



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**



**Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en  
Cómputo**

**MODELADO COMPUTACIONAL DE UN GENERADOR  
EÓLICO BASADO EN UNA TURBINA SAVONIUS  
MODIFICADA**

**Tesis**

**Para obtener el grado de  
Maestría en tecnología de cómputo**

**Presenta**

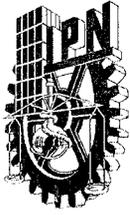
**Alexander Sánchez Sibaja**

**Directores**

**M. en C. Jesús Antonio Álvarez Cedillo**

**Dr. Mauricio Olguín Carbajal**

**Diciembre 2011.**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 11:35 horas del día 6 del mes de diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del CIDETEC para examinar la tesis titulada:

"MODELADO COMPUTACIONAL DE UN GENERADOR EÓLICO BASADO EN UNA TURBINA SAVONIUS MODIFICADA"

Presentada por el alumno:

SÁNCHEZ  
Apellido paterno

SIBAJA  
Apellido materno

ALEXANDER  
Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	3	8	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Tecnología de Cómputo

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA  
Directores de tesis

M. EN C. JESÚS ANTONIO ÁLVAREZ  
CEDILLO  
Primer Vocal

DR. MAURICIO OLGUÍN CARBAJAL  
Segundo Vocal

DR. JUAN CARLOS HERRERA LOZADA  
Presidente

M. EN C. ISRAEL RIVERA ZÁRATE  
Secretario

M. EN C. MIGUEL HERNÁNDEZ  
BOLAÑOS  
Tercer Vocal

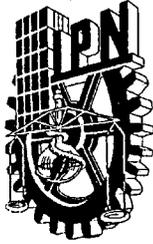
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE  
PROFESORES

DR. VÍCTOR MANUEL SILVA GARCÍA



S. E. P.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO EN COMPUTO



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D.F. el día 13 del mes Diciembre del año 2011, el (la) que suscribe Alexander Sánchez Sibaja alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología de Cómputo con número de registro B091388, adscrito a CIDETEC, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M. en C. Jesús Antonio Álvarez Cedillo y Dr. Mauricio Olguín Carbajal y cede los derechos del trabajo intitulado “Modelado computacional de un generador eólico basado en una turbina Savonius modificada”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [cinci\\_1985@hotmail.com](mailto:cinci_1985@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Alexander Sánchez Sibaja

Nombre y firma

A DIOS:

Por permitirme llegar hasta aquí y acompañarme en toda mi vida.

A mis padres:

A Nereyda y Rosalino, por todo el cariño, amor y comprensión que siempre han tenido para mí, por su apoyo incondicional en cada uno de los momentos de mi vida, y por darme las bases y valores para siempre seguir adelante.

A mis hermanos:

Esaú, Eliud y a Adiel Sánchez Sibaja por brindarme su apoyo en todo momento sin necesidad de pedirlo

A mi Esposa:

A ti, Maria de los Ángeles Pinacho Albino, por tu apoyo y motivación, con el cual pude reponerme en momentos difíciles y por ayudarme a alcanzar el día de hoy uno de mis grandes sueños.

A mi hijo:

A ti Alexander porque me has motivado a volver a vivir, a tener esperanza y soñar en tener un mejor futuro para ti.

Al Instituto Politécnico Nacional:

Por ser la Institución que me abrió las puertas, me formó y me da el pán de cada día y por compartir conmigo la grandeza y orgullo de ser politécnico.

A Mis directores de tesis:

Jesús Antonio Álvarez Cedillo y Mauricio Olguín Carbajal por un regaño ganado, un consejo a tiempo y por preocuparse por que todo funcionara y que este trabajo llegara a buen término.

## **Resumen:**

Debido al incremento en el interés hacia la aplicación de las energías renovables, la energía eólica ha tenido un aumento en la atención prestada por los investigadores. Se han realizado estudios con la finalidad de mejorar el rendimiento aerodinámico de las turbinas verticales tales como la turbina Darrieus y la Savonius, de tal forma que en esta investigación se realiza un análisis computacional de la incidencia del viento sobre diferentes configuraciones geométricas propuestas y estudiadas previamente. Las dimensiones de las turbinas se adecúan a las relaciones geométricas anteriormente analizadas y propuestas, de tal manera que se respete el perfil original de cada turbina. El tamaño de cada turbina es en realidad pequeño, ya que se propone su aplicación para la generación de energía a baja potencia en arreglos que puedan ser colocados sobre dispositivos móviles aprovechando así la energía que el viento ofrece debido a la resistencia al desplazamiento del móvil. Se concluye que el arreglo de turbinas Savonius torcidas presenta mejor comportamiento con respecto al análisis de flujo realizado, sin embargo, desde el punto de vista de manufactura este tipo de turbina es la que presenta mayor complejidad para su construcción. A futuro se pretende implementar esta propuesta sobre dispositivos móviles tales como autos de radio-control, y automóviles, los cuales requieren de un suministro de energía eléctrica.

## **Abstract:**

Increasing interest towards the application of renewable energy, wind power has been increased attention by researchers. Studies have been conducted in order to improve the aerodynamic performance of vertical turbines such as turbine *Darrieus* and turbine *Savonius*, in this investigation is shown how is provides a computational analysis of the impact of wind on various geometric configurations proposed and studied previously. The dimensions of the turbines are adapted to the geometric relationships previously analyzed and proposed in such a way that respects the original profile of each turbine. The size of each turbine is actually small, since it proposes its application for power generation at low power in arrays that can be placed on mobile devices taking advantage of the wind energy due to the resistance offered to the displacement of the mobile. We conclude that the twisted Savonius turbine arrangement has better performance with respect to the flow analysis performed, however, from the point of view this type of turbine manufacturing is the one with more complexity in its construction. In the future we intend to implement this proposal on mobile devices such as radio control cars, and cars, which require a power supply.

# Índice General

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes de la energía eólica.....	1
1.2. Objetivos del trabajo.....	8
1.2.1. Objetivo general.....	8
1.2.2. Objetivos particulares.....	8
1.3. Justificación .....	9
1.4. Organización de la tesis.....	9
<b>2. Las energías renovables</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción.....	11
2.2. La energía solar .....	14
2.3. La energía eólica.....	18
2.4. La energía hidráulica.....	25
2.5. La energía geotérmica .....	26
2.6. La energía de la BIOMASA.....	28
<b>3. Análisis de los diferentes tipos de turbinas de viento</b>	<b>30</b>
3.1. Introducción.....	30
3.2. Turbinas de viento de eje horizontal.....	31
3.3. Turbinas de viento de eje vertical .....	36
3.3.1. Turbina Savonius.....	37
<b>4. Modelado computacional para crear un generador eléctrico</b>	<b>45</b>
4.1. Modelado matemático de la energía cinética del viento .....	45
4.2. Modelado computacional dinámico.....	48
4.3. Proceso de manufactura y pruebas experimentales del módulo de turbinas Savonius torcidas.....	57
4.3.1. Ensamblaje del módulo de aerogeneradores con turbinas Savonius.....	59
4.3.2. Pruebas experimentales.....	61
4.3.3. Resultados .....	63
<b>5. Conclusiones y trabajos a futuro</b>	<b>70</b>
5.1. Conclusiones.....	70
5.2. Trabajos a futuro .....	73
<b>Referencias .....</b>	<b>76</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>80</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>88</b>

## Índice de figuras

1.1.	Panémona china de eje vertical utilizada para el bombeo de agua .....	3
1.2.	Molino Persa de eje vertical utilizado para moler granos .....	3
1.3.	Molino de vela montado sobre trípode, utilizado en la isla de creta para bombear agua .....	4
1.4.	Molino manchego sobre una torre construida con piedra y adobe .....	5
1.5.	Aerogenerador Jacobs de 1kW.....	6
2.1	Balance de energía eléctrica en México hasta el 2009 .....	13
2.2	Formas de captación de la energía solar.....	14
2.3	Diferente efecto del voladizo en verano.....	15
2.4	Diferentes formas de aprovechamiento solar térmico .....	16
2.5	Proceso de fabricación de las celdas fotovoltaicas y su aplicación .....	17
2.6	Radiación Solar media estacional en México .....	18
2.7	Aerogenerador Smith-Putman de 1.25 MW USA .....	20
2.8	Aerogenerador experimental MOD-0A de 200kW .....	22
2.9	Aerogenerador MOD-1 .....	22
2.10	Aerogenerador experimental MOD-2 de 2.5 MW .....	23
2.11	Evolución histórica de la capacidad eólica mundial 1996-2009 .....	24
2.12	Producción de energía eólica real anual en México .....	24
2.13	Producción de hidroenergía real anual en México .....	26
2.14	Producción de geoenergía real anual en México .....	27
2.15	Producción de la energía real anual en México extraída del bagazo de la caña .....	29
3.1	Rendimiento Aerodinámico .....	32
3.2	Diferentes configuraciones de turbinas de viento de eje horizontal .....	32
3.3	Clasificación de aerogeneradores por su tamaño o capacidad.....	33
3.4	Partes básicas de una turbina de eje horizontal .....	34
3.5	Rotor y estela, en un caso con viento de frente.....	35
3.6	Turbina de viento dual .....	36
3.7	Turbinas de viento de eje vertical.....	37
3.8	Coeficiente de torque calculado estáticamente .....	38
3.9	Geometría de las turbinas de prueba.....	39
3.10	Diagrama esquemático de las tres etapas desarrolladas para las dos turbinas analizadas en [25].....	40
3.11	Configuraciones de las siete diferentes turbinas Savonius .....	41
3.12	Sección de prueba experimental utilizada en [26] .....	41
3.13	Patrones de flujo hidráulico sobre las turbinas Savonius .....	42
3.14	Turbina Savonius modificada sin flecha y sus parámetros geométricos .....	43
3.15	Vista media de la turbina Savonius torcida analizada en [8].....	44

4.1	Perfil y relaciones geométricas por M.A. Kamoji et. Al.....	49
4.2	Perfil y relaciones geométricas por J.L. Menet et. Al .....	49
4.3	Modelos 3D de la turbinas Savonius propuestas .....	50
4.4	Turbina Savonius con flecha torcida sobre su propio eje.....	51
4.5	Disposición de la turbina Savonius torcida en el túnel de viento para su análisis.....	52
4.6	Comportamiento del flujo incidente en cada una de las turbinas Savonius analizadas.....	53
4.7	Comportamiento del viento incidente sobre las diferentes turbinas Savonius en distintas posiciones .....	54
4.8	Comparación del comportamiento de los módulos de turbinas Savonius .....	55
4.9	Modelo 3D del módulo de turbinas Savonius torcidas .....	56
4.10	Explosionado del molde para turbina Savonius sencilla .....	57
4.11	Impresora 3D MJM multijet modeling .....	58
4.12	Turbina Savonius torcida construida.....	59
4.13	Micromotor de CD utilizado como generador de corriente .....	60
4.14	Módulo de aerogeneradores con turbinas Savonius torcidas .....	60
4.15	Modelo en CAD del túnel de viento.....	61
4.16	Construcción del túnel de viento .....	62
4.17	Anemómetro LA CROSSE utilizado en las pruebas experimentales.....	63
4.18	Comportamiento experimental del flujo de viento incidente en el módulo de turbinas Savonius torcidas .....	64
4.19	Voltaje generado con respecto a la velocidad lineal del viento incidente sobre el módulo de microturbinas Savonius.....	65
4.20	Montaje de la bomba de aire con el túnel de viento .....	66
4.21	Primera conexión del módulo de aerogeneradores con una lámpara de 9 Leds como carga eléctrica del sistema.....	66
4.22	Equipos de medición ocupados en la adquisición de datos.....	67
4.23	Comportamiento del voltaje y la corriente con los aerogeneradores conectados en serie .....	67
4.24	Segunda conexión del módulo de aerogeneradores con una lámpara de 9 Leds como carga eléctrica del sistema.....	68
4.25	Comportamiento del voltaje y la corriente con los aerogeneradores Conectados en serie con diodos entre si.....	69
4.26	Potencia generada en función de la velocidad del viento .....	69
5.1	Comportamiento del aire sobre el módulo de turbinas Savonius torcidas .....	71
5.2	Circuito de un cargador de baterías.....	74
5.3	Disposición de un módulo sobre automóviles.....	75
A.1	Plano de la turbina Savonius convencional sin flecha.....	80
A.2	Plano de la turbina Savonius convencional con flecha.....	81

A.3	Plano de la turbina Savonius torcida con flecha .....	82
B.1	Fotografía del flujo de viento experimental 1 .....	83
B.2	Fotografía del flujo de viento experimental 2 .....	83
B.3	Fotografía del flujo de viento experimental 3 .....	84
B.4	Fotografía del flujo de viento experimental 4 .....	84
B.5	Fotografía del flujo de viento experimental 5 .....	85
B.6	Fotografía del flujo de viento experimental 6 .....	85
B.7	Fotografía del flujo de viento experimental 7 .....	86
B.8	Fotografía del flujo de viento experimental 8 .....	86
C	Datos técnicos del motor empleado .....	87

# Capítulo 1 Introducción

El calentamiento global, el cambio climático y la sobrepoblación mundial son algunos ejemplos de los problemas ambientales y sociales más sobresalientes hoy en día, debido a esto, resulta necesaria la búsqueda de algunas soluciones alternativas como lo son las energías renovables, usando la energía natural de forma efectiva.

