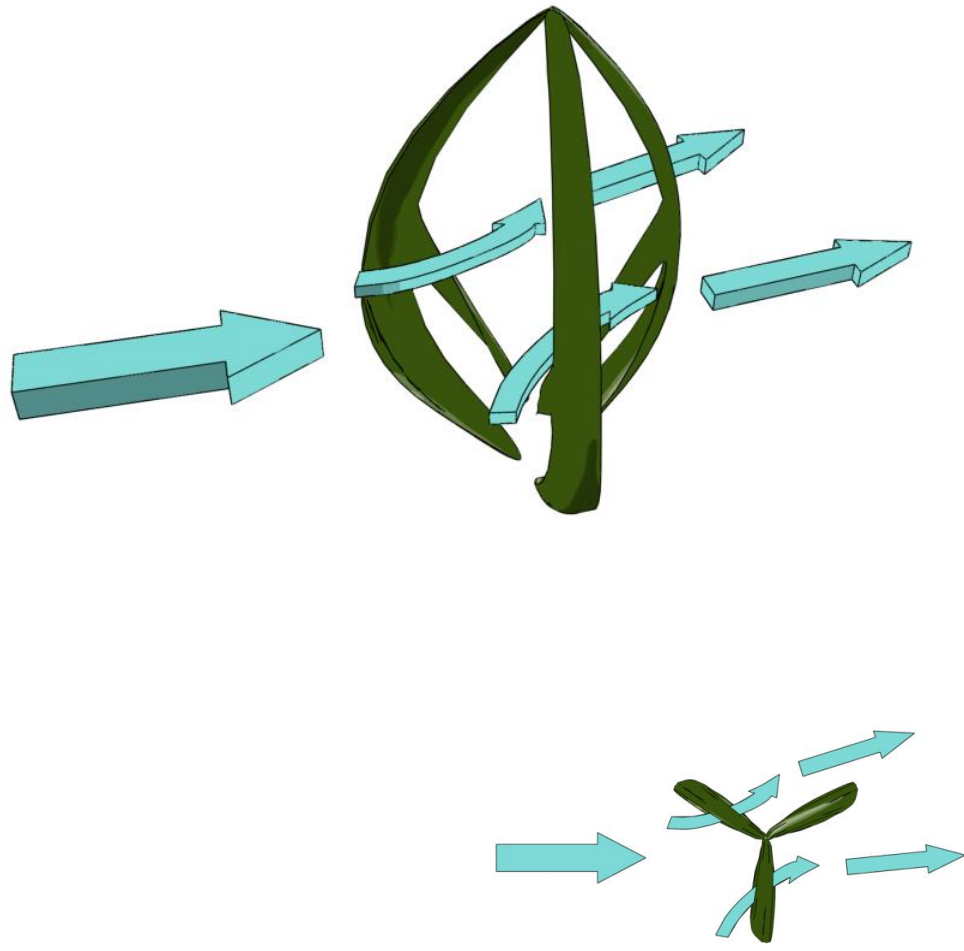


Figura 10. Error de un TSR bajo.

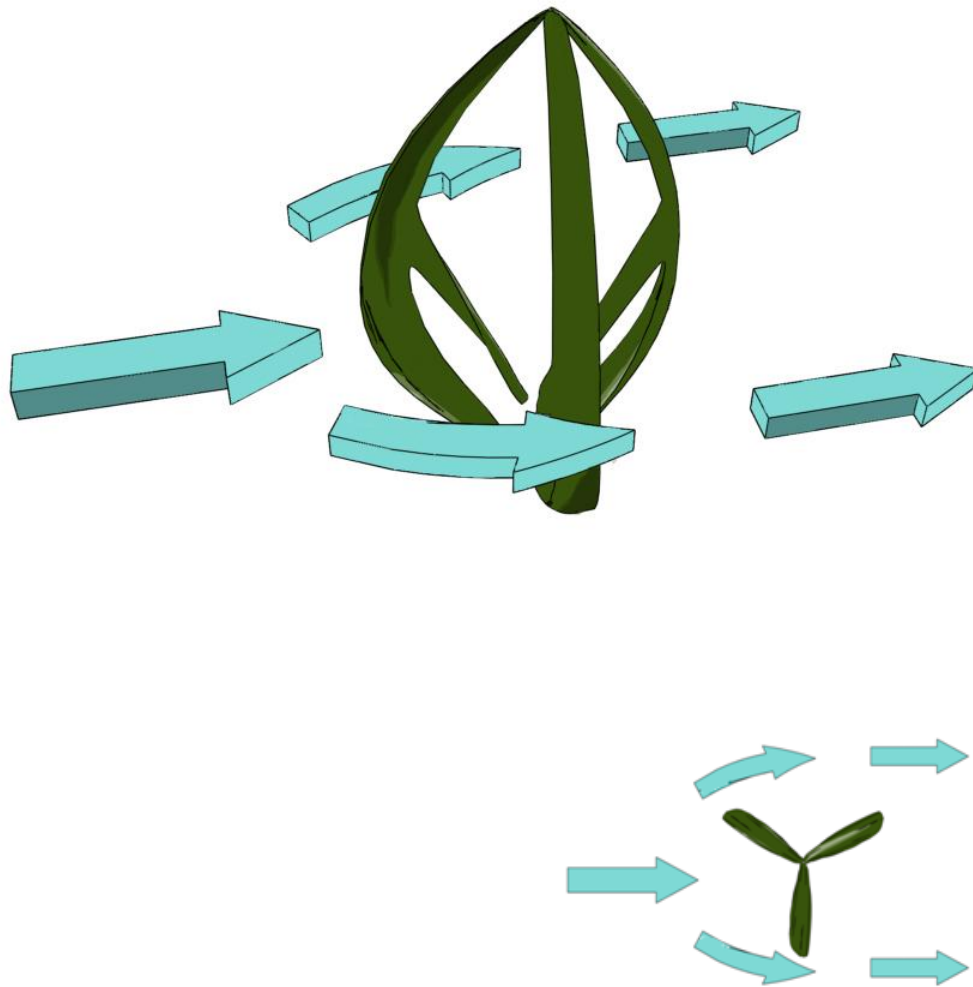


Figura 11. Error de un TSR alto.

La afirmación de que a mayor TSR se tiene una pala mejor diseñada es incorrecta, de hecho la selección de tsr, depende de numerosos factores estratégicos, inherentes a las magnitudes físicas como ruido, vibración, velocidad de arranque e inercia.

Un TSR alto puede tener como consecuencia:

- Que las palas lleguen a velocidades angulares mayores a 80 m/seg., de esta manera las palas estarían sujetas a desgaste por erosión.
- Ruido generado en rangos audibles y no audibles por el ser humano
- Niveles de vibración altos, consecuentemente un desgaste sobre los mecanismos instalados.

- Velocidades de arranque altas.
- Niveles de seguridad altos para prevención ante fallo catastrófico a consecuencia de una fuerza centrífuga alta.

A partir de la siguiente fórmula se puede calcular el tsr máximo:

$$\text{Max poder } \lambda = \frac{4\pi}{n}$$

n = numero de palas

Tabla 2. TSR ideal en función del número de palas según fórmula

Número de palas	TSR máx.
2	6.283
3	4.188
4	3.145

De cualquier forma si el aerogenerador está diseñado siguiendo principios aerodinámicos, se considera que el TSR óptimo debe ser entre 25 y 30 por ciento más alto que los valores teóricos arrojados por la fórmula de la tabla 2, esta alta eficiencia aerodinámica incrementa la velocidad rotacional de las palas, al mismo tiempo que extrae más energía (Tabla 3).

Tabla 3. TSR máximo en función del diseño aerodinámico.

Número de palas	TSR max	Diseño aerodinámico
2	6.283	7.853 - 8.167
3	4.188	5.235 - 5.444
4	3.145	3.931 - 4.088

Límite de vibración

En un sentido amplio de la definición de vibración, esta podría confundirse con el origen del ruido, pero se refiere a la vibración provocada por un TSR indebido o a que el eje no esté alineado con la flecha del generador y es la problemática con mayor importancia a resolver en el diseño de una pala, ya que puede causar desgaste prematuro sobre cualquiera de las piezas; palas, eje, batería, e incluso el generador eléctrico.

De acuerdo al tipo de vibración existente en este sistema, se le podría clasificar como vibración forzada, que es cuando el sistema vibra a causa de una excitación constante, y dado que se conoce los rangos en los que oscila esta vibración se puede diseñar un amortiguador o empaque a partir de pruebas realizadas.

La ley de conservación de la energía establece que la energía no se crea ni se destruye sólo se transforma, entonces se entiende que la energía que provoca un movimiento vibratorio en el sistema, es energía que el aerogenerador no está absorbiendo, por esta razón se han tomado dos medidas de prevención, una de ellas fue poner una almohadilla elástica en la base del aerogenerador, para absorber vibraciones, la otra consistió en reforzar y alinear el eje del aerogenerador.

Efecto Venturi

El efecto Venturi consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto, (en este caso aire), disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido contenido en este segundo conducto (Figura 12), este principio fue utilizado en la construcción el prototipo final de las palas.

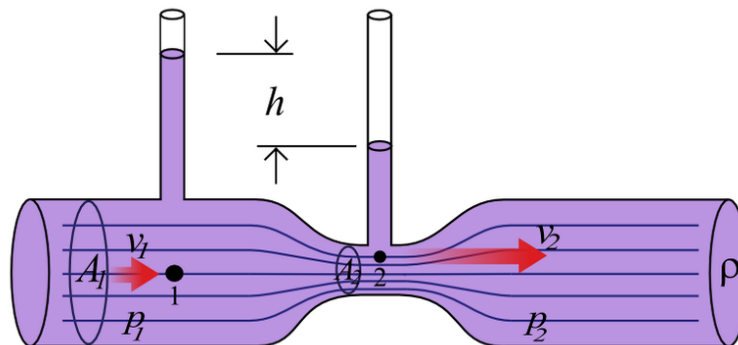


Figura 12. Esquema del efecto Venturi.

Recurso Eólico

De la misma manera que existe la disponibilidad de recursos energéticos no renovables, como petróleo y gas, existe la disponibilidad de recursos energéticos renovables; recurso solar y eólico, en este caso el recurso eólico es la disponibilidad de masa de aire en movimiento y depende de diferentes factores como son: presión, temperatura, humedad, velocidad, dirección y presión del viento (Figura 13).

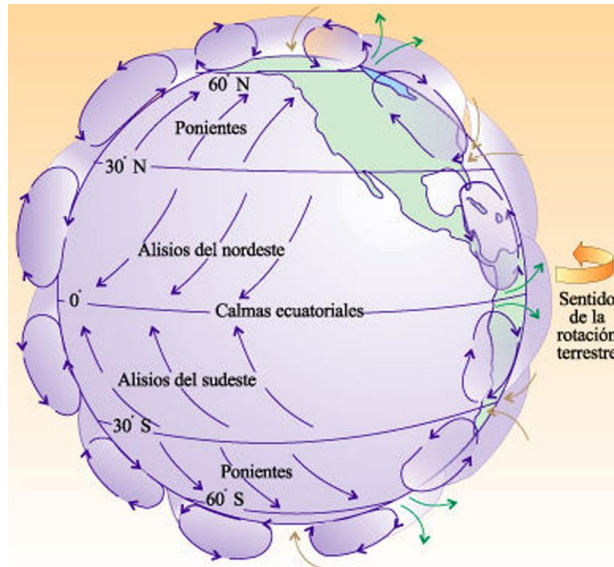


Figura 13. Esquema que muestra la distribución ideal de las corrientes de aire.

La calidad del muestreo del recurso eólico depende de la densidad de estaciones meteorológicas de medición, aunque en la actualidad existen algoritmos que permiten extrapolar datos y obtener modelos de estimación de vientos, dichos muestreos consisten en mediciones que a consecuencia de su densidad y a que siguen metodologías específicas para parque eólicos a gran escala, no visualizan lugares que podrían ser utilizados a escala menor, en instalaciones pequeñas.

Límite de BETZ

Albert Betz fue un físico alemán 1885 - 1968, quien publicó en 1926 su libro "Hydro and aerodynamics" (Betz, 1946) donde proporciona el cálculo de la energía máxima que se podría extraer del viento mediante un aerogenerador, a grandes rasgos explica que cuanto mayor sea la energía cinética que extraigamos del aire con un aerogenerador, mayor será la ralentización que tendrá el viento después de pasar por las palas.

Si intentamos extraer toda la energía, el aire saldría del aerogenerador con una velocidad casi nula, entonces a consecuencia de no poder abandonar la propia turbina, no circularía más aire y sería imposible captar la energía cinética.