Es por esto que en las últimas dos décadas ha aumentado la atención centrada en la preservación de las reservas naturales y la restauración del equilibrio ecológico de nuestros ecosistemas en todo el mundo.

## ***1.1 Antecedentes de la energía eólica***

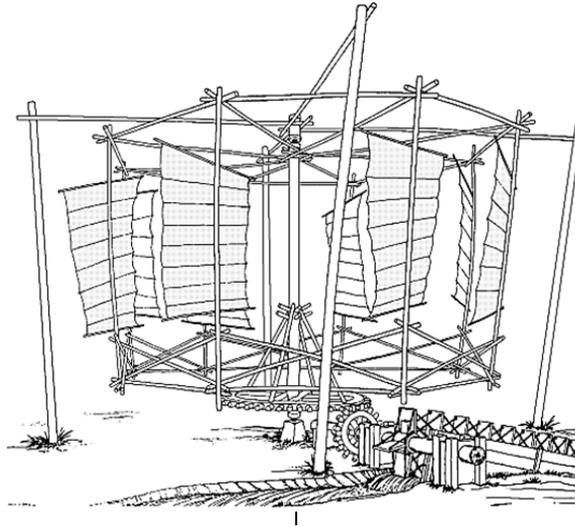
Las primeras referencias hechas al viento, como una fuente de energía, se han podido encontrar en los viejos mitos de antiguas civilizaciones; así en los poemas sumerios de la creación y de Gilgamés aparece Enlil, quien representaba la fuerza del viento, cumpliendo importantes funciones dentro de la traida de los dioses sumerios, tales funciones que más tarde hereda Eolo en el mundo greco-romano. Giovanni Boccacio, en su genealogía de los dioses paganos, describe los vientos como fuerzas creadas para alterar el orden impuesto desde el Olimpo, según Lactancio por Juno para vengar alguna de las infidelidades de Júpiter y según Pronápides por Litigio quien, expulsado del cielo, bajó al infierno y convenció a las Furias para que incitaran a los vientos a perturbar la tranquilidad del dios. Virgilio

cuenta que éste puso a los vientos a buen recaudo encerrándolos en una cueva y encargando a Eolo la función de “contenerlo y darles rienda suelta” [1].

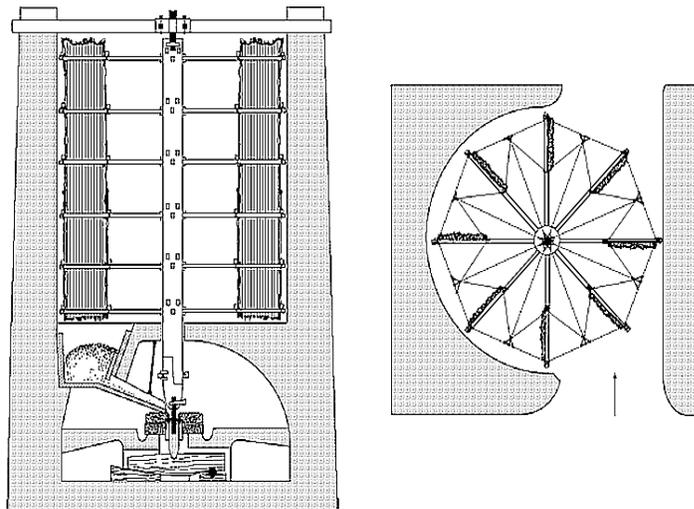
El viento ha sido utilizado como una fuente de energía desde hace mucho tiempo por las primeras civilizaciones, por ejemplo para moler grano, para bombear agua de pozos profundos y para suministrar energía a barcos de vela pequeños. Los molinos eran bien conocidos entre los pueblos del norte de Italia a partir de los primeros siglos de nuestra era. Vitrubio, un arquitecto, escritor, ingeniero y tratadista romano, en su VIII libro de arquitectura, describe en el año 25 d.C. un molino de agua dentro de un conjunto de máquinas de bombeo [1]. Se trata de un molino de eje horizontal, por lo que debía disponer ya de engranajes y transmisiones bastante evolucionados, se supone que los primeros molinos de viento fueron de eje vertical. Los chinos utilizaban desde tiempos inmemorables estos molinos llamados *panémonas*, que se usaban para bombear agua en las salinas, como se muestra en la figura 1.1. En *Studies in Ancient Technology* se sostiene que estos molinos ya existían con anterioridad al año 400 d.C.

Otra fuente [2] asegura que las primeras construcciones de molinos de vientos se dieron en el imperio Persa aproximadamente en el año 900 d.C., dichos molinos de viento pudieron estar ubicados en las fronteras de Persia con Afganistán. Su diseño fue en realidad simple, según la precisa descripción del cosmógrafo Sirio Al-Dimashqi (siglo XI), como se puede apreciar en la figura 1.2, este ingenioso modelo estaba formado por una torre de mampostería provista de una pared frontal, la cual actuaba como pantalla deflectora dirigiendo al viento sobre las palas motoras y regulando su intensidad mediante un sistema de

compuertas de madera que operadas manualmente, permitian una mayor o menor entrada de aire.



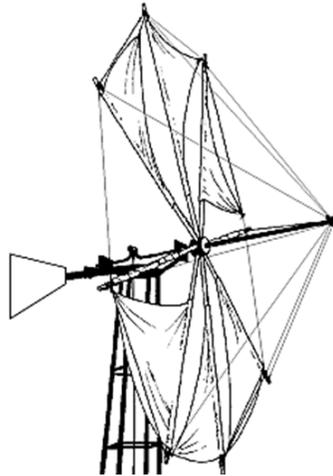
**Figura 1.1:** Panémona china de eje vertical utilizada para el bombeo de agua



**Figura 1.2:** Molino Persa de eje vertical utilizado para moler granos

Más tarde los molinos de eje horizontal debieron surgir también en el área de la antigua Persia, tal vez con anterioridad a la época islámica, sin embargo, se tiene la certeza de que en la isla de Creta era ya de uso corriente un molino de eje horizontal antes de la denominación Veneciana (1204-1269). Este molino se utilizó

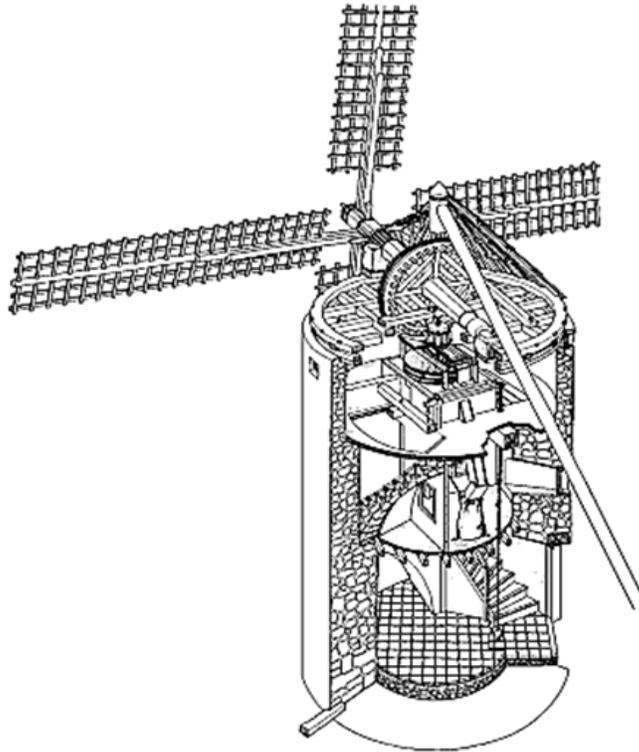
extensamente en Creta y otras islas del Egeo, donde aún se sigue utilizando, aunque acoplado a una bomba de pistón. Sólo en las llanuras de Lasithi, Creta, pudo haber en su momento más de 10,000 molinos de trípode [1] como se muestra en la figura 1.3.



**Figura 1.3:** Molino de vela montado sobre trípode, utilizado en la isla de Creta para bombear agua

Durante la Edad Media, se construyeron molinos de viento de eje horizontal en Europa, y fueron usados para tareas mecánicas como el bombeo de agua o para moler granos y procesar ciertas especies como pimienta y otros alimentos de uso específico (cocoa, tabaco, etc.). Estos fueron los clásicos viejos molinos de viento de cuatro palas que estaban montados en grandes estructuras [2].

El molino manchego mostrado en la figura 1.4, por su forma y construcción de las palas se puede decir que tiene una gran influencia europea. Estos molinos de viento perdieron popularidad después de la Revolución Industrial.



**Figura 1.4:** Molino manchego sobre una torre construida con piedra y adobe

Aproximadamente en esos mismos tiempos, el bombeo de agua impulsado por los molinos de viento comenzaron a ganar popularidad en los Estados Unidos, reconocidos por ser de tipo multipalpas, y que generalmente estaban situados en las fincas [3].

Uno de los primero intentos por generar electricidad por medio del viento fue realizado en los Estado Unidos por Charles Brush en 1888 [3]. Una turbina de viento es usada para captar y transformar la energía cinética del viento en energía mecánica (tal como los molinos de viento) y generar electricidad. Entre las más importantes de las turbinas sencillas se encontraba la desarrollada por Marcellus Jacobs que se muestra en la figura 1.5, la cual tenía tres hojas de forma

aerodinámica, una batería de almacenamiento y una veleta que permitía mantener a la turbina direccionada en contra del viento



**Figura 1.5:** Aerogenerador Jacobs de 1kW

Sin embargo, en los Estados Unidos antes que se instalaran lo que hoy se conocen como sistemas eléctricos, tanto el bombeo de agua como la generación de electricidad en pequeña escala con turbinas eléctricas (llamadas cargadores de viento) fueron vitales para el desarrollo de granjas y de la gran planicie Americana en el Oeste.

Desafortunadamente el uso de energías renovables en general para suministrar energía a las comunidades rurales remotas no fue exitosa en el pasado, debido a que el mantenimiento resultaba muy costoso y el reemplazo de partes o refacciones difícil de obtener; sin embargo, debido a los trabajos de investigación y desarrollo tecnológico se han obtenido diseños de pequeñas turbinas de viento que requieren de muy poco mantenimiento y que están ganando una gran popularidad y resultando también más económicas para su

aplicación en casas, colonias, pequeñas poblaciones e inclusive industrias que se encuentren distantes, o bien que requieren operar sin quemar combustibles fósiles.

En las décadas recientes, la industria ha estado perfeccionando las turbinas de viento para convertir la energía del viento en electricidad ya que las turbinas de viento tienen muchas ventajas que las hacen una energía atractiva, especialmente en aquellas partes del mundo en donde la infraestructura de los sistemas de transmisión no ha sido totalmente desarrollada, tienen la ventaja de ser modulares y se pueden instalar en forma relativamente rápida, de manera que es fácil de ajustar el suministro de electricidad con la demanda; *el combustible a utilizar es el viento* y puede existir en ciertos lugares en abundancia, con características apropiadas, es gratis, y elimina o reduce la necesidad de comprar, embarcar y almacenar combustible caro.

La generación de electricidad por medio del viento ha experimentado un tremendo crecimiento en la década pasada, y ha sido reconocido como un medio de generación de electricidad económicamente competitivo y amigable con el medio ambiente [4]. Además los sistemas de conversión de energía con viento se encuentran disponibles en un amplio rango de tamaños y cubren casi cualquier aplicación donde se requiera la energía eléctrica.

## **1.2 Objetivos del trabajo**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de aerogeneradores verticales modulares para la generación de energía eléctrica de baja potencia y realizar la validación experimental del mismo con la construcción de un módulo prototipo

### **1.2.2 Objetivos Particulares**

Para lograr satisfactoriamente el objetivo propuesto se deberán cumplir las siguientes objetivos particulares establecidos a continuación:

- Estudio de la metodología a aplicar en el análisis computacional de las turbinas
- Obtención de un modelo matemático del sistema
- Análisis computacional de flujo dinámico sobre las turbinas savonius
- Construcción de las turbinas savonius prototipo
- Implementación de módulos de aerogeneradores verticales
- Obtención de resultados experimentales
- Evaluar cuantitativamente los resultados computacionales contra los resultados experimentales

### **1.3 Justificación**

Al aprovechar la energía eólica en los dispositivos móviles a ruedas con la ayuda de módulos de micro aerogeneradores verticales savonius existe una utilidad de la fricción del aire ocasionada por la resistencia al desplazamiento, la cual nos permite realimentar de energía eléctrica al sistema de alimentación eléctrica del móvil, mejorando así el rendimiento en el tiempo de duración de la energía y la reducción de consumo de combustible para el caso de los autos con motores de combustión interna.

### **1.4 Organización de la tesis**

Esta tesis se encuentra compuesta por 5 capítulos organizados de la siguiente manera:

- El primer capítulo proporciona una introducción del trabajo a desarrollar y la importancia del mismo. Se presentan los objetivos del trabajo, la justificación del proyecto de tesis y el planteamiento del problema.
- El segundo capítulo muestra un panorama general de las bases teóricas de las energías alternativas, las tendencias de sus aplicaciones tecnológicas y el impacto ambiental.
- El tercer capítulo hace una presentación de las bases teóricas de las turbinas, sus aplicaciones tecnológicas, se enfatiza la turbina tipo Savonius.

- El cuarto capítulo detalla el modelado matemático y computacional dinámico, así como los experimentos para el análisis de un generador eólico basado en una turbina Savonius modificada y se muestran los resultados obtenidos.
- El quinto capítulo describe las conclusiones del trabajo haciendo énfasis en las aportaciones de esta tesis, las ventajas y casos específicos en donde se obtienen mejores resultados, así como los trabajos futuros que pueden desarrollarse tomando como base esta tesis.

## **Capítulo 2 Las energías renovables**

En este capítulo se darán conocer las bases teóricas de las energías alternativas, las tendencias de sus aplicaciones tecnológicas, así como el impacto ambiental de las mismas.

### ***2.1 Introducción***

El calentamiento global, el cambio climático, y la sobrepoblación mundial son unos ejemplos de los problemas ambientales y sociales más sobresalientes hoy en día, debido a esto, resulta obvio que se busquen algunas soluciones alternativas como son las energías renovables; usando la energía natural de forma efectiva. Es por ello que en las últimas dos décadas ha aumentado la atención centrada en la preservación de las reservas naturales y la restauración del equilibrio ecológico de nuestros ecosistemas en todo el mundo. Las energías renovables, como la solar, la eólica, la hidráulica, entre otras y las provenientes de los recursos energéticos de las biomasas son una buena alternativa frente a los combustibles fósiles. Desafortunadamente en la actualidad, la energía consumida por el hombre proviene en, un 80% aproximadamente de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). El mantenimiento del sistema energético actual durante un lapso de tiempo de una o dos generaciones es, simplemente insostenible, porque está agotando las reservas de combustible, contribuye al efecto invernadero, a la

acidificación del agua y a la deforestación, además de originar riesgos para la paz mundial [5].

El conjunto de los mencionados combustibles representa el 78% del total, y hay que tener en cuenta que aproximadamente, la tercera parte de la energía primaria se destina a la producción de electricidad. El 40% de la electricidad proviene del carbón, mientras que el petróleo y la energía nuclear solo cubren entre un 12% y un 15%, cada una. En términos de energía consumida, la electricidad representa el 12% del total y su destino es, por igual, el sector industrial y el residencial.

En la figura 2.1 se muestra el balance de energía eléctrica registrada hasta el año 2009 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en la cual podemos observar que la aportación en la generación de energía eléctrica por parte de las energías renovables en nuestro país fue solo del 21% del total generado. Datos más actuales reportados por la Secretaría de Energía (SENER) que al 2011 la generación bruta de energía eléctrica por generación hidroeléctrica incrementó a 36,738 GWh, mientras que en la energía geotérmica se redujo a 6,618 GWh y de igual manera con la generación de energía con el viento que se redujo a 166 GWh [6].

Por tal motivo que la generación de Energía Descentralizada (ED) ha cobrado auge en la última década, la ED consiste en generar electricidad cerca de los puntos de consumo (incluso en el mismo punto de consumo) [7], sin embargo, no todas las fuentes de energías renovables se encuentran al alcance de quien pretende generar su energía para su autoconsumo, por ejemplo, para la generación por medio de la energía micro-hidráulica se requiere de al menos una

fuente de alimentación de agua constante que permita la transformación de la energía potencial de una caída de agua en energía eléctrica, por lo que en este trabajo se le da mayor importancia a la energía solar y la energía Eólica.

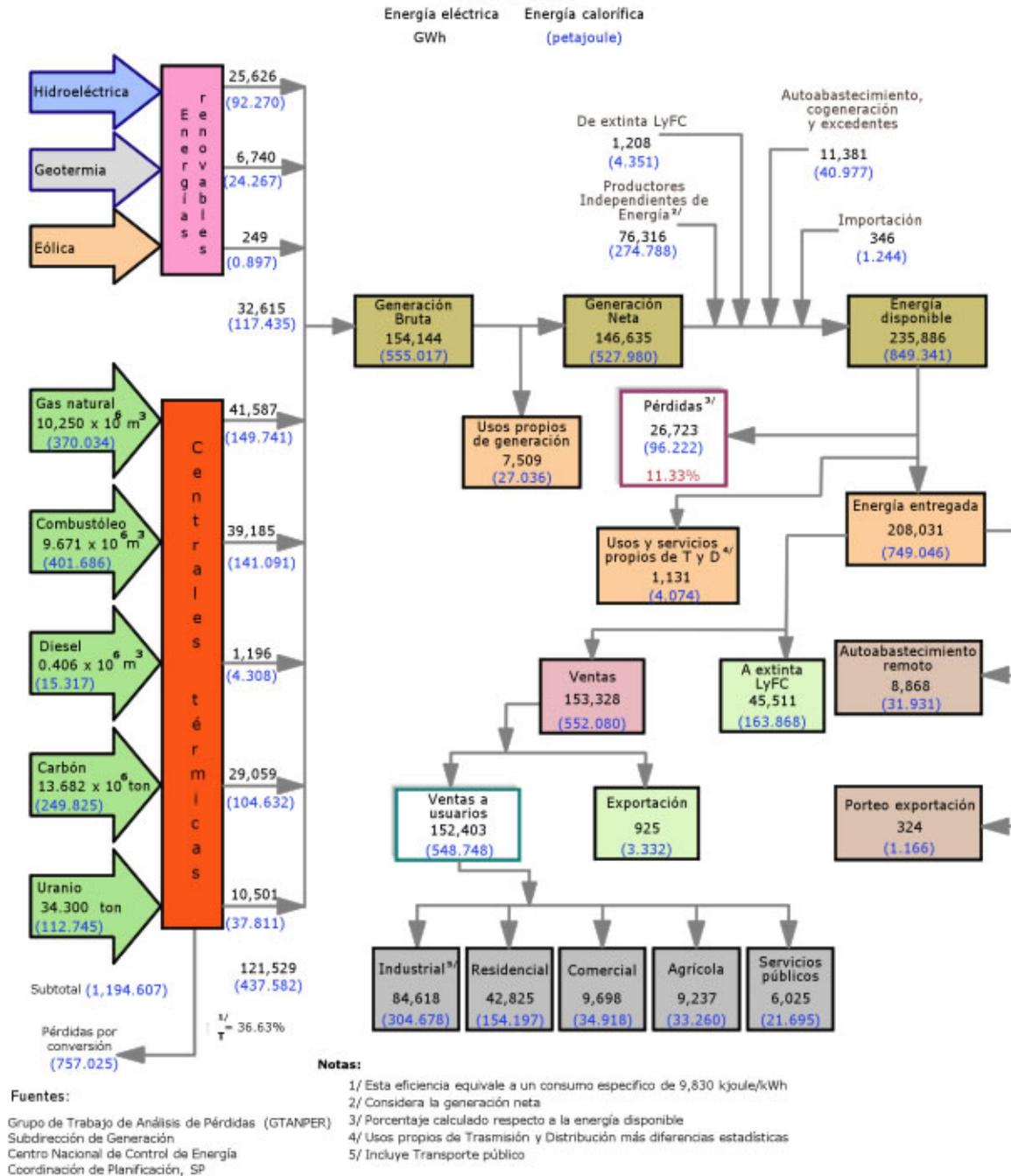
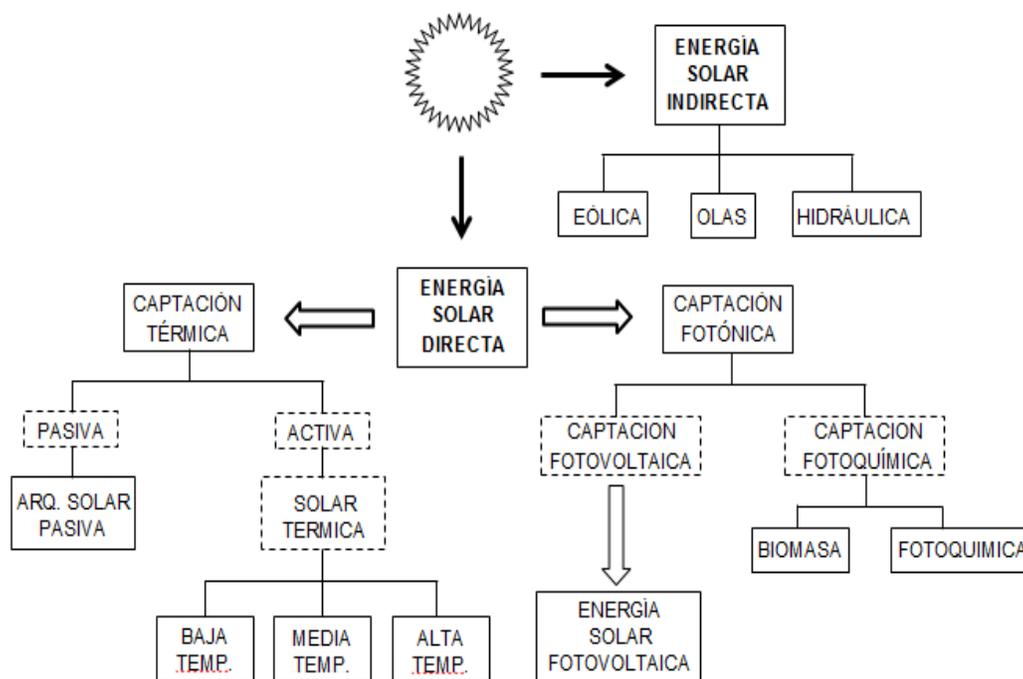


Figura 2.1: Balance de energía eléctrica en México hasta el 2009.

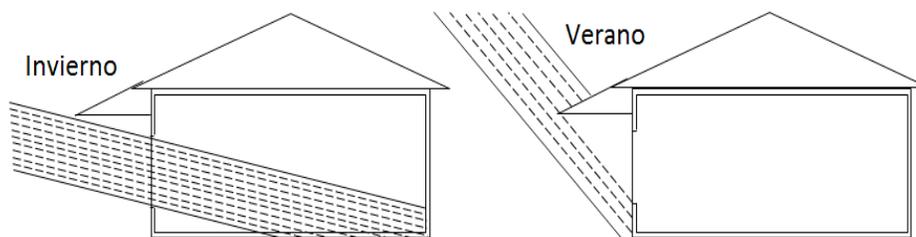
## 2.2. La energía solar

El sol es una gran fuente de energía, con un flujo radiante equivalente a una densidad de 62.5 MW por cada metro cuadrado de superficie solar. De esa enorme cantidad de energía radiante, solamente llega a nuestra atmósfera exterior el equivalente a una potencia de 1,4 kW por cada m<sup>2</sup>, cantidad que se reduce hasta aproximadamente 1 kW/m<sup>2</sup> cuando atraviesa aquella y llega a nuestro suelo. En la figura 2.2 se puede apreciar las formas de la captación de la energía solar. Además, los fósiles como la madera y los residuos vegetales, provienen de la energía transmitida por el sol cuando se formaron y crecieron las formas vegetales originarias.



**Figura 2.2:** Formas de captación de la energía solar

A continuación mencionaremos rápidamente las formas de aprovechamiento de la energía solar comenzando con la energía solar pasiva, la cual es aquella que penetra por ventanas y vidrios incorporados a un edificio y que se encuentran convenientemente orientados con el objetivo de ahorrar energía en los edificios sin disminuir los niveles de confort térmico exigidos por los individuos que lo ocupan. En la figura 2.3 se muestra una simple aplicación de este tipo de aprovechamiento de energía solar, al poder incidir los rayos del sol sobre una ventana de una vivienda en invierno, de tal manera que la temperatura del interior incremente, y que en verano, gracias a la orientación de la vivienda y un voladizo no se permite la entrada de los rayos solares evitando así una sensación de calor al interior.