En caso contrario si se deja pasar, mediante la construcción de un arreglo de palas todo el viento sin oponer resistencia, tampoco se obtendría energía. por lo tanto se puede concluir que existe una situación media, entre frenar el viento y dejar pasarlo, donde la conversión de energía cinética del viento se transforme a energía mecánica con el máximo porcentaje de eficiencia.

Un aerogenerador ideal ralentiza el viento hasta $2/3$ de su velocidad inicial.

La ley de Betz dice que solo puede convertirse menos de $16/27$ de la energía cinética a energía mecánica, es decir el 59%.

Torque necesario

Una definición práctica para torque en este documento es: es el efecto giratorio que produce una fuerza aplicada a un cuerpo provisto de un eje.

$$T = f \times D$$

Velocidad de arranque

La velocidad de arranque o comúnmente encontrada como cut-in speed, es la velocidad de viento a la que las palas comienzan a producir movimiento sobre el generador, depende del diseño y número de palas, de la curvas eléctricas, del torque inicial de arranque del generador, y desempeño del aerogenerador, resulta complejo aislar cada uno de los parámetros y tener valores sobre los cuales comparar de manera individual, aunque como producto comercial se pueden encontrar al día de hoy aerogeneradores de uso doméstico que con ayuda de un tren de engranes arrancan a velocidades de viento desde 3 m/s .

Existe una gran diferencia entre las estaciones de obtención de energía eólica a gran escala, y en pequeñas zonas urbanas, en la revisión de la bibliografía se encontró gran cantidad de artículos orientados a la obtención de la energía eólica y sus repercusiones ambientales en lugares con riqueza en flora y fauna, pero fue imposible encontrar referentes en este tipo de investigación a nivel urbano, incluso de estudios de viento, ya que no se cuenta con estaciones meteorológicas, o datos estadísticos, por eso se justifica el perfil en la parte de diseño, un producto de fabricación local, modular y de fácil implementación.

Aunque existen similitudes en el enfoque parque eólico - zona urbana, las principales diferencias se encuentran en la interconexión de energía y en el factor de capacidad (Figura 14), que es la cantidad de potencia que entrega un aerogenerador dependiendo de la velocidad del viento y su variabilidad. Este término se usa para describir la entrega real de energía de la instalación y se expresa como el porcentaje del tiempo que ésta operaría en su potencia nominal.



Figura 14. Principales componentes en una instalación de producción independiente de energía a escala doméstica.

Una instalación de energía eólica debe trabajar con factores de capacidad mayores de 25 % para que sea, preliminarmente, factible en lo económico, el rango de 25 a 35 % es satisfactorio. Por ejemplo, una instalación eólica de 10 MW con un factor de capacidad de 30 % equivale a que trabajara 2628 horas a su potencia nominal, y que durante 6132 horas no entregara ninguna potencia, o que produjera todo el año constantemente una potencia de entre 2.5 a 3.0 MW.

En el caso de este proyecto, se trabajó por debajo de las RPM nominales, pero desde velocidades de funcionamiento muy bajas, a un porcentaje de horas mayor, prolongando la vida útil de todas las piezas y brindando al usuario una relación costo-beneficio superior.

Fórmulas usadas

En este capítulo se presentara la teoría necesaria para dimensionar y estructurar los cálculos matemáticos usados para el diseño de un aerogenerador.

El viento es una masa de aire en movimiento, y por consecuencia una energía cinética

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m_{aire} \cdot v^2$$

E_{cin} : energía cinética del viento en Joules (J)

m_{aire} :masa del aire en kilogramos (kg)

v : velocidad del aire en $\frac{m}{s}$

De la formula anterior se puede definir la potencia del viento de la siguiente manera:

$$P[W] = \frac{E_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm_{aire}}{dt} \cdot v^2$$

P : potencia del viento en watts (W)

La potencia es proporcional a la cantidad de aire (masa) que circula por determinado sector del espacio.

La masa puede ser expresada por medio de la siguiente fórmula:

$$m_{aire}[kg] = p \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot V[m^3]$$

p : densidad del aire en $\frac{kg}{m^3}$ a 15° C y presión normal, la densidad es de $1.225 \frac{kg}{m^3}$

V : volumen del aire en m^3

Para poder definir la variación de masa en el tiempo se debe agregar la variación del volumen del aire que circula por el mismo sector

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = p \cdot \frac{dV_{aire}}{dt}$$

El fluido está definido de la siguiente manera:

$$F \frac{m^3}{s} = \frac{dV_{aire}}{dt}$$

F: Flujo del aire en $\frac{m^3}{s}$

También es válida la siguiente igualdad:

$$F \left[\frac{m^3}{s} \right] = A [m^2] \cdot v \left[\frac{m}{s} \right]$$

Donde A representa la sección ortogonal al vector de la velocidad del aire en m^2 que es equivalente a la superficie cubierta por el aerogenerador.

sustituyendo ecuaciones se obtiene que:

$$\frac{dm_{aire}}{dt} = p \cdot A [m^2] \cdot v \left[\frac{m}{s} \right]$$

Sustituyendo la ecuación de potencia del viento y variación de masa en el tiempo se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \cdot p \cdot A \cdot v^3$$

Coefficiente de poder

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \text{ [Watt]}$$

S=Área de barrido transversal

$$S = \pi R^2 [m^2]$$

P = densidad del aire (varía dependiendo la temperatura, altura y humedad del aire).

Por lo tanto:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3$$

$$C_p = \frac{P_t}{P} = \frac{P_1}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3}$$

Esta ecuación define el comportamiento de la potencia de una masa de aire que se desplaza con cierta velocidad por una unidad de superficie.

Entonces los factores que definen la potencia son:

A: superficie en m^2 (equivalente a πR^2)

ρ : densidad del aire en $\frac{kg}{m^3}$ (dependiendo de las condiciones atmosféricas de temperatura, altura y humedad).

v: velocidad del viento en $\frac{m}{s}$

La formula antes mencionada es de suma importancia para el diseño de aerogeneradores y expresa la potencia en función del cubo de la velocidad del viento y proporcional a la superficie de la sección, además si se considera la velocidad del viento como constante se puede afirmar que la potencia sigue un comportamiento cuadrático respecto al diámetro del aerogenerador.

A continuación se citan las ecuaciones fórmuladas con Tip Speed Ratio

Fórmula de TSR

$$\frac{v}{V} = \frac{\omega r}{V} = \lambda = \text{Tip Speed Ratio}$$

V = velocidad del viento en m/seg

$v = \omega r$ = velocidad límite del rotor en m/seg

r = radio del rotor en metros

$\omega = 2\pi f$ velocidad angular en radian/segundo

TSR óptimo

$$t_s = \frac{2\pi}{n\omega}$$

$$t_w = \frac{s}{V}$$

$$t_s \approx t_w$$

$$\frac{2\pi}{n\omega} \approx \frac{s}{V} \rightarrow \frac{n\omega}{V} \approx \frac{2\pi}{s}$$

Por lo tanto la frecuencia rotacional óptima es:

$$\omega_{opt} \approx \frac{2\pi V}{ns}$$

Fórmula de TSR máximo

$$\text{Max poder } \lambda = \frac{4\pi}{n}$$

n = número de palas

Extracción de poder óptimo

$$\lambda_{opt} \approx \frac{\omega_{opt} r}{V} \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{r}{s}\right)$$

Efecto Venturi

$$v_1 S_1 = v_2 S_2$$

v_1 = velocidad en sección 1

S_1 = Superficie de sección 1

v_2 = velocidad en sección 2

S_2 = Superficie de sección 2

CAPÍTULO III

DESARROLLO

Herramientas metodológicas.

El proceso metodológico se dividió en dos principales partes, la primera, la metodología del proyecto, es la que se empleó en el proceso de documentación de tesis y elaboración de proyecto final; la segunda metodología usada es la del proceso de síntesis y creatividad, que engloba gran parte del papel del diseñador industrial en un proyecto interdisciplinario, se llevó a manera de bitácora.

Metodología de proyecto

El desarrollo de un aerogenerador de uso doméstico que cumpla con objetivos muy específicos como reducción de vibraciones y aumento de eficiencia, requiere de una organización y de una metodología concreta, tomando en cuenta todas las herramientas de que se dispone.

Investigación del estado de arte.

Parte medular de esta metodología, ya que su correcta realización dió como resultado poder generar nuevas comprensiones del tema y la acumulación selectiva de documentos anteriores, consistió en investigar de manera reflexiva sobre los aerogeneradores, desde todos los enfoques.

Permitió tener una visión global y un enfoque a futuro, el análisis de la lectura fue de carácter crítico y solo documentos oficiales.

En la figura 15 se muestran todos los componentes que formarán parte de este proyecto.



Figura 15. Esquema con las principales partes del sistema de aerogenerador para uso doméstico.

El aerogenerador aquí presentado está diseñado a partir del contexto y de la interfaz con el usuario, requirió una instalación no menor a 5 metros a nivel del piso, tratando de tener un flujo de viento sin árboles o construcciones cercanos, la base del generador se construyó para soportar fuerzas de torque a velocidades de hasta 64.8 km/h durante periodos de tiempo prolongados.

Por lo cual contará con un sistema de frenado electrónico por disminución de la resistencia de fase a fase del generador, usando dispositivos IGBT's⁴, que se programó para activarse gradualmente a partir de 30 RPM en pala, es decir 330 RPM del generador eléctrico, que es cuando las pruebas detectan que existe vibración peligrosa sobre alguna de las partes del aerogenerador.

⁴ Transistores bipolares de puerta aislada IGBT's. (Insulated Gate Bipolar Transistor por sus siglas en ingles).

Definición de especificaciones y parámetros.

Se establecieron los parámetros a superar para poder cumplir los objetivos propuestos en la tesis, se planteó como medir dichos parámetros. En este caso la tesis tiene como fin recolectar los datos y dar como resultado un aerogenerador con perfil ideal para ser implementado en zonas urbanas de México.

Conceptualización/CAD (Computer Aided Design)

Se seleccionaron las ideas que cumplieron con el enfoque del proyecto, incluyendo una estimación de las repercusiones de cada fenómeno antes mencionado y se diseñó un modelo como el que se muestra en la figura 16.

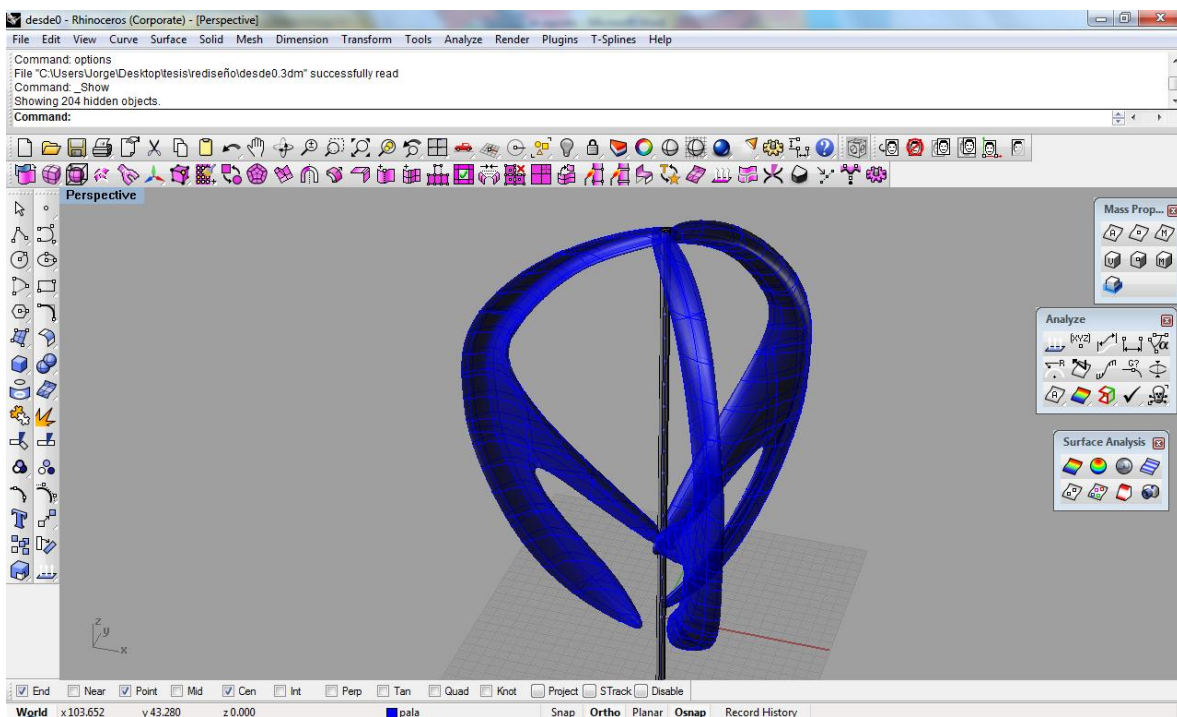


Figura 16. Captura de pantalla de programa rhinoceros 4 S.R. 8, mostrando el ensamble final.