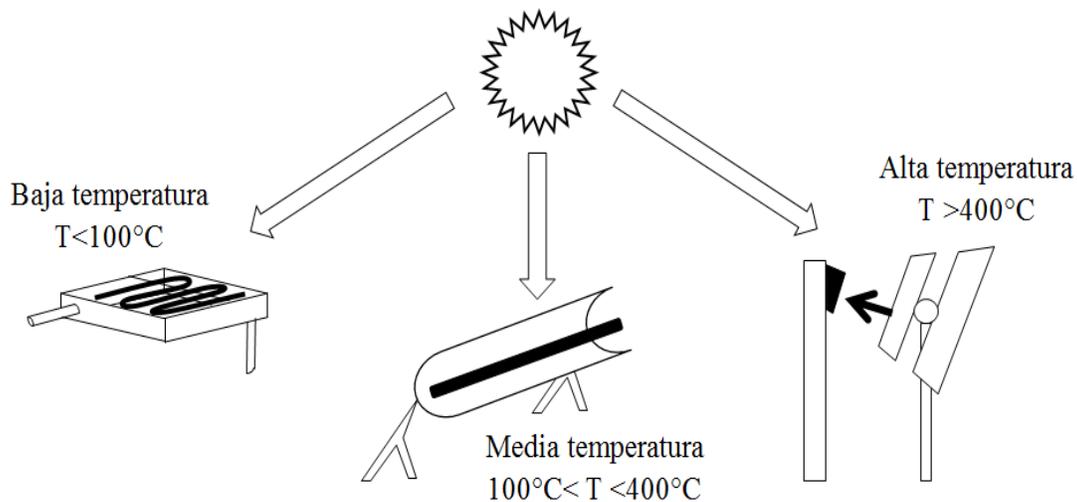


**Figura 2.3:** Diferente efecto del voladizo en invierno y verano

Otro medio de aprovechamiento, es el de la energía solar activa, la cual se puede subclasificar en tres tipos de sistemas de conversión térmica que han sido clasificadas en base a su temperatura de operación como: conversión térmica de baja, media y de alta temperatura. En la figura 2.4 se puede apreciar estos diferentes procesos de conversión solar térmica. La principal aplicación de los sistemas de conversión térmica a baja temperatura que son de pequeña

concentración y sin seguimiento solar, es el Agua Caliente Sanitaria (A.C.S.), y las aplicaciones para los sistemas de conversión térmica de media (con seguimientos solar en un solo eje) y alta temperatura (con seguimiento solar en dos ejes) se dan en la generación de vapor para la generación de energía eléctrica [8].

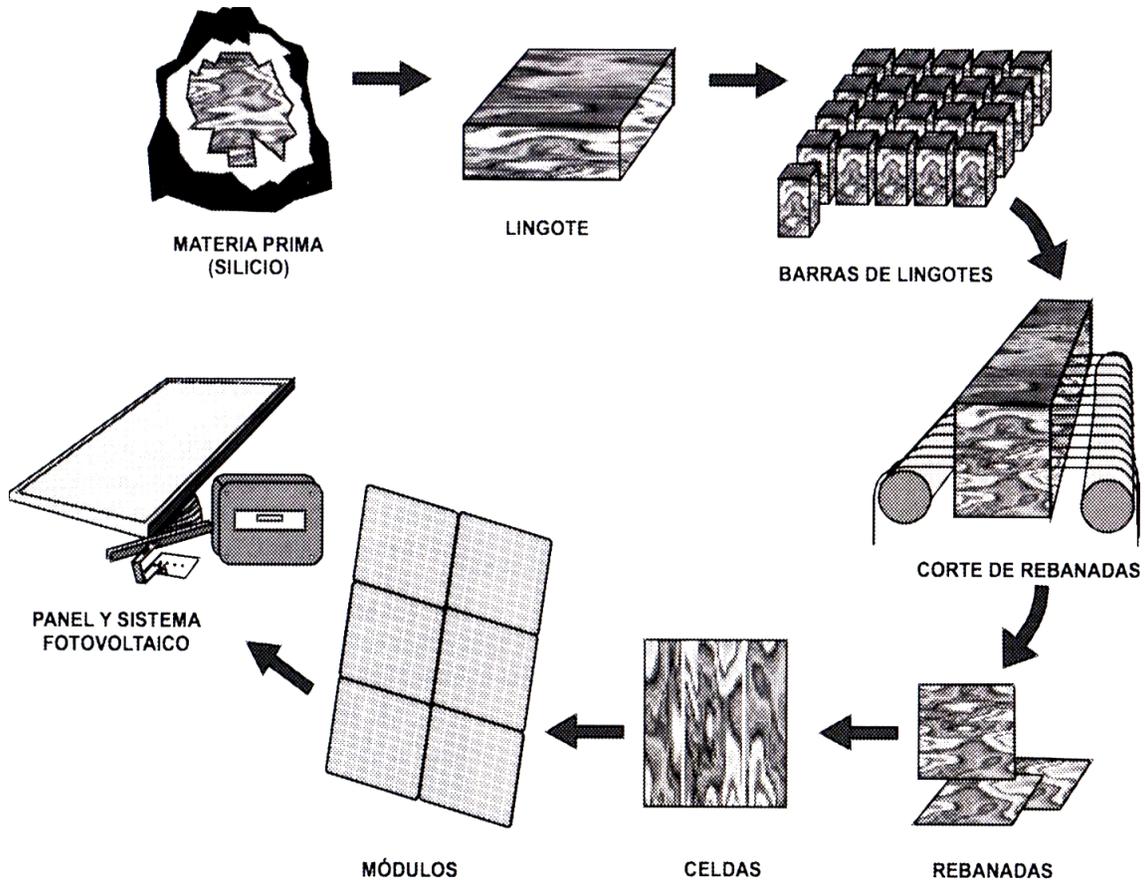
Finalmente la energía solar fotovoltaica es otro medio de aprovechamiento de la energía solar. Para ello existen tres tipos de células solares, las cuales son: monocristalinas, policristalinas y amorfas. Las células monocristalinas proporcionan el rendimiento más elevado que vas desde el 13% en la fabricación en serie hasta el 20% en modelos de laboratorio, y están fabricadas de una fundición de silicio.



**Figura 2.4:** Diferentes formas de aprovechamiento solar térmico

Las células policristalinas en cuanto al rendimiento se encuentran ligeramente inferiores al 10% y su proceso de fabricación es un poco menos complicado que el de las células monocristalinas. Por último, las células amorfas

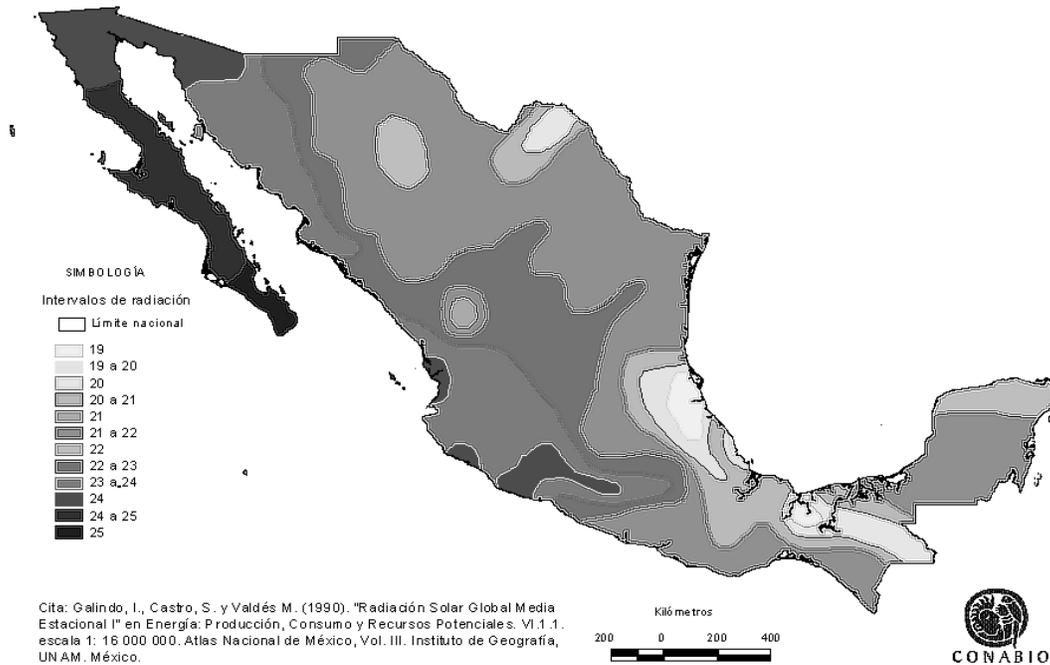
sitúan su rendimiento sólo en torno al 6% [9]. En la figura 2.5 se pueden observar las distintas etapas de la producción de un sistema fotovoltaico.



**Figura 2.5:** Proceso de fabricación de las celdas fotovoltaicas y su aplicación.

En la figura 2.6 se muestra la radiación solar Global Media Estacional de nuestro país, sin embargo, aunque gran parte de nuestro país se encuentra posicionado entre el ecuador y el trópico de cancer como una región favorecida por la radiación solar, aún no contamos con una central generadora de energía eléctrica por medio de la energía solar, ya que hasta ahora solo existen empresas que venden sus productos y servicios, entre los que se encuentran la

interconexión a CFE como parte de la generación de ED. Entre estas empresas destacan “Energía Solar del Pacífico” [10], y “SAECSA” [11].



**Figura 2.6:** Radiación solar media estacional en México

### **2.3 La energía eólica**

En el capítulo 1 se dio a conocer una breve introducción a los antecedentes de los molinos de viento que han destacado en la historia, tanto los de eje vertical, como los de eje horizontal, sin embargo, en este capítulo se le da más importancia a la generación de electricidad con la ayuda de la energía del viento.

El viento (energía eólica), es causado por la diferencia de presión, que, a su vez es motivada por las diferencias de temperatura de las masas de aire, las cuales tienen su origen en la absorción de la energía solar.

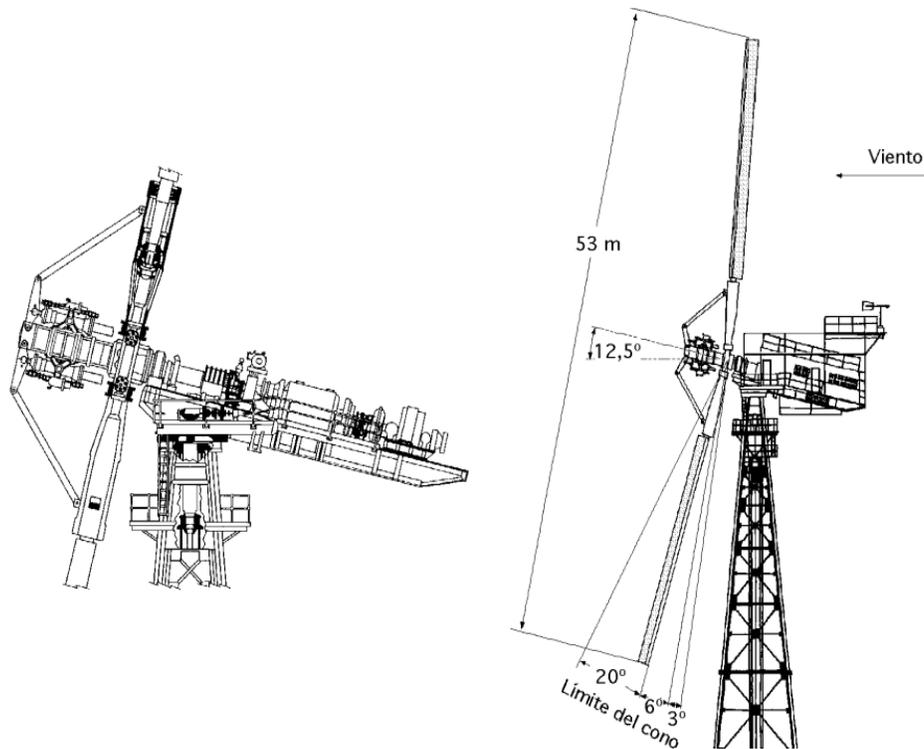
A partir de los primeros intentos por generar electricidad con el aprovechamiento de la energía del viento y gracias a los trabajos de investigación y avances tecnológicos que han surgido en las últimas décadas, esta rama de las energías alternativas ha tomado gran importancia.

Como se vio en el primer capítulo, las primeras realizaciones importantes para generar electricidad en USA, fueron gracias a las aportaciones de Marcellus Jacobs, con su diseño completamente nuevo para esa época. Estos aerogeneradores diseñados por la casa Jacobs trabajaban en el campo de clasificación de baja potencia, ya que generaban 1 kW con vientos hasta 18 km/h, pues tenían una turbina con 5 m de diámetro (figura 1.5), además llevaba un sistema de regulación de paso variable, con el que se limitan las cargas máximas en la turbina, y con esta innovación comienza el proceso de disminuir los esfuerzos mecánicos que se generaban durante las ráfagas de viento. La compañía Jacobs Wind Electric fabricó muchos de estos aerogeneradores sobre torres de 20 m de altura, sin embargo, debido a la expansión de las redes de electrificación rural llevada a cabo al final de la década de los treinta por la administración del presidente Franklin Delano Roosevelt la producción de los aerogeneradores Jacobs se vio severamente afectada.

En 1941 se construye una nueva máquina de 1,25 MW, a cargo de Morgan Smith Company, el aerogenerador SMITH-PUTMAN diseñada por P.C. Putman y J.B. Wilbur, este aerogenerador mostrado en la figura 2.7, tenía una turbina de dos palas fabricadas en acero inoxidable, la regulación de velocidad se realizaba variando la conicidad de las palas, y tal vez este sistema de regulación fue el culpable de que años más tarde, debido a un fallo estructural se rompiera una

pala. Las vibraciones producidas en las palas al variar su ángulo de conicidad continuamente generaban tensiones en los materiales, dando lugar a los fenómenos de fatiga, para los cuales no se habían tomado precauciones de diseño. La compañía abandonó este proyecto, ya que no resultó competitivo el precio del KW respecto al obtenido por otras fuentes de energía.

En los años setenta, el departamento de energía puso gran interés en dirigir los trabajos de investigación y desarrollo de este sector energético, la primera fase del programa consistió en un estudio sobre la viabilidad y rentabilidad de los sistemas eólicos de producción de energía a gran escala. El paso siguiente fue la elaboración de un programa de cinco años de duración para el diseño y construcción de tres prototipos, los MOD-0, MOD-1 y MOD-2, ocupándose el centro de investigación Lewis de la NASA en Sandusji (Ohio).



**Figura 2.7:** Aerogenerador Smith-Putman de 1.25 MW USA

En 1975 comenzó a funcionar el primer aerogenerador MOD-0 de 100 kW, cuyo objetivo fue el de contrastar los resultados obtenidos mediante métodos analíticos y comprobar la información experimental obtenida en las plantas Hütter y de Putman, en las que se había basado el diseño. Esta aeroturbina sirvió para realizar diversos estudios y ensayos de cargas dinámicas y puntos de funcionamiento a diferentes regímenes de trabajo de los distintos componentes de la instalación. Dos años más tarde entraron en funcionamiento tres aerogeneradores MOD-0 de 200 kW, este prototipo (figura 2.8) estaba formado por un rotor bipala de 38 metros de diámetro, con una torre situada a sotavento, y eje rígido; la pala era de aluminio, con un perfil aerodinámico de la serie 230XX, con una torsión de  $26^\circ$  y una cuerda de entronque en el cubo de 1.24 metros y en la periferia de 0.46 metros, la torre tenía una altura de 30 metros.

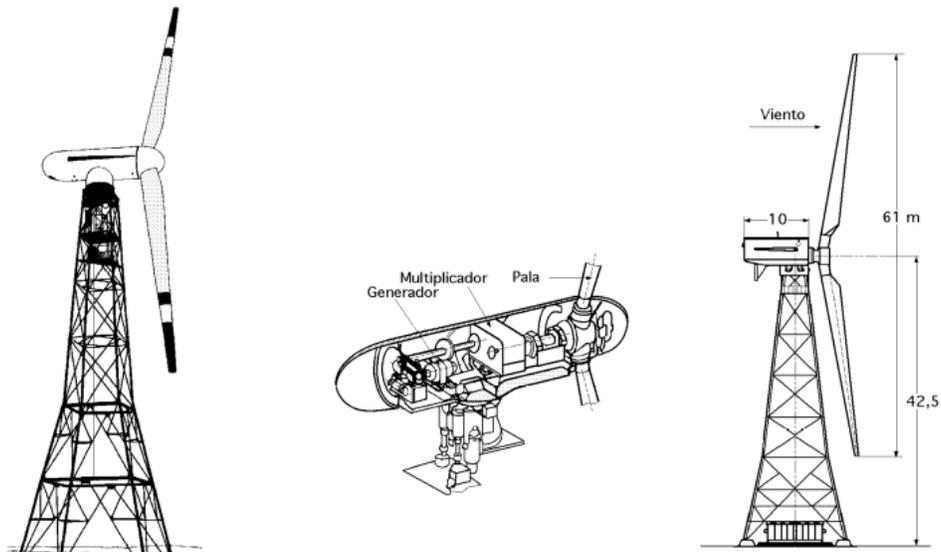
La potencia de 200 kW se obtenía para una velocidad nominal de 10 m/s, siendo la velocidad de conexión de 4 m/s y la de desconexión de 18 m/s. Estaba conectada a un alternador síncrono de 480 volts que giraba a una velocidad de 1,800 RPM.

El programa continuó con la siguiente fase, la cual fue la construcción del MOD-1, diseñado por General Electric. El aerogenerador mostrado en la figura 2.9 fue puesto en servicio a principios de 1979, y fue la primer turbina eólica capaz de generar electricidad a escala industrial, sin embargo, fue una de las que planteó graves problemas como las perturbaciones aeroacústicas de baja frecuencia nocivas para las personas con afecciones cardíacas.



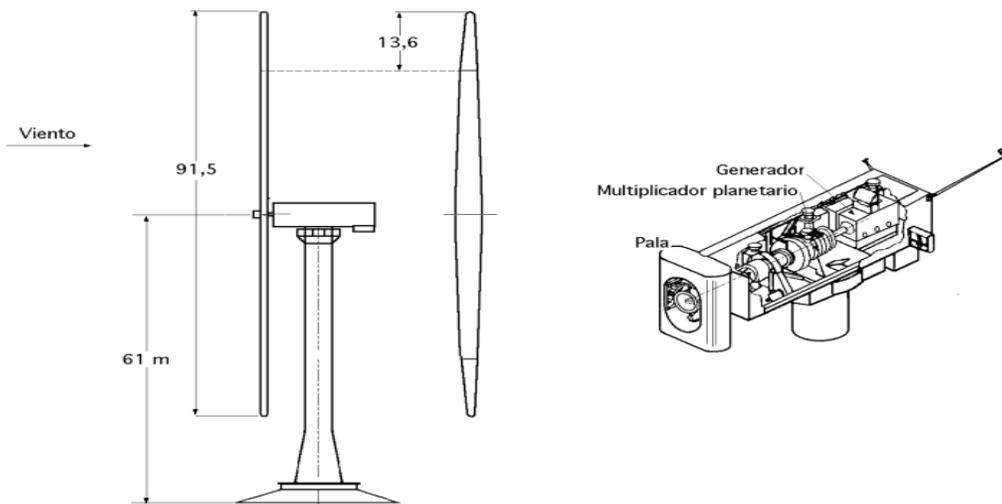
**Figura 2.8:** Aerogenerador experimental MOD-0A de 200 kW

Posteriormente, fué rediseñado debido a los problemas de ruido, cambiando así su velocidad de giro con un control de paso variable, las palas de acero tenían un perfil aerodinámico variable. Sus características principales eran: un diámetro de 61 m, potencia de 2MW, 35 rpm de rotación nominal, y una torre de acero de 42.7 m de altura.



**Figura 2.9:** Aerogenerador MOD-1

En 1980 en Goldendale, en el estado de Washington fue instalado el aerogenerador MOD-2 por la empresa Boeing Engineering and Construcción con el objetivo de optimizar los parámetros de diseño y reducir los costos, mejorando así la rentabilidad de la energía obtenida en este tipo de sistemas eólicos. Este nuevo diseño mostrado en la figura 2.10 fué el resultado de las observaciones y mejoras de los modelos MOD-0 y MOD-1 anteriores.



**Figura 2.10:** Aerogenerador experimental MOD-2 de 2.5 MW

Así como se dió el desarrollo tecnológico en los Estados Unidos de Norteamérica, en otras partes del mundo tambien se analizaban las aplicaciones de la energía eólica, un ejemplo de ello es que en Finlandia, en el año de 1924 el ingeniero Sigurd Savonius diseñó una turbina de viento cuya principal ventaja consiste en trabajar con velocidades bajas del viento, el cual estaba formado por dos semicilindros dispuestos alrededor de un eje vertical, y su movimiento rotacional es el resultados de la diferencia entre el arrastre de la pala concava y la convexa según la posición en la que se encuentren[1][12].

Muchos países como Rusia, Hungría, Dinamarca, Alemania, Holanda, Gran Bretaña, entre otros, también realizaron aportaciones, sin embargo, el desarrollo a nivel mundial de la energía eólica se expandió rápidamente en la década de los 90's, tal como se puede observar en la figura 2.11 [13].

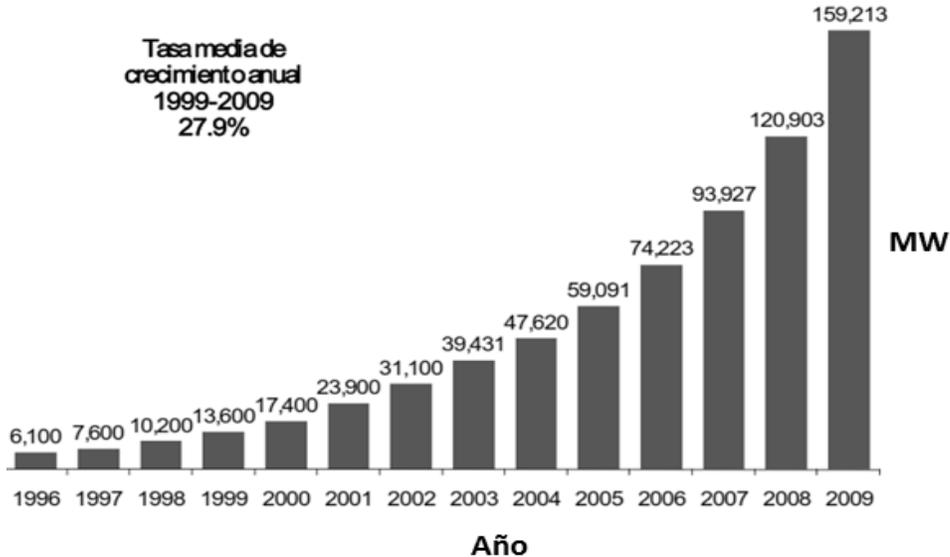


Figura 2.11: Evolución histórica de la capacidad eólica mundial, 1996-2009

En la figura 2.12 se puede observar el crecimiento anual de la producción de energía eólica en nuestro país desde 1994 hasta el 2009 [14].

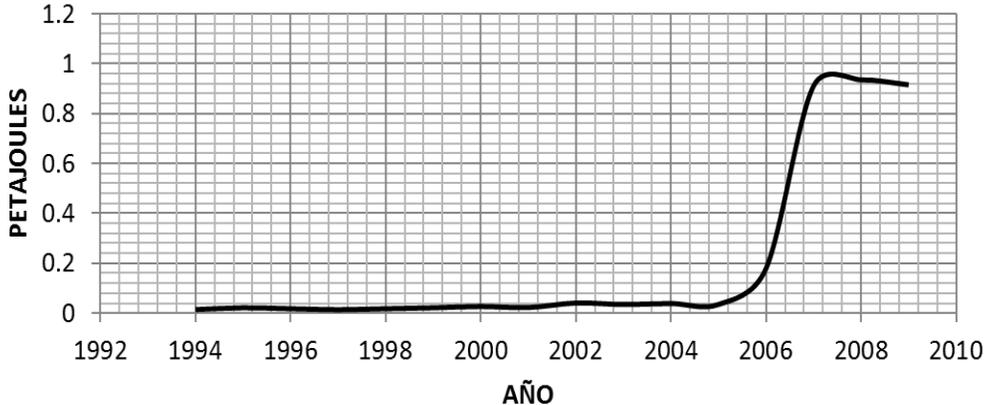


Figura 2.12: Producción de energía Eólica Real anual en México

Además de la geotermia, la única fuente de energía susceptible a desarrollarse en zonas de corrientes de viento a precios competitivos a gran escala, es la energía eólica. La central de la Venta se localiza en el sitio del mismo nombre, a unos 30km al noreste de Juchitan, Oaxaca. Fué la primer planta eólica integrada a la red en América Latina, con una capacidad instalada de 84,875 megavatios, consta de 105 aerogeneradores.