Una vez realizado los modelos, se plantearon soluciones de modularidad de las piezas y prevención de errores en procesos de fabricación, la conceptualización en CAD conllevó también la herramienta de generación de imágenes realistas para analizar el impacto visual con los materiales finales, se usaron programas

especializados como keyShot, y Maxwell Render, estas herramientas resultaron útiles en el punto de visualización a escala humana, e incluso la relación con el lugar de instalación.

Análisis de estructura por medio de herramientas CAE (Computer Aided Engineering)

En esta etapa se analizó el funcionamiento estructural del aerogenerador y posibles puntos de ruptura, esta fase resultó muy importante ya que permitió ahorrar tiempo al corregir errores de manera rápida en un periodo inicial del proyecto, estas soluciones siguieron el perfil del aerogenerador, que es la eficiencia a través de la simplificación en el funcionamiento y se siguió trabajando con el que arrojó mejores resultados.

Fabricación de prototipo.

Se destinó un periodo de tiempo a la investigación de materiales idóneos para el modelo de aerogenerador seleccionado en la fase anterior y después se empezó la fabricación de dicho prototipo, paralelamente se identificó el proceso de manufactura del producto final y se hicieron adaptaciones a este.

Pruebas.

Se realizaron pruebas de eficiencia en un área designada por parte del equipo de medición de recursos eólicos, para comprobar si se cumplieron los objetivos en el del aerogenerador, en este ambiente idóneo, también se midió su funcionamiento en distintas condiciones para asemejarlas al peor escenario en el que se podría encontrar y así comprobar los candados de seguridad impuestos para proteger los componentes eléctricos y estructurales.

Documentación del proceso de fabricación.

En esta etapa se documentó la información necesaria para la reproducción, se enumeraron las tareas necesarias para fabricar matrices de molde, moldes y piezas finales del aerogenerador.

Metodología de diseño industrial

La metodología de diseño industrial se contempló desde un punto de vista centrado en el usuario, requirió de una metodología diferente a problemáticas específicas, ya que el rango de enfoque que se le puede dar al proyecto es mucho más amplio.

Delimitación del problema

En esta etapa se conceptualizó todo el proyecto y sus repercusiones:

Contexto al cual se aplicará, análisis profundo desde el enfoque político-social.

Relación con el usuario y estudio de interfaz.

Parámetros del problema.

Reto tecnológico.

Se buscaron las principales características de productos similares existentes en el mercado y se investigó acerca de diferentes principios físicos presentes, aprovechables para resolver los parámetros asociados.

Disponibilidad tecnológica

En esta parte del proceso se estudió un abanico de posibilidades y, se investigó acerca de diferentes tecnologías sin importar el ámbito en el que se desarrollan, o incluso su fecha de creación, para de esta manera poder dar solución a los futuros retos, o bien basar la creación de un prototipo a partir de una tecnología existente.

Proceso creativo.

El proceso creativo estuvo presente a lo largo de todo el desarrollo del proyecto, pero existió un apartado inicial (al no tener influencia de ningún otro punto de la metodología) en el que se conceptualizó el proyecto a partir de diferentes propuestas visuales y tecnológicas, se cuidó un enfoque puramente estético y urbanístico, para después seleccionar las mejores propuestas y hacer un acercamiento con la contraparte técnica.

Se hizo uso de diferentes herramientas creativas, pero principalmente sobre temas de urbanismo y estética, y se buscó representaciones fieles de los principales valores tecnológicos del producto final, para así lograr una mejor interfaz con el usuario, apostando por la simplicidad de construcción y la clara representación de símbolos y funcionamiento.

Se utilizaron los siguientes ejercicios creativos:

Bocetaje rápido

Para esta etapa tan importante del diseño se utilizó un ejercicio creativo, mejor descrito en el libro *Design Synectics* (Roukes) y se llevó a lo largo de todo el proceso de diseño, consiste en diferentes operaciones que podemos realizar con las ideas a través de un listado de veinticuatro verbos o instrucciones.

Lluvia de ideas, asociaciones lógicas y asociaciones forzadas.

Los bocetos realizados se clasificaron sobre cuatro apartados distintos; dibujo de pala individual, dibujo de ensamble completo de palas, con y sin movimiento, y por último dibujo del área interna del aerogenerador producido por las palas en movimiento (como se aprecia el cielo a través del aerogenerador en movimiento, y la sombra que proyecta)

Conceptos clave: Imagen - Signo, Representación, Significado

Investigación de fenómenos físicos y su relación con la eficiencia.

Investigación de parámetros de diseño y de cómo afectan directa o indirectamente el rendimiento del aerogenerador como sistema, análisis más profundo de fenómenos físicos y mecánicos, y de las variables sobre las que influye.

Comprobación a partir de software CAD

Después de seleccionar las mejores tipografías⁵, y de un estudio de las características técnicas de cada variación, se seleccionó la mejor de estas para modelarla y parametrizarla⁶ en software de diseño 3d, para de esta manera generar un flujo de trabajo mucho más rápido y poder experimentar con las repercusiones de eficiencia al cambiar proporciones y ángulos de manera independiente.

⁵ Una familia tipográfica es un grupo de formas, que comparten rasgos de diseño comunes, conformando todas ellas una unidad tipográfica. Los miembros de una familia (tipos) se parecen entre sí pero también tienen rasgos propios.

⁶ Una ecuación paramétrica describe una curva o superficie en base a un conjunto de parámetros que la recorren, como un conjunto de ecuaciones que permiten obtener cada una de las coordenadas, a medida que el parámetro evoluciona sobre el intervalo en el que se encuentra definido. De forma paramétrica, cada una de las coordenadas de un punto sobre la superficie es representada separadamente como una función explícita de parámetro independiente.

Modelos

Creación de maquetas iniciales como parte del proceso creativo, la mayoría de las fallas producidas en las maquetas, estarán también presentes en el prototipo final, independientemente del material en que se fabriquen.

Investigación de contexto nacional

Investigación de particularidades contextuales que podrían afectar el diseño del aerogenerador, por ejemplo legislación, velocidades de viento y su medición.

Investigación de mercado

Con el fin de crear un prototipo que sea competitivo comercialmente hablando, se realizó una investigación de mercado, trabajando sobre un prototipo, completamente compatible con el contexto nacional, dando como resultado un producto con altos niveles de rentabilidad, contando con un plan de negocios que lo respalda.

Construcción de prototipos preliminares.

En esta parte de la metodología se fabricaron muestras, y se seleccionaron las que tuvieron el mismo enfoque que el del plan de negocios (procesos compatibles y rentables con producciones de 1 a 450 palas mensuales), y con la parte de investigación contextual de la misma metodología, se construyeron además prototipos con diferentes técnicas

Como se mencionó anteriormente en el resumen de la tesis, el objetivo fue fabricar prototipos de diferentes familias de turbinas eólicas de eje vertical, en Savonius y Darrieus, para obtener resultados de implementación analizando las ventajas y desventajas de cada prototipo.

El primer prototipo que se fabricó fue un aerogenerador Savonius de dos palas (Figura 17) con las siguientes características:

Tabla 4. Características generales del primer prototipo puesto a prueba.





Material de palas	Lamina de poliestireno termoformada, tensada con cable de acero inoxidable
Peso por pala	2 kilos
Peso total	9 kilos
Superficie de barrido por pala	.96 m ²
Superficie de barrido total	1.92 m ²



Figura 17. Primer prototipo puesto a prueba.

Después de realizar pruebas a nivel de piso, las cuales consistieron en monitorear el funcionamiento del aerogenerador, y determinar el funcionamiento dentro de periodos de tiempo como Fijo, Movimiento ideal y Vibración, se observó el siguiente comportamiento.

Tabla 5. Desempeño del primer prototipo puesto a prueba.

	Fijo 	Movimiento ideal 	vibración 
	Revoluciones por minuto $\pm 1/24$ seg.	Segundo de reproducción	Segundos en ese estado
	9.13	0 – 6.5	6.5
	11.11	6.5 - 12	5.5
	8	12-14	2
	0	14-24	10
	16	24-28	4
	39	28-39	11
	22	39-45	6
	9.18	45-48	3
	10.5	48-55	7
	36	55-66	11
	16	66-70	4
	7	70-72	2
0	72-73	1	

Tras observar el funcionamiento de manera detenida se concluye que existe un movimiento desfasado, ya que al ser de dos palas, cada una debe de aportar giros de 180 grados antes de que la siguiente pala llegue a la misma posición (Figura 18), lo que provoca un movimiento vibratorio.

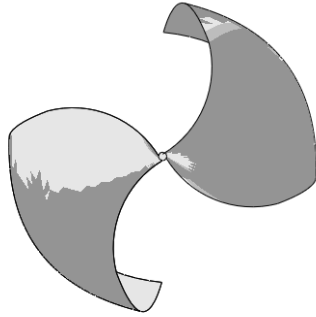


Figura 18. Esquema de la vista superior del primer prototipo construido.

Un segundo prototipo de la familia Savonius se construyó (Figura 19 y 20), tomando en cuenta los errores de funcionamiento del primero, con las siguientes características.

Tabla 6. Características generales del segundo prototipo puesto a prueba.

Material de palas	Lamina de poliestireno termoformada, tensada con madera
Peso por pala	1.2 kilos
Peso total	8.6 kilos
Superficie de barrido por pala	.48 m ²
Superficie de barrido total	1.44 m ²



Figura 19. Segundo prototipo puesto a prueba.

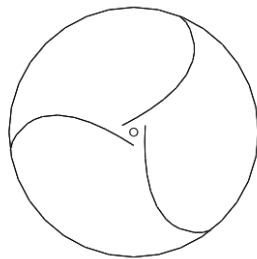




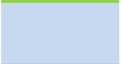



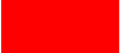



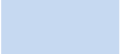
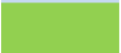


Figura 20. Esquema de la vista superior del segundo prototipo construido.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 7. Desempeño del segundo prototipo puesto a prueba.

	Fijo 	Movimiento ideal 	vibración 
	Revoluciones por minuto $\pm 1/24$ seg.	Segundo de reproducción	Segundos en ese estado
	10	0 - 15	15
	0	15 - 19	4
	20	19 - 29	10
	25	29 - 33	4
	35	33 - 39	6
	40	39 - 47	8
	10	47 - 50	3
	0	50 - 55	5
	14	55 - 67	12
	0	67 - 70	3
	18	70 - 72	2

Después de analizar los dos primeros prototipos se pueden deducir varias puntos:

- Debido a las características del material con el que se fabricaron los dos primeros prototipos, puede haber lapsos de arranque abrupto, pasando de estado fijo a vibratorio en pocos segundos.
- La ligereza de la lámina de poliestireno resultó contradictoria, ya que una vez que no existen corrientes de viento, las palas no generan movimiento.
- Los pliegues que se forman en el material generan ruido no predecible.
- El generador tipo Savonius en sus diferentes configuraciones genera turbulencias ya que en todos los casos invierte el sentido del viento.

El resultado de la investigación descartó esta familia de aerogeneradores bajo estas condiciones de campo.

Construcción de prototipo final.

Es la última etapa de la metodología de diseño industrial, consistió en la construcción de un prototipo final y su instalación en un espacio con condiciones reales al ambiente de trabajo, todo lo aprendido en la construcción de los prototipos preliminares, la investigación del contexto, desarrollo y análisis CAD, se vieron justificados en esta etapa.

En el presente trabajo de investigación se construyó un prototipo que aprovechara el recurso eólico a velocidades de entre 5 a 25 m/s, a una altura estimada de 5 metros a nivel del piso, o de aprovechar su instalación en zonas urbanas que pudieran funcionar como túneles de viento.

El modelo de prueba de generador eléctrico utilizado es “GINLONG Technologies GL-PMG-1000” con las siguientes especificaciones técnicas:

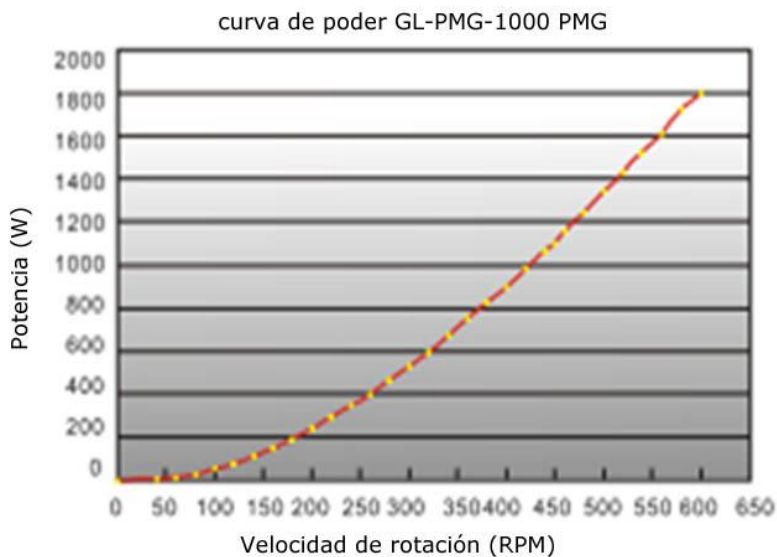


Figura 21. Curva de poder del generador eléctrico usado.

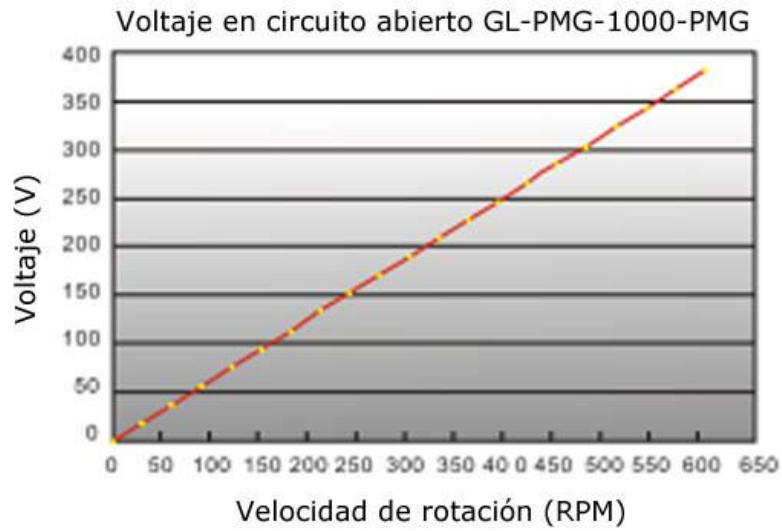


Figura 22. Curva de voltaje del generador eléctrico usado.

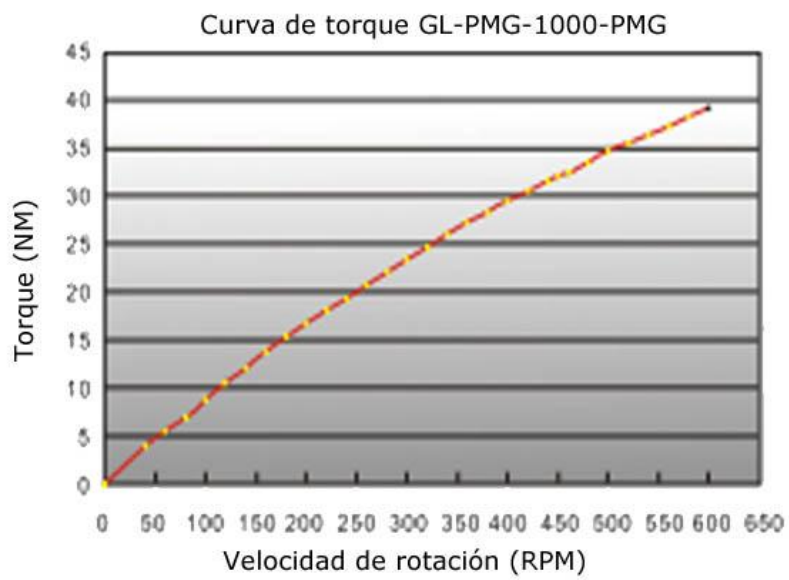


Figura 23. Curva de torque del generador eléctrico usado.

Tabla 8. Especificaciones mecánicas del generador eléctrico.

Peso (Kg):	15.7
Torque de arranque (N.m):	<0.5
Inercia del rotor (Kg.m):	0.010
Tipo de balero	Alto estandar NSK6207DDUC3 (frente) NSK6207VVC3(trasero)

De acuerdo a esta información se obtuvieron los siguientes datos clave.

- El torque requerido a la velocidad nominal de 450 RPM es de 31.5 N.m
- Tiene un torque de inicio menor a .5 N.m
- La inercia del rotor es de .010 kg/m

Como vemos en la curva de torque, se identifica que a manera que aumenta la velocidad de rotación, aumenta el torque proporcionalmente.

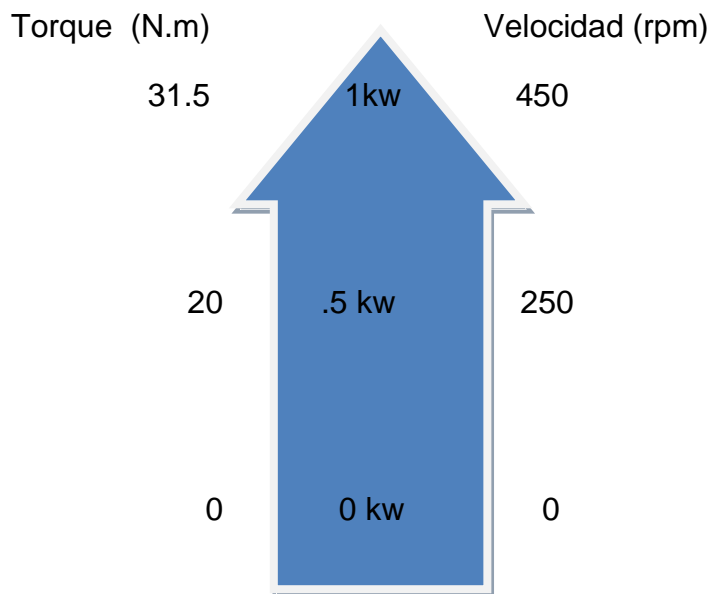


Figura 24. Relación velocidad rotacional – torque.

En un análisis de sistema completo del concepto de torque, se indica que a mayor distancia del eje con la pala, mayor momento de torsión, pero con la desventaja de poder dirigir esfuerzos que influyan negativamente sobre las direcciones del eje de la pala con el del generador.

Previo a la fabricación y como parte de la metodología del proyecto, se evaluaron distintos aspectos de la superficie en el programa Rhinoceros versión 4 sr 8, a continuación se muestran las capturas de pantalla de dichos resultados.

Debido a que el modelo 3d se copia directamente al modelo de producción, el análisis de estructura es muy preciso y se puede hacer antes de su producción.

Análisis con la herramienta Curvature graph, esta herramienta se utilizó para corroborar la continuidad de los perfiles de la pala.

Si el perfil es generado por una línea tangente esta se graficará como lo muestra la figura 25, por el contrario si es generado por una línea continua, se graficará como muestra la figura 26:

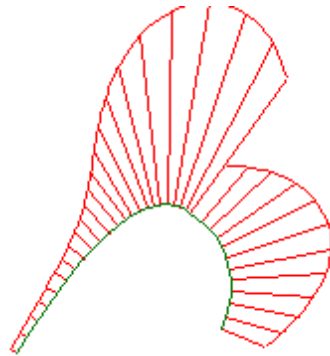


Figura 25. Resultado del análisis “curvature graph” sobre perfil tangente.

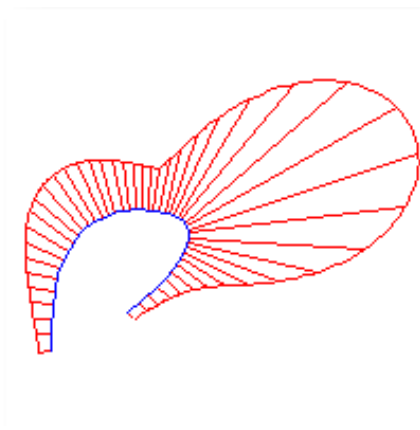


Figura 26. Resultado del análisis “curvature graph” sobre perfil continuo.

Un análisis en distintas posiciones de cámara se muestra en la figura 27

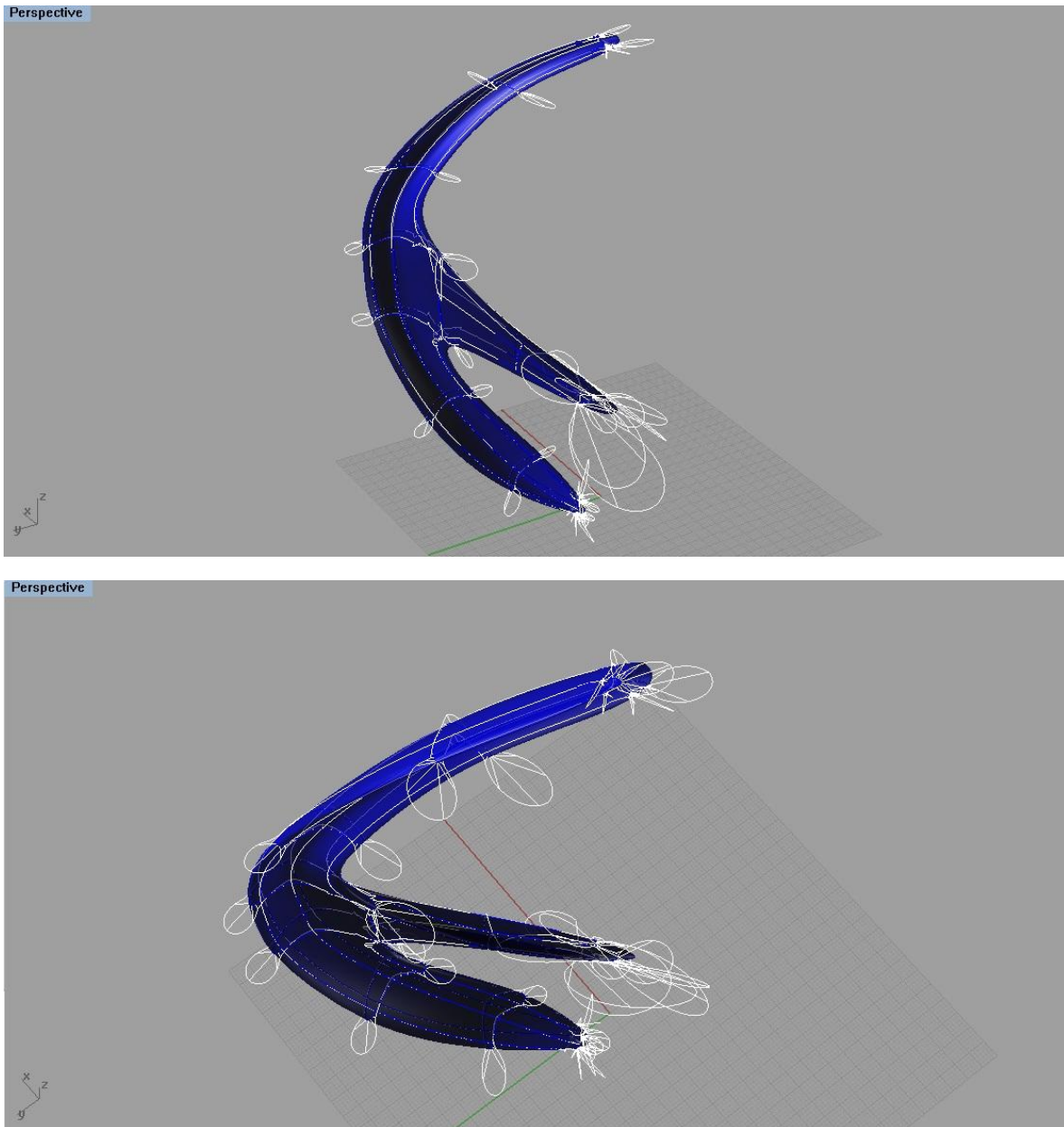


Figura 27. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado del análisis con herramienta “curvature graph” en diferentes posiciones.

Curvature analysis, muestra un análisis por colores sobre la superficie, una superficie continua tiene dos curvaturas principales, en este caso se utilizó la curvatura gaussiana, que tiene tres colores de representación:

- rojo = valor positivo
- verde = valor nulo,
- azul = valor negativo

Como se observa en la figura 28, la mayor parte de la superficie tiene un valor nulo, lo que significa que la superficie es plana en al menos una dirección, lo que significa que la parte de la manufactura, específicamente la extracción de pieza del molde, no representara ningún riesgo.