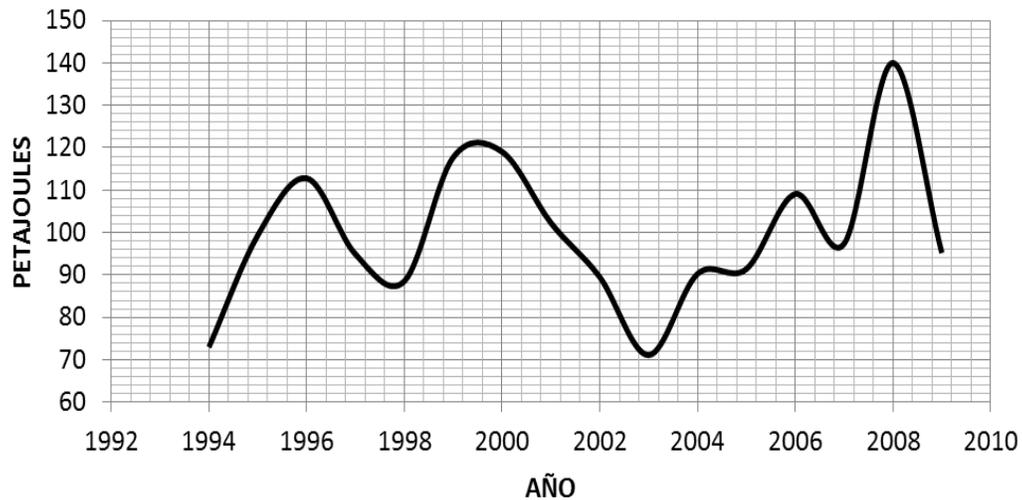
## ***2.4 La energía Hidráulica***

Se puede definir a la energía hidráulica como aquella que se obtiene del aprovechamiento de la energía cinética, potencial o ambas, de las corrientes o caídas de agua. Este tipo de energías se pueden utilizar en diferentes escalas, como cuando en un rio se instala un rotor de palas el cual genera movimiento mecánico para su aplicación en molinos de granos, o en su caso, cuando el agua es contenida en una represa, la fuerza hídrica es mayor; debido a una caída de agua es aprovechada para la generación de energía eléctrica con la ayuda de la plantas hidroeléctricas.

Las plantas hidroeléctricas ocupan la mayor parte de la atención en los sistemas de generación eléctrica, ya que es una fuente de energía limpia y renovable con alta densidad, en cooperación con las energías del viento y la solar, sin embargo, algunos han comentado que las construcciones de presas llegan a causar tremendos daños ambientales al modificar en gran parte el ecosistema, así como la inundación de pueblos enteros.

En nuestro país, la energía eléctrica generada por la hidráulica ocupa aproximadamente un 16% del total producido [15]. En la figura 2.13 se aprecia la

gráfica del comportamiento de la producción de energía anual en nuestro país, en donde se observa que la generación de este tipo de energía renovable no constante, tampoco presenta un elevado incremento en los últimos años, como lo es el caso de la generación de energía eólica.



**Figura 2.13:** Producción de Hidroenergía real anual en México

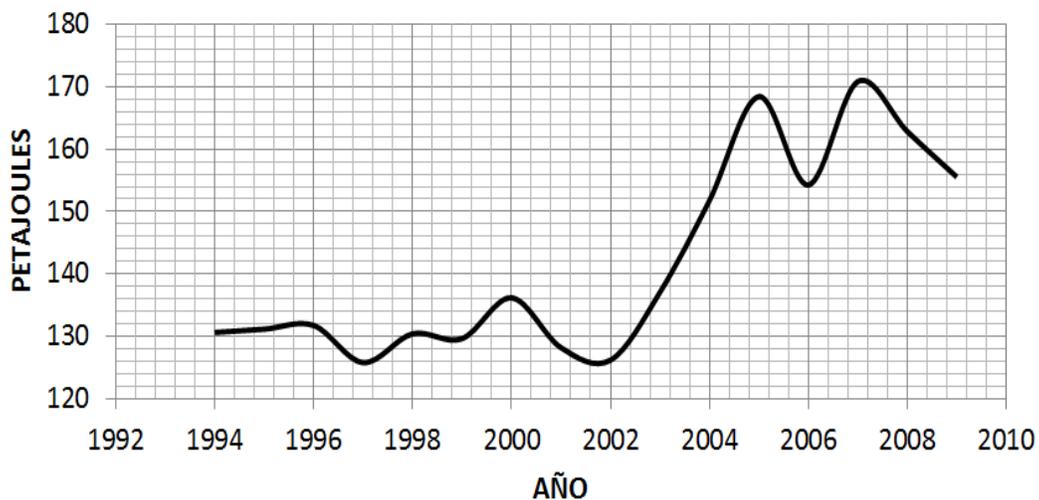
Para el caso del aprovechamiento de la energía minihidráulica, aunque aún no ha sido calculado en su totalidad el potencial de este recurso, la CONAE identifica más de 100 sitios para su aprovechamiento. Por ejemplo, en la región que comprende los estados de Veracruz y Puebla se estima una generación de hasta 3,570 GWh/año, equivalente a una capacidad media de 400 MW[16].

## ***2.5 La energía Geotérmica***

El calor generado en el interior de la tierra que se ha concentrado en lugares específicos del subsuelo es conocido como yacimiento geotérmico, el cual tiene los siguientes componentes: una fuente generadora de calor, un acuífero, y finalmente la capa sello.

Las manifestaciones geotérmicas se observan fácilmente en géisers y aguas termales. Esta energía de la Tierra, es extraída de la reserva subterránea a la superficie por medio de la excavación de pozos de producción perforados a aproximadamente unos 2,000 metros de profundidad con una temperatura en el fondo de 310° C. El vapor es separado del líquido en contenedores especiales para la liberación de presión y alimenta a turbinas, que lo transforman en los generadores en electricidad.

En el 2004, México ocupaba ya el tercer lugar mundial en capacidad de generación de energía Geotérmica con 843 MW instalados en los campos de Cerro Prieto, los Azufres con 88 MW y los Humeros con 25 MW. Esta cifra representaba el 2 % de la capacidad instalada del servicio público, así mismo, con la ampliación de los Azufres II por 107 MW y los Humeros por 55 MW. En la figura 2.14 se aprecia la producción de geoenergía real anual de nuestro país.



**Figura 2.14:** Producción de Geoenergía real anual en México.

Nuestro país se sigue colocando como el tercer productor a nivel mundial de energía geotérmica, gracias a su capacidad instalada, lo que representa un 4.3 % de la electricidad total generada en el país hasta el año 2009.

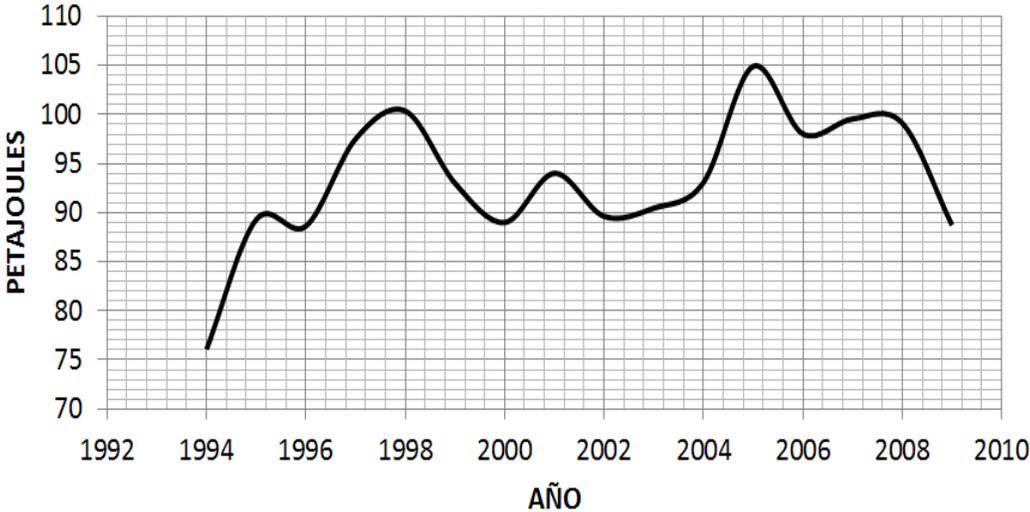
## ***2.5 La energía de la Biomasa***

Se le conoce a la biomasa como la materia orgánica originada en un proceso biológico espontáneo o provocado, la energía de la biomasa se considera como un tipo de energía renovable. Esta tecnología emplea la materia orgánica susceptible de utilizarse como energía (desechos sólidos municipales, residuos agropecuarios y de los bosques), el aprovechamiento de este recurso puede realizarse de dos formas diferentes, las cuales son: vía combustión directa, y por conversión de biomasa en diferentes combustibles (dependiendo de la técnica empleada).

Una investigación realizada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas estima que la generación de residuos sólidos municipales en nuestro país es de 90 mil toneladas diarias, con lo que podríamos tener una capacidad para generar aproximadamente 150 MW de electricidad, lo cual es una alternativa rentable solo para ciudades grandes y medianas.

Hasta hace aproximadamente diez años atrás, solo existían dos permisos autorizados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) de nuestro país para generar electricidad con base al aprovechamiento del biogás. Ambos permisos fueron para proyectos localizados en municipios colindantes con la ciudad de Monterrey, los cuales se encuentran actualmente en operación con una capacidad instalada aproximada de 10.8 MW [16].

En la figura 2.15 observamos la producción de energía por medio de la biomasa aprovechada del bagazo de la caña, ya que en nuestro país, la caña de azúcar es uno de los principales cultivos agrícolas, del cual se obtiene el bagazo como un subproducto del proceso de extracción de la azúcar.



**Figura 2.15:** Producción de la energía real anual en México extraída del bagazo de caña [17]

## **Capítulo 3 Análisis de los diferentes tipos de turbinas de viento.**

Objetivo: Mostrar el estado del arte sobre los diferentes tipos de turbinas de viento, sus características y su funcionamiento detallado.

### ***3.1 Introducción***

Una turbina de viento es un dispositivo que transforma la energía cinética del viento en energía cinética rotacional, y esta a su vez en energía eléctrica [2] . Las turbinas de viento grandes pueden ser competitivas en precio con relación a otras formas de generación, en áreas que tengan buenos recursos del viento. Esto se debe a que las turbinas de viento tienen la ventaja de ser modulares y que pueden ser instaladas relativamente rápido lo que la hacen una fuente de generación de energía atractiva con respecto a otros tipos de energías alternativas como por ejemplo la hidroeléctrica.

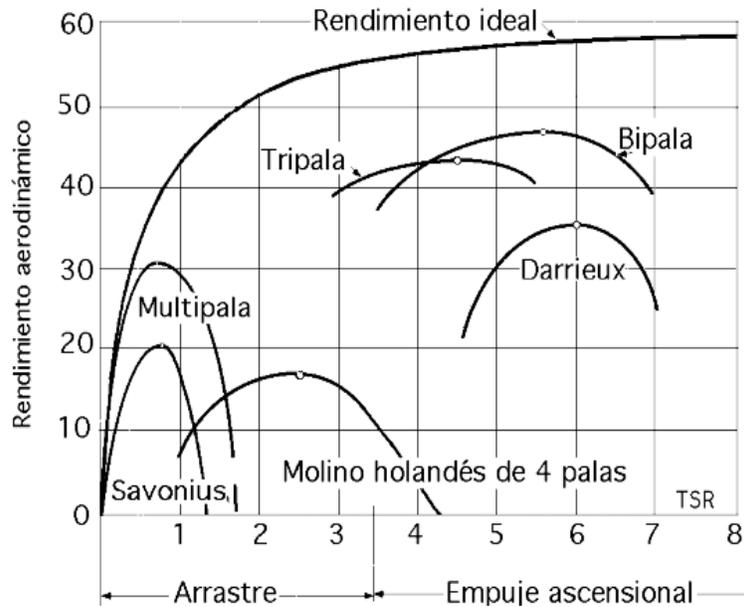
Las turbinas de viento son diseñadas generalmente para un punto de trabajo nominal, esto es, para una velocidad dada del viento el cual está obviamente ligado a la potencia entregada. Consecuentemente, la noción de producir energía, por ejemplo, durante todo el año; es justificada por el concepto de la potencia instalada, o por la potencia instalada por metro cuadrado por sección transversal del viento.