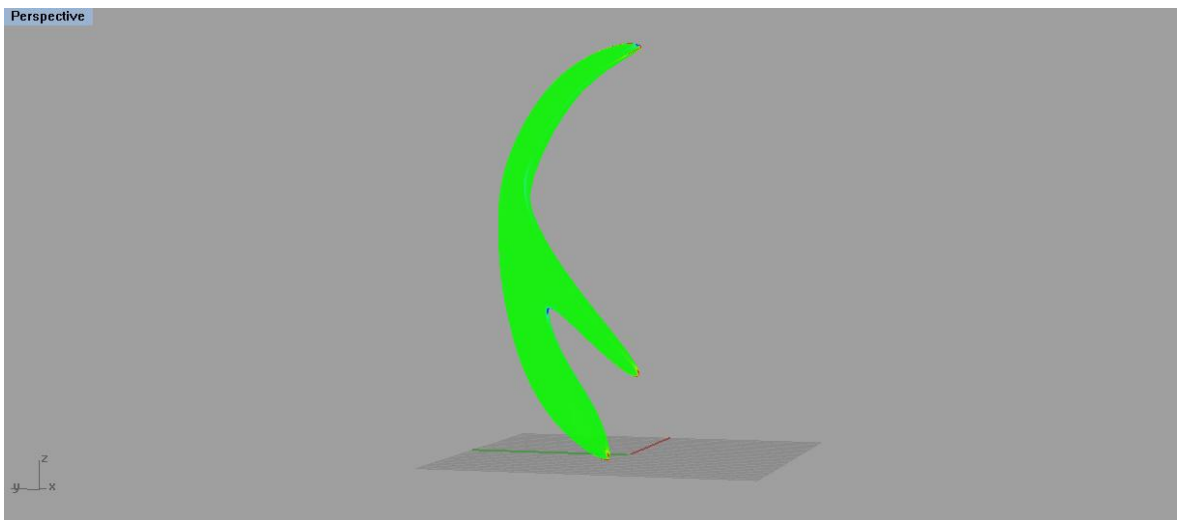


Figura 28. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado del análisis con herramienta “Curvature analysis”.

Draft angle o ángulo de desmoldeo, figura 29 se utilizó para valorar las superficies del molde, y donde deberían de llevar refuerzos para prolongar su vida útil.

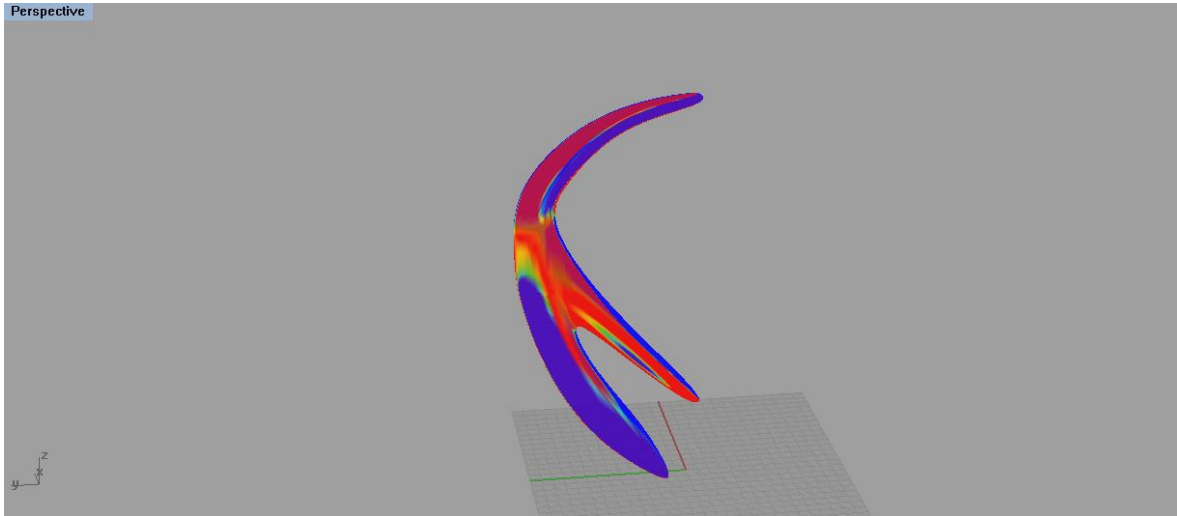


Figura 29. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado del análisis con herramienta “draft angle”.

Map analysis, esta herramienta es un comando visual útil en el análisis de superficies, esta herramienta usa cálculos de superficies NURBS⁷ y técnicas de generación de imágenes realistas, es útil para visualizar la suavidad y curvatura de una superficie.

El map analysis o mapeado de entorno (Figura 30), es un estilo de renderizado que hace parecer como si una escena estuviera reflejada por un metal muy pulido, por lo que de existir un defecto en la superficie sería muy notorio con esta herramienta

⁷ Acrónimo inglés de la expresión *Non Uniform Rational B-spline*

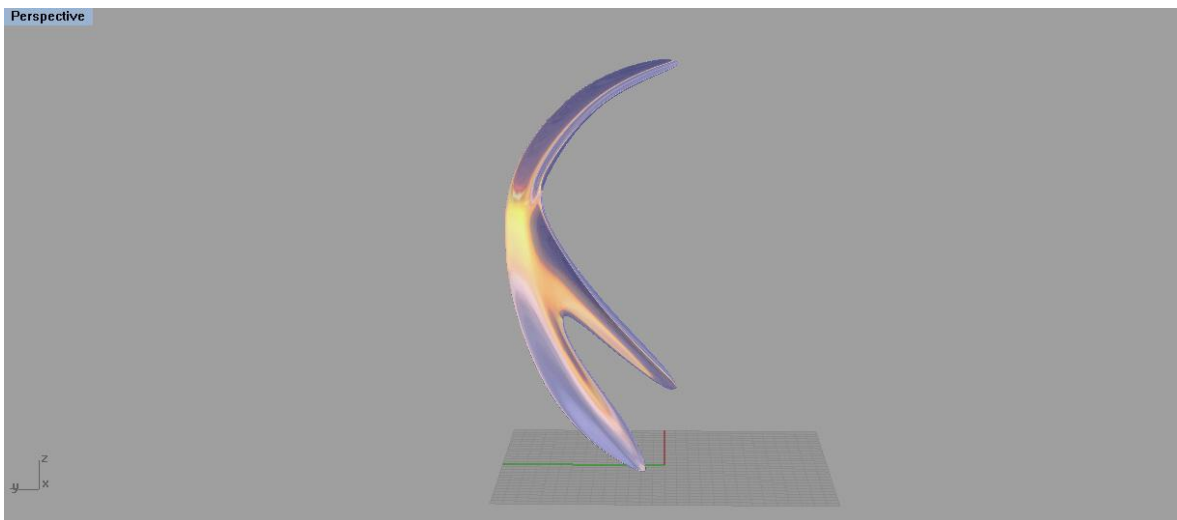
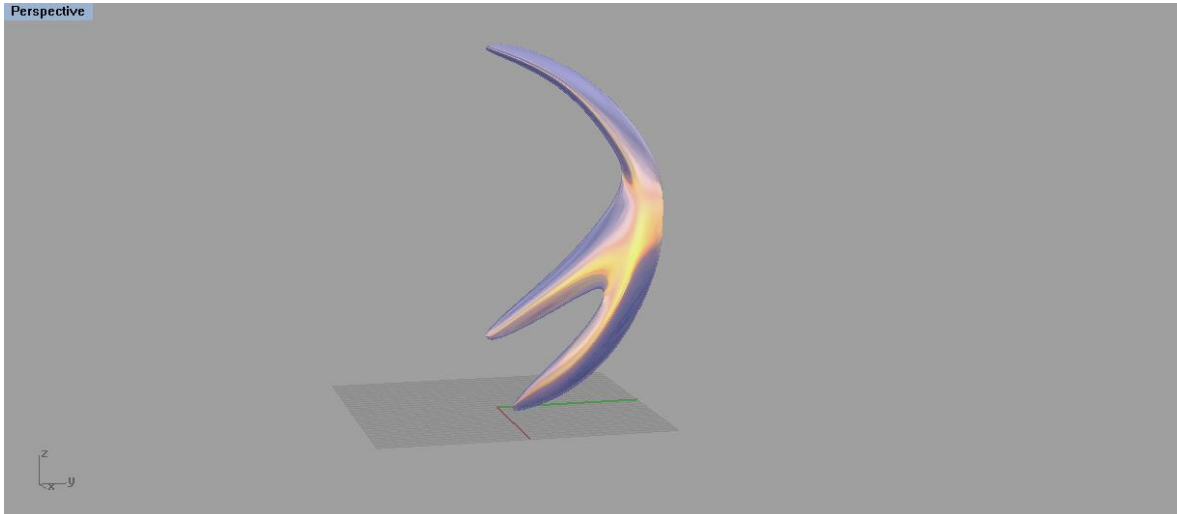
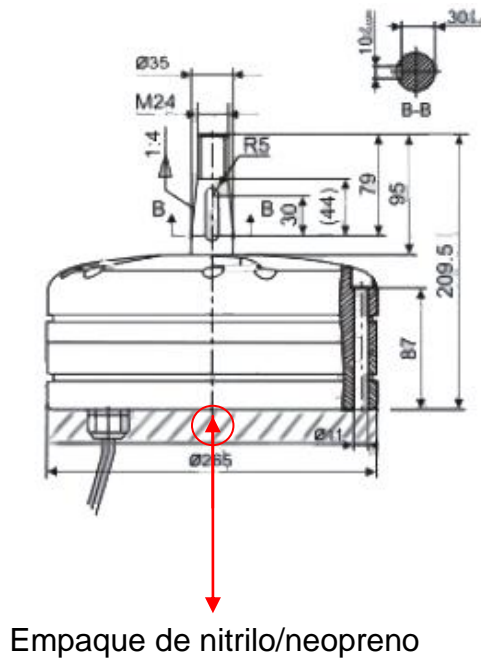


Figura 30. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado de análisis con herramienta “map analysis” en diferentes posiciones.

De acuerdo a la investigación realizada en este trabajo se buscó disipar la vibración del aerogenerador, para ello se optó por dos alternativas, la primera consistió en un empaque, después de comparar características de distintos materiales, se encontró una combinación de nitrilo/neopreno extruido, que en presentaciones de 1 pulgada de grosor posee las siguientes características técnicas en cargas de hasta 326 kg:

- posee 0.2/0.7 centímetros de deflexión.
- hasta 70 grados durómetro.

En la figura 31 se aprecia su posición.



Empaque de nitrilo/neopreno

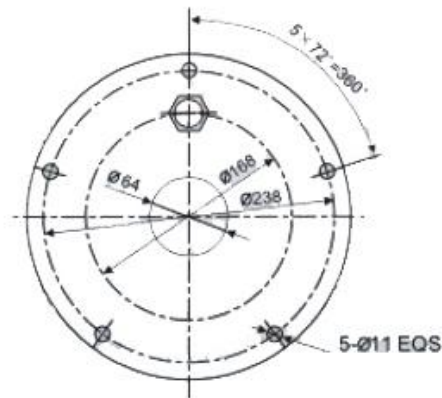


Figura 31. Ubicación y medidas del empaque auxiliar en la absorción de la vibración.

La segunda opción para disipar movimientos vibratorios consistió en diseñar las palas del aerogenerador con un espacio vacío que puede adaptarse de 8 a diez centímetros entre la pala y el centro del eje, en su punto más bajo (Figura 32), que es donde se ejerce el momento de torsión menor en la relación pala-eje (Figura 33), con el fin de dar salida al excedente de viento o conducirlo a la superficie de

la pala con mayor aprovechamiento de energía, como consecuencia se consigue alargar la vida útil de la pala.



Figura 32. Separación entre las palas y el aerogenerador.

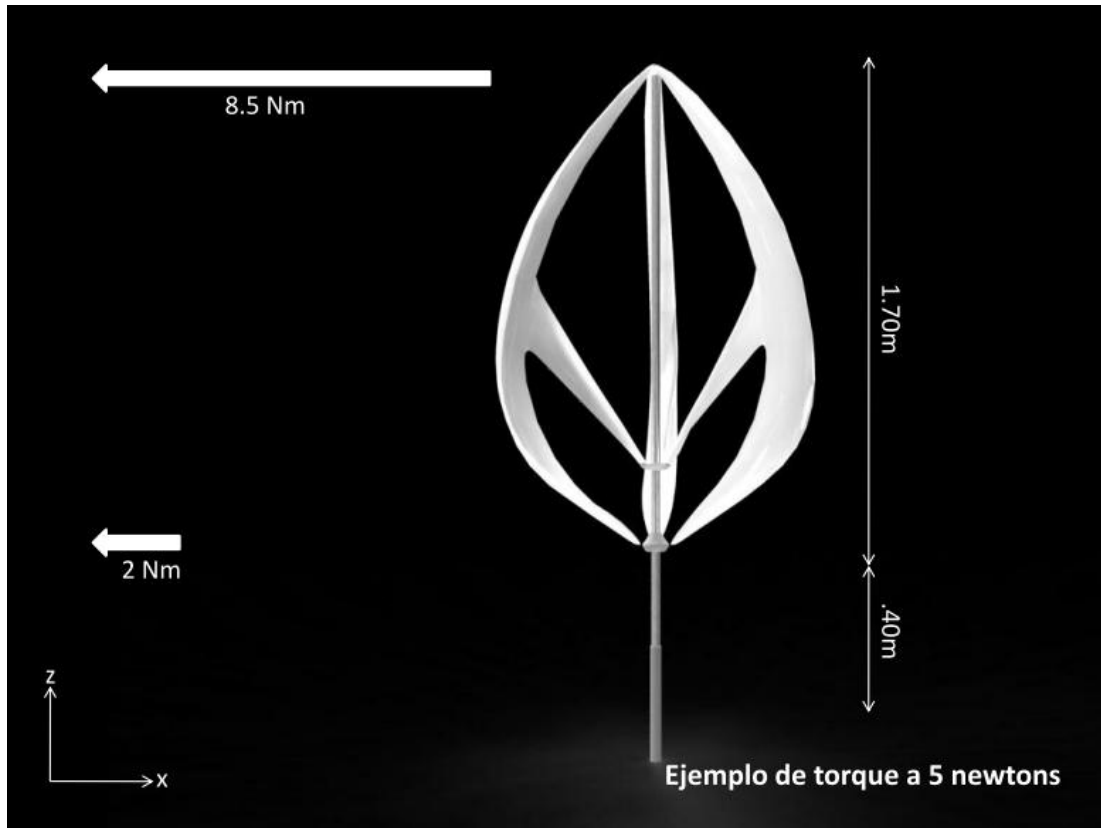


Figura 33. Ejemplo del efecto de torque a diferentes distancias del eje del aerogenerador.

El efecto Venturi ha sido ampliamente usado en diseño de piezas mecánicas como carburadores, pero también puede ser usado en el diseño de las palas, en este caso, generar un área dentro de las palas con una presión menor de la que existe alrededor, esto dio como ventaja aumentar la eficiencia de la pala al poder recolectar mayor cantidad de energía cinética, el principio básico aplica de la misma manera, reducir la presión y disminuir el ruido, consecuentemente aumentar la velocidad en el eje de rotación del aerogenerador, como lo ejemplifica la figura 34.



Figura 34. Simulación del efecto Venturi.

Herramienta área centroide, calcula la posición del centroide⁸ de la pieza



Figura 35. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado de análisis con herramienta "centroide".

⁸ Centro de masa de un objeto con densidad uniforme.

Zebra, el comando zebra despliega una serie de líneas estriadas sobre la superficie indicando si existe posición, tangencia o curvatura sobre las superficies (figura 36).

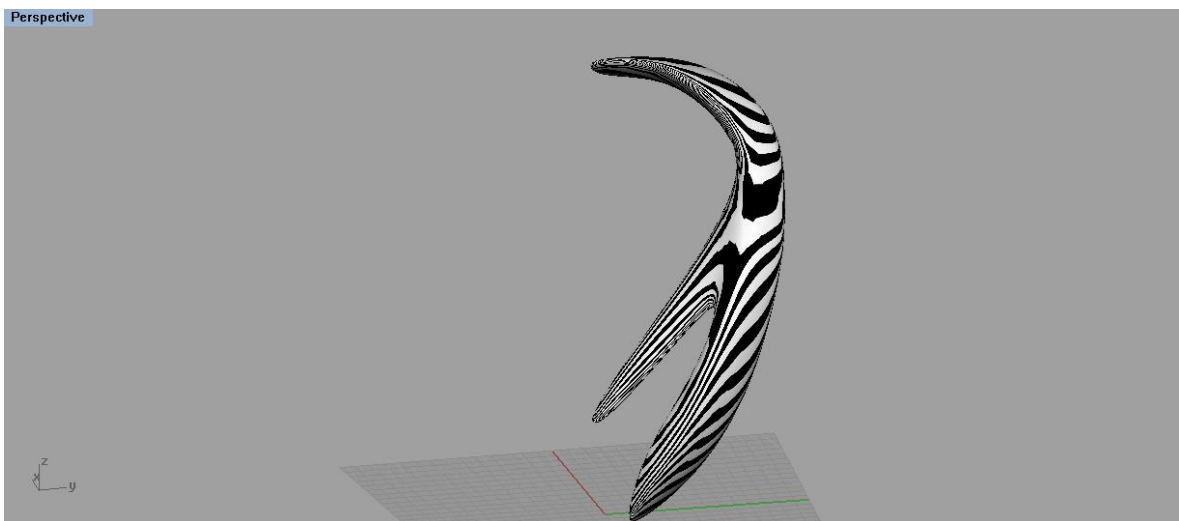
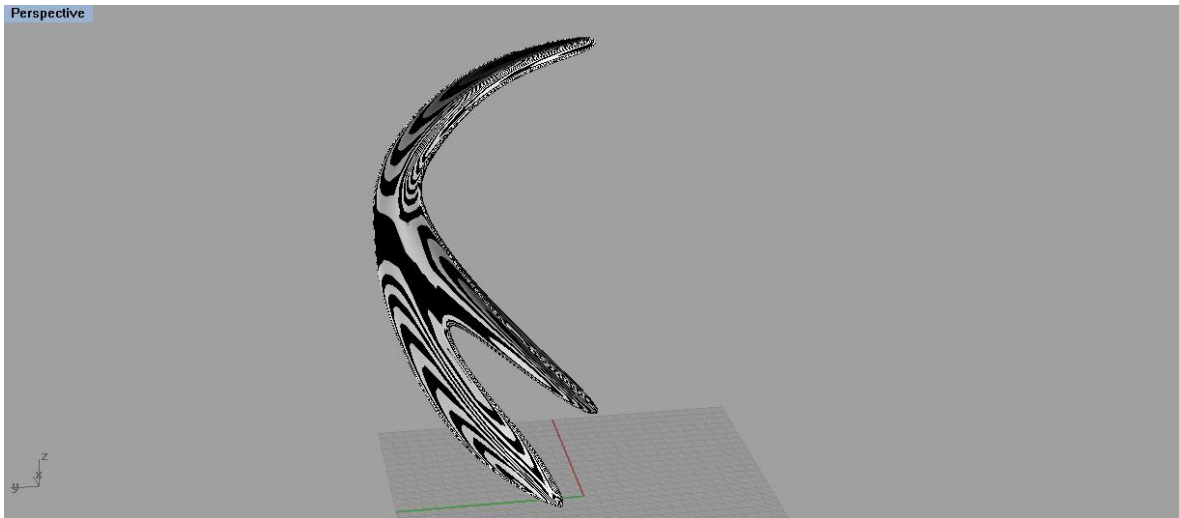


Figura 36. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el resultado de análisis con herramienta “zebra”.

Modelo matemático usado

El primer paso para estimar las medidas y proporciones de las palas es calcular la energía cinética disponible.

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m_{aire} V^2$$

E_{cin} = energía cinética en Watts

m_{aire} = masa de aire en Kilogramos

V = velocidad del viento en m/seg

La masa de aire se puede calcular de la siguiente manera:

$$m_{aire} = \rho \cdot s$$

ρ = densidad del aire (por sentidos prácticos se usó $1.225 \frac{kg}{m^3}$, que es la densidad del aire a $15^{\circ} C$)

s = superficie de contacto viento con la pala, en metros cuadrados (se empleó la superficie de solo una de las tres palas $0.675 m^2$, dato arrojado por el programa Rhinoceros)

Sustituyendo datos y fórmulas la ecuación general quedó de la siguiente manera: densidad de viento $1.225 kg/m^3$, velocidad del viento de $6.11 m/s$ y una superficie de contacto de $0.675 m^2$

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \rho \cdot s V^2$$
$$= (1.225 \frac{kg}{m^3}) \frac{(1.225 \frac{kg}{m^3} | 0.675 m^2 | (6.11 \frac{m}{s})^3)}{2}$$

La energía cinética disponible es de 94.304 Watts

Luego por efecto de límite de Betz (léase página 37)

Se tiene que la energía cinética captada tiene un tope máximo del %59 de la energía cinética disponible por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 P_{captada} &= (0.59) (P_{disponible}) \\
 &= (0.59) (94.304) \\
 &= 55.6396
 \end{aligned}$$

Este resultado corresponde al límite teórico ideal, ya que no contempla los factores reales de operación como lo son la resistencia, compresibilidad e interferencia del viento.

Existe también, un término de aproximación llamado “Rugosidad”, que es la cuantificación del efecto morfológico del terreno alrededor del aerogenerador (Tabla 9), y factor dependiendo de la distancia en la que ejerce influencia (Tabla 10) expresado en la siguiente fórmula:

$$V(z) = v_{ref} \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)}$$

Donde:

z = altura desde el suelo

v_{ref} = velocidad medida a una altura z_{ref}

z_0 = longitud de la rugosidad

Tabla 9. Relación rugosidad y paisaje.

Clase de rugosidad	Tipo de paisaje
0	Superficie del agua
0.5	Terreno completamente abierto con una superficie lisa
1	Agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos
1.5	Agrícola abierta sin cercados ni setos y sin edificios (dist. 1250 m.)
2	Agrícola con algunas casas y setos (dist. 500 m.)
2.5	Agrícola con muchas casas, arbustos y plantas (dist. 250 m.)
3	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola
3.5	Ciudades más grandes con edificios altos
4	Ciudades muy grandes con edificios muy altos y rascacielos

Tabla 10. Rugosidad e índice de energía.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad (m)	Índice de energía (%)
0	0.0002	100
0.5	0.0024	73
1	0.03	52
1.5	0.055	45
2	0.1	39
2.5	0.2	31
3	0.4	24
3.5	0.8	18
4	1.6	13

Sustituyendo los valores en la fórmula se obtiene

$$V(z) = 6.11 \cdot \frac{\ln(5/.1)}{\ln(2.5/.1)}$$

V ref = dato tomado de la estación meteorológica

$$Z_0 = .1$$

El resultado final para el valor real estimado es

$$7.49975 \frac{m}{s}$$

Como se observó en fórmulas anteriores no se puede transformar toda la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, pero la eficiencia de un sistema completo de aerogenerador se puede estimar, mientras más factores se calculen, más acercada será la estimación, por ejemplo: pérdidas por rozamiento mecánico de tren de engranes, pérdida de eficiencia de batería etc.

Coeficiente de poder

$$C_p = \frac{P_t}{P}$$

Donde

P_t = energía extraída total

P = energía cinética disponible, después de los factores de pérdida, ejemplo límite de Betz.

En el presente trabajo se utilizó para calcular las RPM del generador eléctrico un tren de engranes con factor 1:11, con una pérdida por rozamiento del 5%, lo que significa que por cada revolución obtenida por parte de las palas habrá 11 revoluciones del generador eléctrico, las mediciones de temperatura y humedad arrojaron una energía cinética disponible de 55.63 watts, y 28 RPM de las palas, por lo que las RPM del generador serán 308.

De acuerdo a la figura 23 del catálogo del generador eléctrico son necesarios 28 n/m para generar ese movimiento, tomando en cuenta la conversión de valores

Watt = Nm/s,

Se sabe que se cuenta con suficiente energía cinética disponible para generar ese torque necesario sobre el generador eléctrico.

Cálculo del TSR

$$\text{Tip Speed Ratio} = \lambda = \frac{v}{v} = \frac{\omega r}{v}$$

Sustituyendo los datos la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$Tsr = \frac{(2 \pi 5.13)(0.85 m.)}{6.11 m/s}$$

La frecuencia obtenida según las mediciones, se multiplicó por 11, por lo tanto

$$28 \text{ rpm} \times 11 = 308 \text{ rpm}$$

$$308 \text{ rpm} / 60 = 5.3 \text{ Hz}$$

$$TSR = 5.30$$

Ideal dentro del rango de Darrieus de tres palas de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 11. Descripción general de los distintos aerogeneradores. Fuente: (N.S. Çetin, 2005).