Una turbina de viento es usada para cambiar la energía cinética del viento en energía mecánica (tal como los molinos de viento) y generar electricidad. Estas turbinas son clasificadas en dos categorías, dependiendo de la orientación de sus ejes de rotación en: turbinas de eje horizontal, y de eje vertical. Las turbinas de eje horizontal tienen estructuras complicadas y son de difícil instalación. Estas turbinas son económicamente factibles solo en áreas en las que existen vientos permanentes y a elevadas velocidades, aunque sus velocidades de rotación son altas carecen de un buen torque. Estas turbinas a menudo son usadas para generar electricidad. Las turbinas de eje vertical son de simple estructura y fácil instalación, estos captan el viento en diferentes direcciones y velocidades. Estas turbinas verticales, no giran a elevadas velocidades pero tienen muy buen torque, por ello han sido muy usadas para el bombeo de agua en la agricultura y la industria [2][12][18], siendo estas últimas más competitivas respecto a los de eje horizontal si consideramos factores como la habilidad de captación del viento en cualquier dirección, son de estructura comparativamente simple, de fácil mantenimiento y un bajo costo de implementación e instalación. La elección de una turbina de viento está basada obviamente en su rendimiento energético. En la figura 3.1 se muestra el comportamiento del rendimiento aerodinámico de las turbinas de viento más estudiadas.

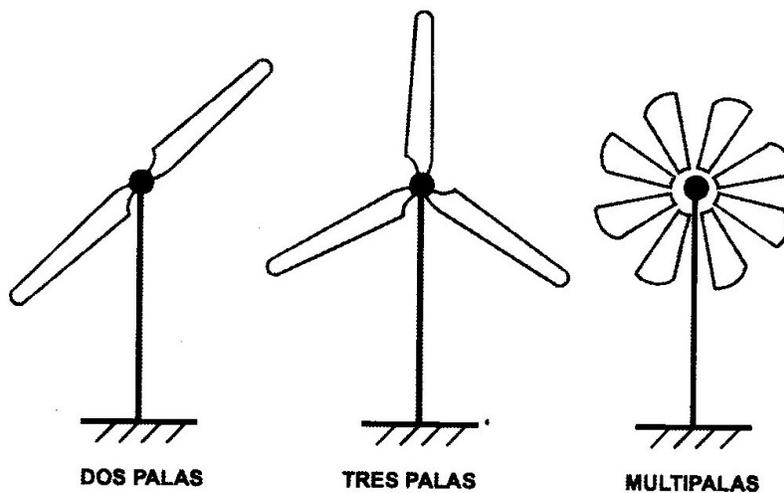
### ***3.2 Turbinas de viento de eje horizontal***

Durante el siglo XX las turbinas de viento de eje horizontal continuaron evolucionando, con mejores resultados y un gran avance en las turbinas hasta

llegar a la turbinas de eje horizontal moderna que hoy conocemos [3] . Estas son confiables y económicas, se fabrican en diferentes configuraciones como se observa en la figura 3.2, sin embargo, todas ellas descienden de los viejos molinos de viento.

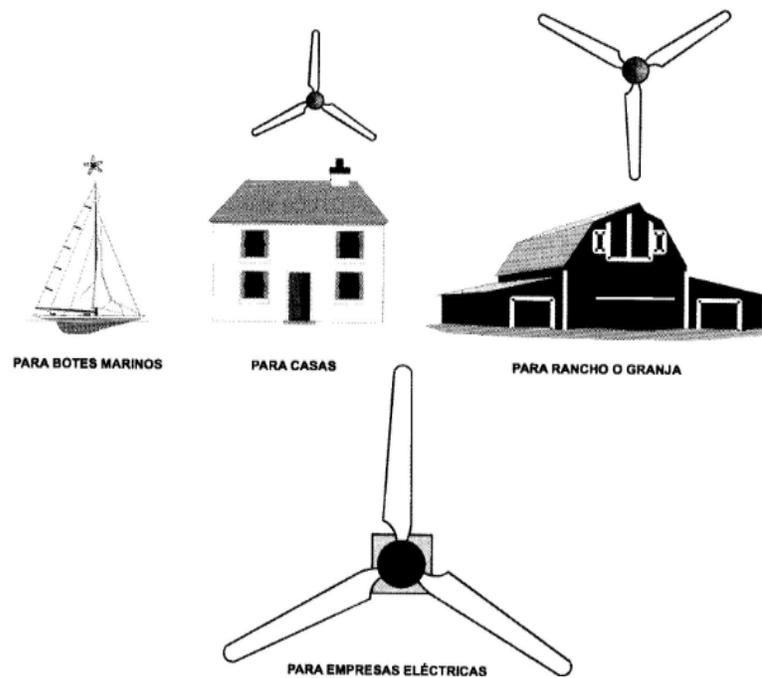


**Figura 3.1:** Rendimiento aerodinámico (respecto a la relación de velocidad angular en la periferia) de las diversas turbinas de viento estudiadas



**Figura 3.2:** Diferentes configuraciones de turbinas de viento de eje horizontal

Sin embargo, existe otra clasificación para este tipo de turbinas, las cuales dependen de su tamaño o capacidad (cantidad de energía que generan), ver figura 3.3, y pueden ser: pequeñas (menores de 10kW), intermedias (entre 10 y 500 kW) o grandes (500kW a 5 MW) . Las pequeñas turbinas tienen su aplicación en botes marinos, casas, granjas y sitios remotos en donde es difícil llevar la electricidad. Parte de las turbinas de viento intermedias y todas las grandes se usa para producir electricidad dentro de lo que se conoce como parques eólicos, la electricidad generada en estos lugares se incorpora a una red eléctrica para usos residenciales, comerciales y hasta industriales.

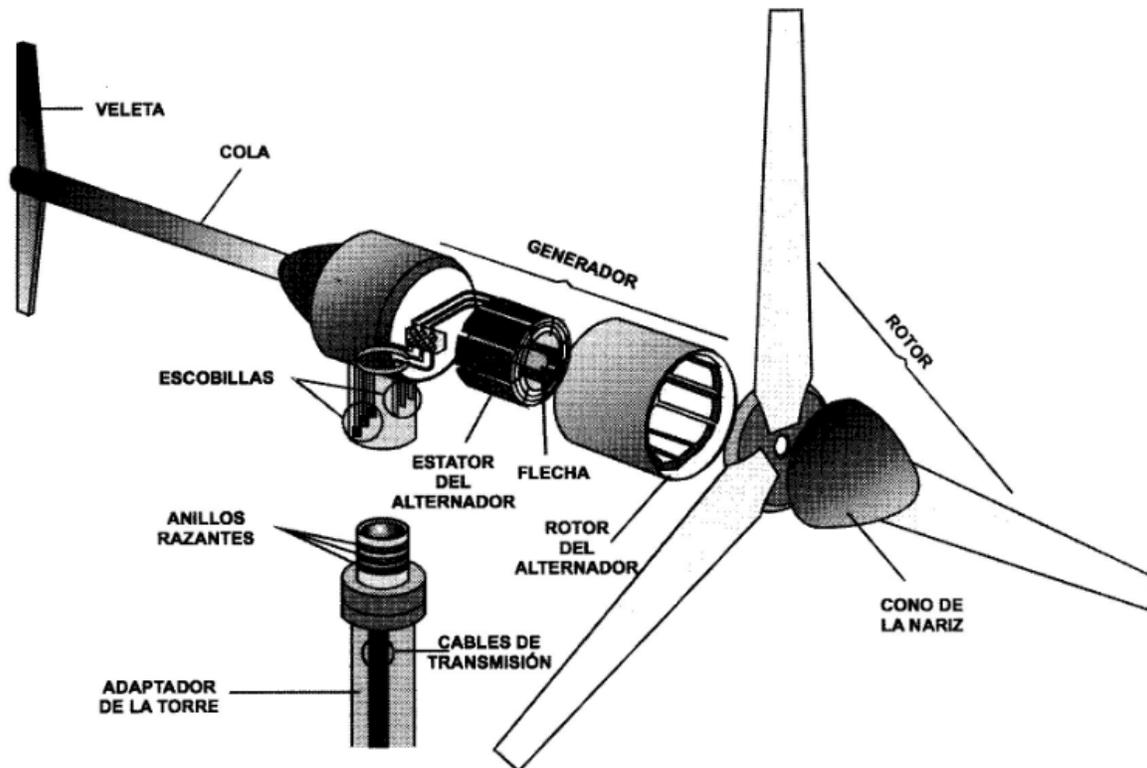


**Figura 3.3:** Clasificación de aerogeneradores por su tamaño o capacidad de generación.

La industria de los aerogeneradores es la más dinámica entre las industrias productoras de grandes equipos para la generación eléctrica, ya que

dentro del conjunto de ramas industriales emergentes solo es superada por la telefonía móvil .

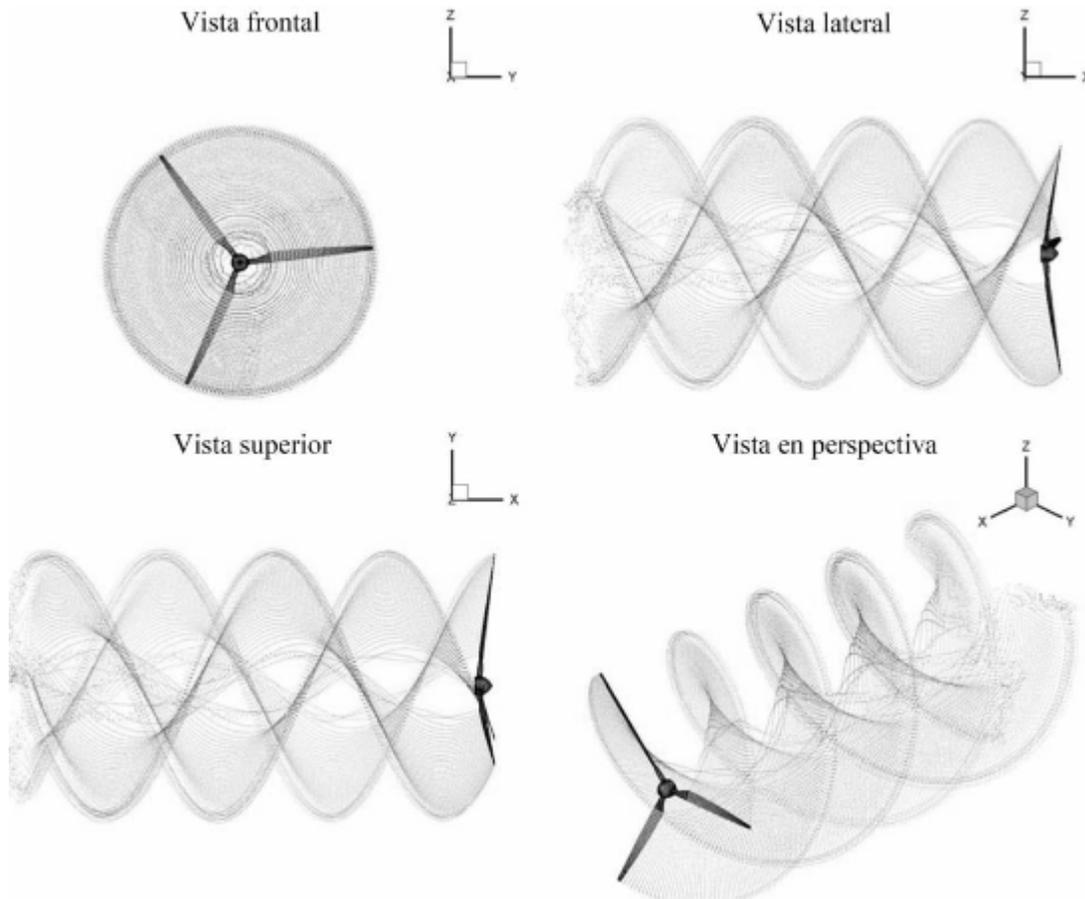
Los principales componentes que conforman a las turbinas de viento horizontales se muestran a continuación en la figura 3.4.



**Figura 3.4:** Partes básicas de una turbina de eje horizontal

Las condiciones ambientales en las que opera un generador eólico de eje horizontal son complejas, debido a que son puestos en operación en lugares en donde las velocidades del aire sean factibles para la aerogeneración, la presencia de vientos de gran amplitud y dirección cambiante, los efectos de turbulencia y de capa límite hacen que el estudio aerodinámico asociados a estos sistemas de generación de energía sea inherentemente complejo, es por ello, que muchos

estudios como el realizado por Cristian Gebhard et. Al se enfocan en el análisis del comportamiento aerodinámico de las turbinas de viento de eje horizontal [19]. En la figura 3.5 se puede observar el comportamiento de la turbina analizada en 19, así como su estela resultante.