Tipo de aerogenerador	Velocidad de operación	Torque	Complejidad constructiva	C_p	Robustez en %
Eje horizontal					
De moderadas RPM	Moderada	Bajo	Moderada	0.2 – 0.35	5 – 10
De altas RPM	Alta	Muy bajo	De precisión	0.3 – 0.45	< 5
Eje vertical					
Panemono	Baja	Medio	En bruto	>0.1	50
Savonius	Moderada	Medio	Moderada	0.15	100
Darrieus	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.25 – 0.35	10 - 20
Geometría variable	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.2 – 0.35	15 - 40

Prototipo final

El tercer prototipo fabricado se enfocó en dar mayor superficie de arrastre, y tener mecanismos que ayuden a disipar la vibración, por lo que a partir de la metodología de diseño se seleccionó una familia de la clasificación Darrieus, se modificó con ayuda de herramienta de diseño paramétrico (plugin grasshopper para rhinoceros) para obtener la mejor configuración posible en cuanto a proporciones y superficies, pero conservando la misma estética y características funcionales como se muestra a continuación:

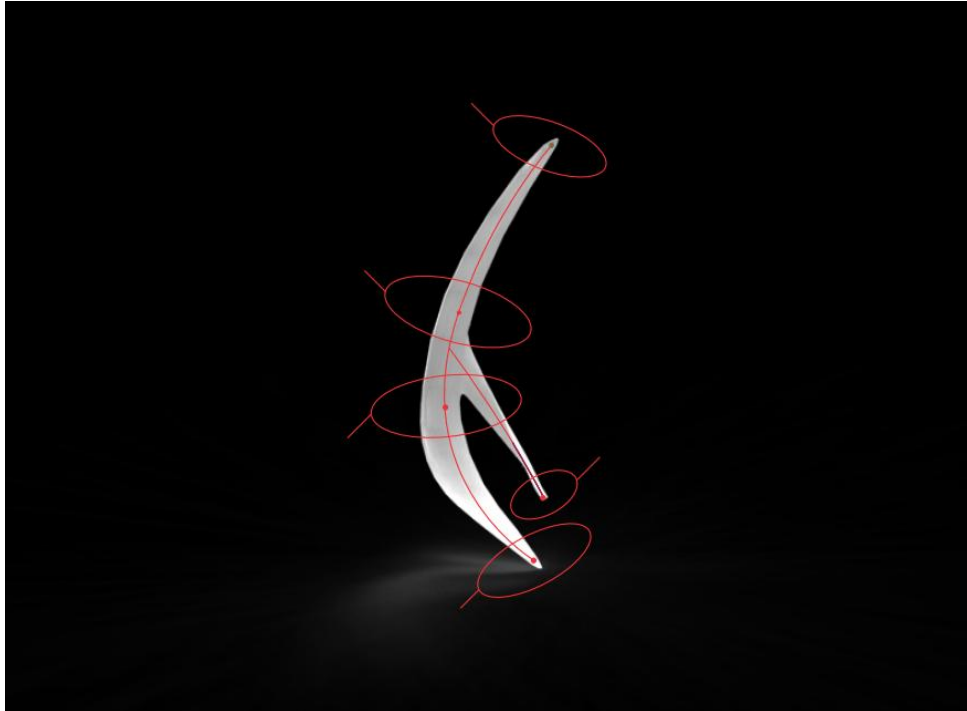


Figura 37. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando los puntos de la superficie parametrizada.

En la figura anterior se muestran los puntos sobre los cuales se tuvo control de posición y ángulo, para modificarla.

El resultado final obtenido se muestra en la figura 38, se tiene una configuración optimizada, con las características antes mencionadas a partir de una superficie parametrizada.

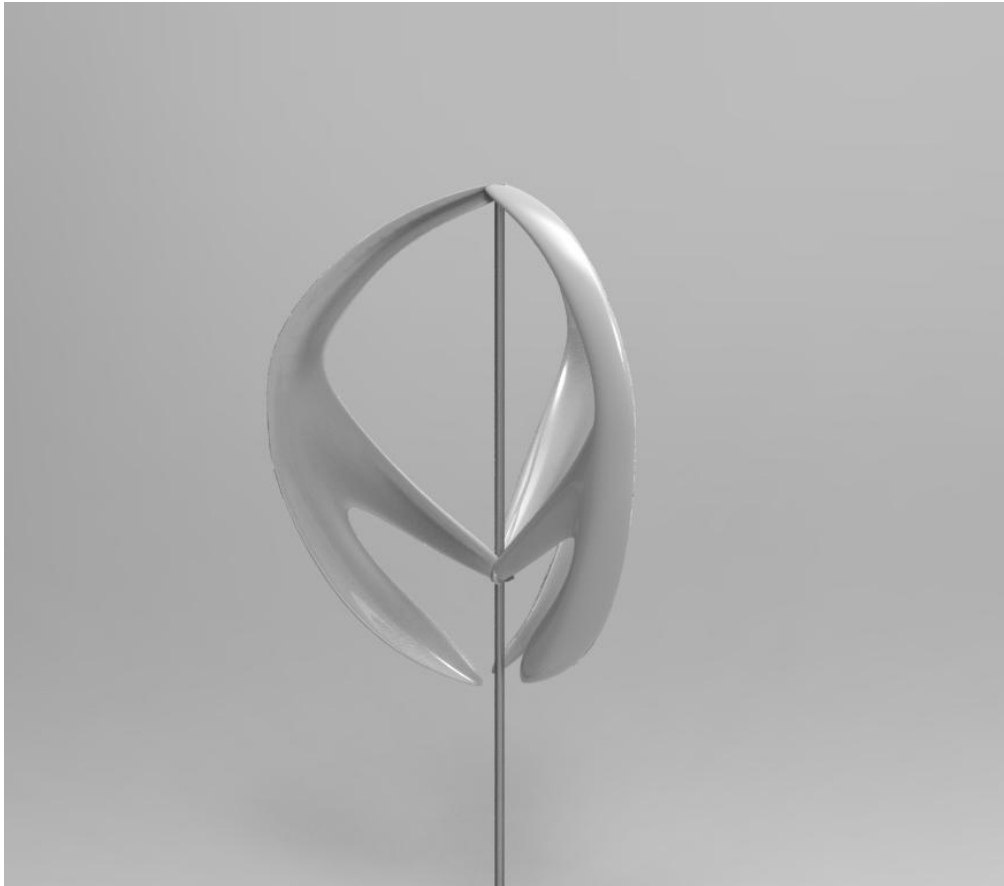


Figura 38. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el ensamble de tres palas con la mejor configuración de los parámetros, arrojados por el plug-in Grasshopper.

El proceso de fabricación seleccionado es fabricación de molde en fibra de vidrio a partir de matriz en espuma de poliuretano, y la fabricación de palas en fibra de vidrio con recubrimiento de resina epóxica con filtro uv.

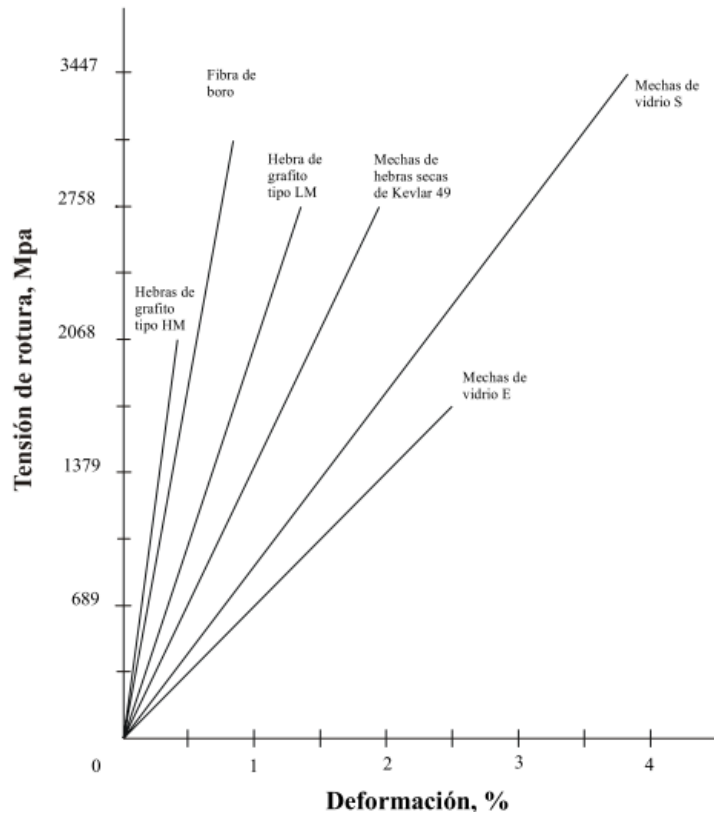


Figura 39. Comportamiento esfuerzo-deformación de varios tipos de fibras reforzantes (Peters, 1991).

Se ha seleccionado la opción de resina con fibra de vidrio, por viabilidad económica, y porque presenta mayor resistencia la fatiga causada por vibraciones estructurales (Figura 39) que la mayoría de los plásticos, encontrándose solo por debajo de plásticos reforzados con diferentes fibras (Tabla 12).

Tabla 12. Propiedades comparativas de algunas fibras de refuerzo de plásticos,
(Smith, 2003).

Propiedad	Vidrio E (HTS)	Carbono (HT)	Aramida (Kevlar 49)
Tensión de rotura MPa	2419	3100	3617
Módulo de tensión GPa	69	220	124
Alargamiento a la rotura %	3.5	1.4	2.5
Densidad Kg/m ³	2.54	1.75	1.48

Las fibras de vidrio se usan principalmente en el refuerzo de matrices plásticas para formar compuestos estructurados y productos moldeados.

Los materiales compuestos de resina y fibra de vidrio tienen entre otras las siguientes características: buena relación resistencia peso, buena estabilidad dimensional, buena resistencia al calor, al frío, y a la humedad, aislantes de la electricidad y relativamente baratos en baja producción.

Es un proceso de fabricación ideal en el plano económico para series de producción desde 20 piezas hasta 1000 piezas. Con la flexibilidad de que el costo por molde es relativamente bajo y no se requiere de prensas especiales para realizar ensambles.

El método de producción se describe a continuación paso por paso, justificando la selección del material y el proceso.

Una vez que se tiene la mejor combinación posible diseñada en el programa, se utiliza una herramienta que calcula los planos seriados de un objeto 3d, en este caso, calcula cada diez centímetros perpendicular al eje z y paralelo al plano x y, como se muestra en la figura 40.

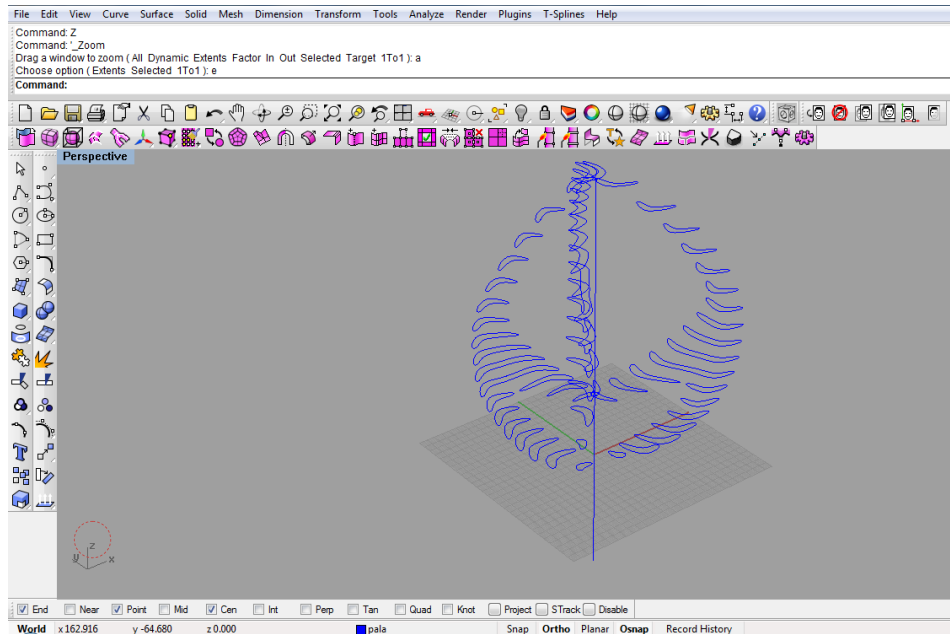


Figura 40. Captura de pantalla de Rhinoceros S.R. 8, mostrando el uso de la herramienta “contour”

Se imprimieron dos de estos perfiles por hoja, en escala real, con un punto de referencia.

Posteriormente se colocó cada plano sobre un cubo de espuma de poliuretano de diez centímetros de alto, y se devastó hasta obtener la forma deseada.

Se unió cada bloque de espuma de poliuretano con ayuda del punto de referencia impreso anteriormente.

Una vez unidos todos los bloques de espuma de poliuretano, se colocó sobre toda la superficie pasta automotriz, para soldar las uniones (La pasta automotriz además de soldar los bloques de espuma sirve para formar una capa de aislante térmico entre la espuma y las siguientes capas de fibra de vidrio), hasta que se obtiene una pieza como la que se muestra en la figura 41.



Figura 41. Matriz de molde inicial, en espuma de poliuretano y pasta automotriz.

La espuma de poliuretano se considera un material estructuralmente inestable, por lo que se debe de cubrir con una capa de fibra de vidrio para poder utilizar el resultado como matriz de molde. (Figura 42)



Figura 42. Matriz de molde inicial, en espuma de poliuretano y pasta automotriz, recubierta con fibra de vidrio.

La superficie obtenida con la fibra de vidrio se rellena con una mezcla de pasta automotriz y talco industrial, ya que cualquier irregularidad podría generar negativos en el proceso de desmoldeo (Figura 43)



Figura 43. Matriz de molde inicial, recubierta con talco industrial.

Después se encera una parte de la matriz sobre la cual se va a fabricar la primera parte del molde, para facilitar su desmoldeo.

Una vez teniendo la matriz de molde fabricada, se procede a delinear la línea de partición, este perfil tiene la función de dar rigidez al molde.



Figura 44. Primera capa de molde, con borde reforzado y aplicación de poliéster isoftálico.

A la superficie de la matriz se le aplico una capa de resina de poliestireno isoftálico con el fin de convertirse en la capa exterior de las paredes de los moldes y al mismo tiempo ser el filtro uv.

Las pestañas se fabricaron con puntos que ayudan al desmoldeo como se muestra en la figuras 45 a 47.



Figura 45. Primera capa de molde con recubrimiento vista 1.



Figura 46. Primera capa de molde, con puntos de desmoldeo vista 2.



Figura 47. Parte superior del molde de la pala terminado.

Este proceso se repite sobre ambos lados de la línea de partición.

Sobre la capa de poliéster isoftálico se colocan capas de fibra de vidrio con resina poliéster (Figura 46).



Figura 48. Molde completo de fibra de vidrio.

Una vez obtenido las dos partes del molde con el ángulo de salida correcto, se procede a fabricar las piezas, colocando los herrajes de acero inoxidable en posición y uniendo las dos partes de la cada pala.

Fabricada la matriz de molde en fibra de vidrio, esta puede ser duplicada de manera rápida para poder fabricar mas moldes.

Esta metodología es comúnmente usada en procesos de diseño, especialmente cuando se requiere fabricar formas orgánicas complejas a partir de una representación matemática precisa.

CAPÍTULO IV

Pruebas y resultados

El último prototipo fabricado es de tipo Darrieus, el resultado obtenido es el siguiente:

Se instaló una base fabricada en perfil cuadrado de acero, de 4 cm x 3 milímetros de espesor de pared (con un peso estimado de 3.30 kg por cada metro), a una altura total de 6.5 metros (Figura 49)



Figura 49. Instalación de la estructura base para el aerogenerador.

Posteriormente se colocó el generador eléctrico y las palas.



Figura 50. Instalación completa del aerogenerador, vista 1.



Figura 51. Instalación completa del aerogenerador, vista 2.







Figura 52. Instalación completa del aerogenerador, vista 3.

Análisis de resultados.

Se realizó la misma prueba sobre el prototipo final obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13. Desempeño del prototipo final puesto a prueba.

	Fijo 	Movimiento ideal 	vibración 
	Revoluciones por minuto $\pm 1/24$ seg.	Segundo de reproducción	Segundos en ese estado
	18	0 - 15	15
	26.81	15 - 45	30
	24	45 - 55	10
	28	55 - 70	20
	23	70 - 78	8

El prototipo final tiene las siguientes características:

Tabla 14. Características generales del prototipo final.

Material de palas	Fibra de vidrio con resina de poliéster y recubrimiento de poliéster isoftálico, con pintura blanca
Peso por pala	9 kilos
Peso total	32 kilos
Superficie de barrido por pala	.675 m ²
Superficie de barrido total	2.025 m ²

En las secciones anteriores se listaron los problemas relacionados con la eficiencia de un sistema aerogenerador , y de acuerdo al modelo matemático usado, el resultado que arrojó el prototipo esta dentro de lo esperado,

Si se comparan los resultados obtenidos de los dos prototipos anteriores con el del prototipo de la familia Darrieus, se concluye lo siguiente:

- Existen periodos prolongados con la misma velocidad
- No existe ruido intermitente, solo el originado por las uniones metálicas.
- La velocidad máxima alcanzada en estas pruebas fue de 26.8 RPM.
- No existen movimientos vibratorios gracias al vacio que hay en la parte más baja del aerogenerador.
- Una vez que se rompe la inercia necesaria para mover el generador eléctrico, este puede seguir en movimiento gracias al peso de las palas.

Aun así, al no tener resultados como los de los aerogeneradores de eje vertical de parques eólicos, este prototipo busca un enfoque distinto, orientado a la operación con vientos de baja intensidad, de bajo costo y de fácil instalación.

La experiencia adquirida trabajando en la implementación de este prototipo otorga una visión mas amplia sobre la explotación eólica y sus principales desafíos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Con la configuración final se corrió una prueba de campo en el municipio de El Marqués campus UAQ Amazcala, Querétaro a una altura de 6.5 metros a nivel del piso, esta última prueba de campo se asemeja a construcciones urbanas y posibles puntos de instalación de un proyecto comercial. Los resultados mostraron que bajo estas condiciones, se aprovecha mejor el recurso eólico cuando se usa la inercia a favor, incluso aumentando el peso de la estructura, al mismo tiempo que se aumenta la superficie de arrastre con el viento, por lo tanto el diseño del aerogenerador con tres palas, superficie de contacto de 2.025m³, con 26 kilos (palas y eje), es considerado el adecuado para este caso específico, de esta manera se comprobó que la fibra de vidrio representa un material idóneo para la construcción estructural de un aerogenerador de eje vertical, adicionalmente con los resultados obtenidos se recomienda su uso en proyectos como invernaderos, por el requerimiento energético similar al de una casa, y en espacios alternativos que formen túneles de viento, como lo son carreteras, donde gracias a la capacidad de obtener energía a partir de un viento que cambia de dirección, se logra una alta eficiencia.

La experiencia adquirida en el presente trabajo gracias al diseño e instalación del aerogenerador, brindó una visión más clara sobre este importante recurso de energía y de sus retos.

LITERATURA CITADA

Alianza para la prosperidad y la Seguridad y de América del Norte. (2010).

<http://www.aspan.fox.presidencia.gob.mx/>

Alianza para la prosperidad y la seguridad de América del Norte. (Agosto de 2010). *aspan.gob.mx*.

http://www.oecd.org/home/0,2987,en_2649_201185_1_1_1_1_1,00.html

Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2010). *2010 Wind Energy Status in Mexico-GWE*. México D.F.: WSI.

Asociación Mexicana de Energía Eólica. (s.f.). *www.amdee.org*. el 10 de Agosto de 2010, de

http://www.amdee.org/Recursos/Proyectos_en_Mexico

Betz, A. (1946). *Hydro and aerodinamics*. German: Central Air Documents Office, 1950.

Comisión Federal de Electricidad . (2008). *Informe de Sustentabilidad 2008*.

Comisión Reguladora de Energía. (1993). *LEY DEL SERVICIO PÚBLICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA*.

México D.F.

Comisión Reguladora de Energía. *Permisos administrados vigentes al 31 de agosto del 2011*.

Comisión Reguladora de Energía. (2011). *TABLA DE PERMISOS DE GENERACIÓN E IMPORTACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ADMINISTRADOS AL 31 DE AGOSTO DE 2011*.

D. Spitzley univ, of Michigan Center for Sustainable systems . (2010). *Electricity from renewable energy*. NAS.

Francisco - Piña J. Alejandro, M.-L. J.-A.-R.-V. (s.f.). Panorama general de uso de aerogeneradores como una alternativa para la generación de energía eléctrica.

<http://www.concyteq.edu.mx/nthe1/pdfs/Nthe%201.pdf> .

Global environment Fund. (2011). *Global Environment Fund*. Retrieved julio 8, 2011, from

Renewable Energy Investment oportunities in emerging markets:

<http://www.globalenvironmentfund.com/>

Herrera - Sánchez, O., Wolfgang, S., & González - Fernandes, V. (2010). Modelo de análisis de cargas máximas en aerogeneradores producidas por vientos extremos. *Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio* .

Institute for the study of society and environment. (2008, abril). <http://www.isse.ucar>. Retrieved

Julio 18, 2010, from <http://www.isse.ucar.edu/publications.php>

Instituto Nacional de Ecología. (Junio de 2005). <http://www2.ine.gob.mx>. Recuperado el 18 de

Junio de 2011, de <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/489/inventario.pdf>

Instituto nacional de Ecología. (Septiembre de 2006). *www.ine.gob.mx*. Recuperado el 8 de Enero de 2011, de <http://www.ine.gob.mx/cpcc-lineas/640-cpcc-inventario-3>:
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/489/inventario.pdf>

International Energy Agency. (2008). <http://www.worldenergyoutlook.org/>. Retrieved Agosto 10, 2010, from <http://www.worldenergyoutlook.org/>

International Energy Agency. (2010). *Renewables in global energy supply*.

International Energy Agency. (2009). *World Outlook Energy*.

Magella Guillemette, J. K. (1998, march). Impact assesment of an off-shore wind park on sea ducks. (227) . (K. Laursen, Ed.) Ministry of Environmental Research Energy.

N.S. Çetin, M. Y. (2005). *Assessment of optimun tip speed ratio of wind turbines*. U.S.A.: Association for Scientific Research.

Naciones Unidas. *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Naciones Unidas.

Naciones Unidas. (1992). *Report of the united nations conference on environment and development*. Rio de Janeiro: United Nations.

National Renewable Energy Laboratory. (2011). <http://www.nrel.gov>.
http://www.nrel.gov/analysis/pubs_wind.html

National Renewable Energy Laboratory. (2011). *Innovative feed in Tariff designs that limit policy costs*. NREL/TP-6A20-50225: technical report.

Organización Latinoamericana de Energía. (s.f.). *OLADE*. Recuperado el 16 de Agosto de 2010, de <http://www.olade.org>

Organizarion for Evonomic and Co - Operation Development. (2010, Agosto). *www.oecd.org*. Retrieved from http://www.oecd.org/home/0,2987,en_2649_201185_1_1_1_1_1,00.html

Organization for economic and Co - operation development. (s.f.). Recuperado el 13 de Agosto de 2010, de http://www.oecd.org/home/0,2987,en_2649_201185_1_1_1_1_1,00.html

Peters, S. T. (1991). *Filament Winding Composite Structure Fabrication* . SAMPLE.

Roukes, N. *Design Synectics: Stimulating Creativity in Design*.

Ryan Wiser, M. B. (2008). *2008 Wind Technologies Market Report*.

Secretaría de Energía. (2005). *Una visión al 2030 de la utilización de las energías renovables en México*. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.

Sistema de información energética. (s.f.). 18 de Agosto de 2010, de <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController>

Smith, W. (2003). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. McGraw - Hill, Inc.

Universidad Autónoma Metropolitana. (2005). *Una visión al 2030 de la utilización de las energías renovables en México*. Mexico, D.F.

World Wind Energy Association. (s.f.). <http://www.wwindea.org>. 20 de Julio de 2010, de http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=13&Itemid=80

World Energy Assessment . (1981). *Report of the intl. geothermal association to the U.N, commission on sustainable development 2001; Journal of geophysical research 86*. NASA.

World Energy Association. (2011). *Wind Energy is locomotive of the changing energy supply system worldwide*. Wind Energy International.

World Resource Institute. (n.d.). <http://www.wri.org>. Julio 10, 2010, from <http://www.wri.org/publications/climate>

World Wind Energy Association. (2010). *yearbook 2009/2010*. Wind Energy International.

APENDICE A

Datos climáticos usados

day	hour	Hi temp	low temp	out hum	wind speed	wind dir	wind run	hi speed	hi dir	heat index	bar
11.8	2.2	SSE	0.67	4.9	25.3	24.9	24.9	28.5	1011	0	1025
16/07/2009	02:05 p.m.	25.3	25.3	25.3	11.4	1.8	SSE	0.54	5.4	25.3	28.7
16/07/2009	02:10 p.m.	25.4	25.4	25.4	11.9	0.9	N	0.27	2.7	25.4	26.1
16/07/2009	02:15 p.m.	25.3	25.4	25.3	12.5	0.9	N	0.27	2.2	25.3	30.9
16/07/2009	02:20 p.m.	25.7	25.9	25.4	11.4	0.4	W	0.13	1.8	25.7	29.3
16/07/2009	02:25 p.m.	25.9	25.9	25.9	10.1	0.9	SW	0.27	2.2	25.9	26.4
16/07/2009	02:30 p.m.	25.9	25.9	25.9	10.5	1.8	S	0.54	3.1	25.9	30.3
16/07/2009	02:35 p.m.	26.2	26.5	25.9	8.7	1.8	SE	0.54	4	26.2	29.4
16/07/2009	02:40 p.m.	26.6	26.7	26.5	10.7	1.3	ESE	0.4	3.1	26.6	31.6
16/07/2009	02:45 p.m.	26.7	26.8	26.6	11.6	2.7	NE	0.8	6.7	26.7	30.3
16/07/2009	02:50 p.m.	26.7	26.7	26.7	9.5	2.2	NE	0.67	5.8	26.7	30
16/07/2009	02:55 p.m.	26.8	26.9	26.7	9.6	1.3	NNE	0.4	4	26.8	30.2