**Figura 3.5:** Rotor y estela, en un caso con viento de frente

Por otro lado, recientes investigaciones, introducen a una nueva tecnología del desarrollo de los aerogeneradores de eje horizontal, que tendrá una participación notable en un futuro cercano, se trata de aerogeneradores equipados con dos turbinas de viento, lo cual hace más eficiente la captación de la energía

del viento comparados con los aerogeneradores de una sola turbina. En el año 2010, en la investigación realizada por Ehsan Mostery [20], se analiza el comportamiento dinámico de un aerogenerador de eje vertical con turbina doble como se observa en la figura 3.6 y se compara con otro de construcción sencilla.

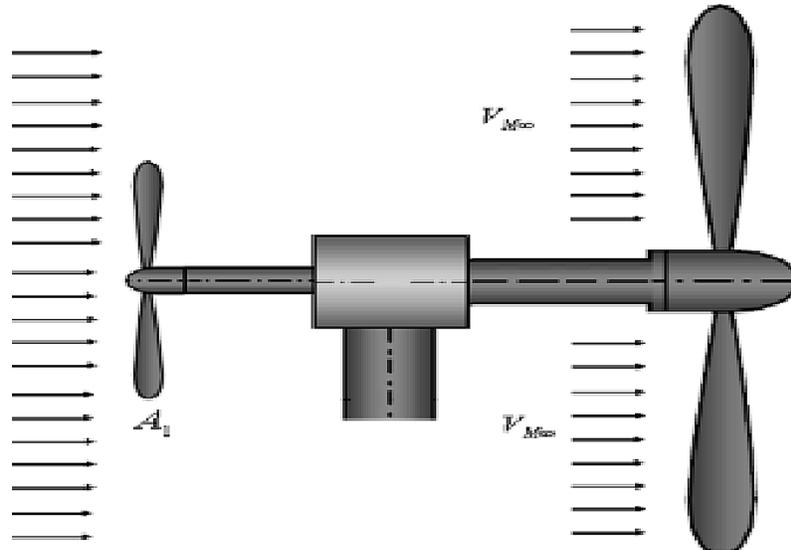


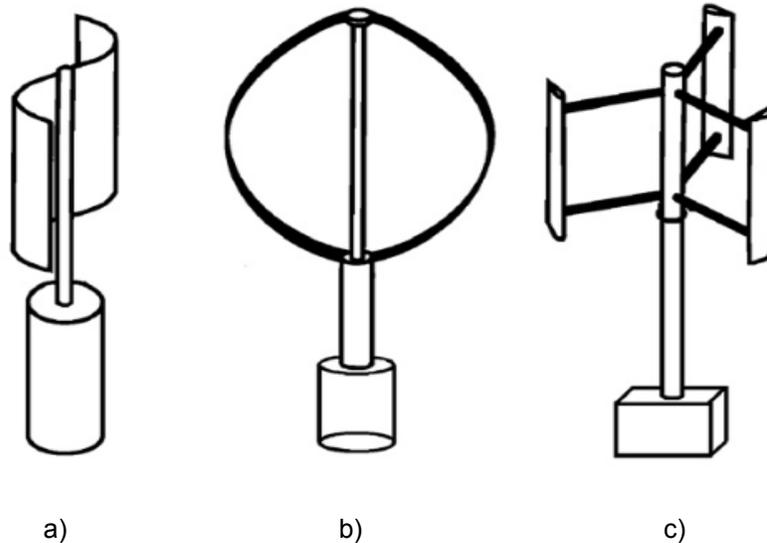
Figura 3.6: Turbina de viento dual

### 3.3 Turbinas de viento de eje vertical

Dentro de la clasificación de las turbinas de viento de eje vertical, podemos encontrar tres configuraciones diferentes, que son la turbina Savonius, la turbina Darrieus y la turbina tipo H. En la figura 3.7 se pueden observar muy bien las configuraciones básicas de estas turbinas.

Sin embargo, debido a la sencillez desde el aspecto de su construcción, a su excelente capacidad de captación del viento, así como su excelente torque

ocasionado por una diferencia en sus coeficientes de arraste [12], nos enfocamos a estudiar a fondo a la turbina Savonius.



**Figura 3.7:** Turbinas de viento de eje vertical: a) la turbina Savonius, b) la turbina Darrieus y en c) la turbina tipo H [2].

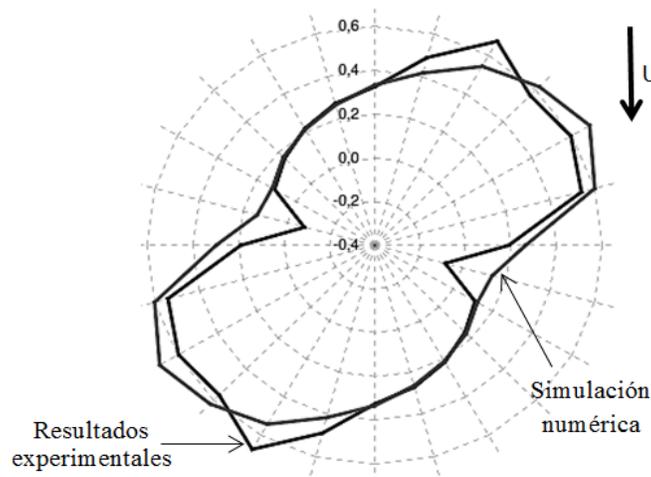
### 3.3.1 Turbina Savonius

El concepto de Savonius está basado en el principio desarrollado por Flettner. Utilizando un rotor que se formó mediante el corte de un cilindro en dos mitades a lo largo de su plano central, y desplazando las dos superficies semicilíndricas lado a lado a lo largo del plano de corte y así obtener una sección transversal con la similitud a una letra “S” [21] [22].

La turbina Savonius es de simple estructura, con buenas características de arranque, operable a relativamente bajas velocidades, y con la habilidad de captar

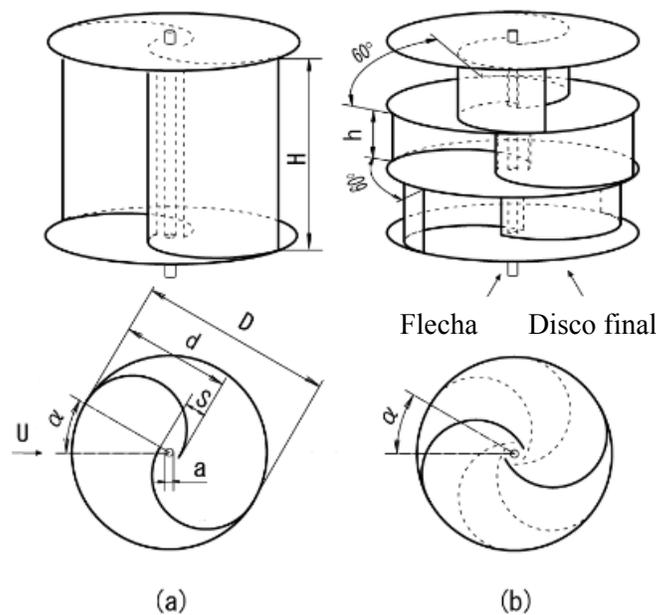
el viento en cualquier dirección. Su eficiencia aerodinámica es baja comparado con otro tipo de turbinas tal como la Darrieus [23].

En esta sección se muestran las investigaciones y avances más recientes realizados sobre el comportamiento de diferentes tipos de turbinas Savonius bajo diferentes condiciones de pruebas y análisis. Estos trabajos provienen de la necesidad de mejorar las limitantes que han presentado las turbinas Savonius a lo largo de la historia con la finalidad de obtener mejores rendimientos de dicha turbina. En el 2004, en la universidad de Valencia, Jean-Luc Menet et. Al, realizaron una simulación numérica del flujo sobre una turbina Savonius con flecha y dos discos contenedores en sus extremos, en donde se comparan los resultados obtenidos de la simulación contra datos experimentales (ver figura 3.8), particularmente, la predicción del coeficiente de torque con algunas diferentes configuraciones geométricas, se estudia además la influencia del eje central, y la influencia de la presencia de un chasis externo, y se investiga la influencia del número de Reynolds [24].



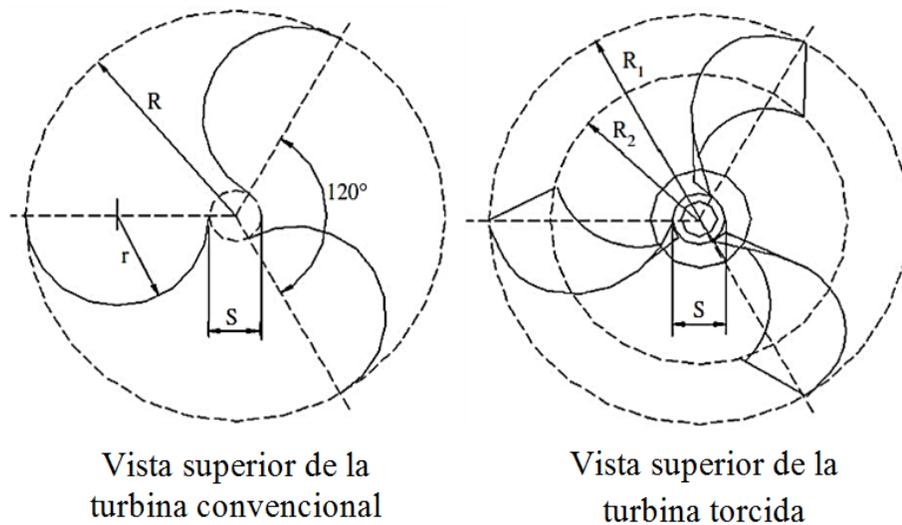
**Figura 3.8:** Coeficiente de torque calculado estáticamente

En el 2005, Tsutomu Hayashi et. Al, con la finalidad de mejorar el coeficiente de torque de la turbina Savonius convencional, realiza una investigación experimental en la universidad Tottori de Japón, basada en pruebas entre una turbina Savonius de tres etapas, en las que las etapas se encuentran desfasadas  $120^\circ$  entre ellas, y la turbina Savonius ordinaria de una sola etapa (ver figura 3.9). Se concluye con los resultados que la turbina Savonius convencional, aunque presenta un mayor torque, registra demasiadas fluctuaciones y torques negativos, sin embargo, la turbina de tres etapas con un torque  $1/6$  más reducido que la convencional tiende a ser más estable y sin presentar torques negativos. Otro dato obtenido es la reducción de aproximadamente un 25% del coeficiente de potencia en la turbina Savonius de tres etapas con respecto a la convencional de una sola etapa [22].



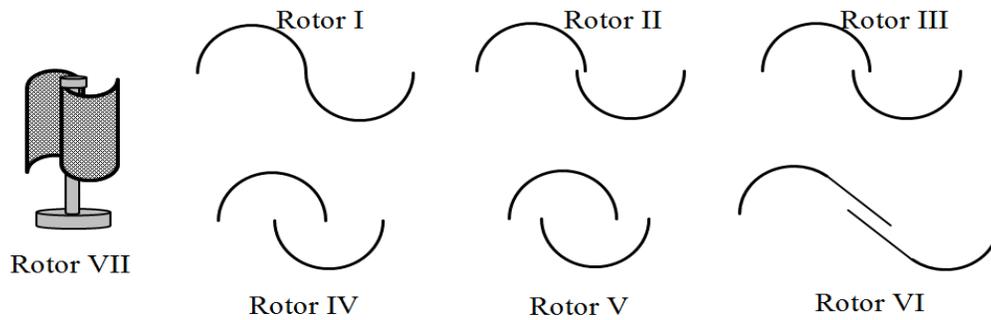
**Figura 3.9:** Geometría de las turbinas de prueba: (a) turbina de una sola etapa,  
(b) turbina de tres etapas

Dos años más tarde, U.K. Sana et. Al, realizaron un análisis experimental de una turbina Savonius de tres aspas con una torsión que varía de los  $0^\circ$  a los  $25^\circ$ , las aspas tenían una separación de  $120^\circ$  entre ellas, dicha turbina fue analizada a bajas velocidades en un túnel de viento, los resultados obtenidos del rendimiento fueron comparados con otra turbina también de tres aspas pero sin torsión alguna, ambas configuraciones geométricas de las turbinas se muestran en la figura 3.10. El análisis del rendimiento fue realizado en base a las características de arranque, el torque estático y la velocidad rotacional [25].



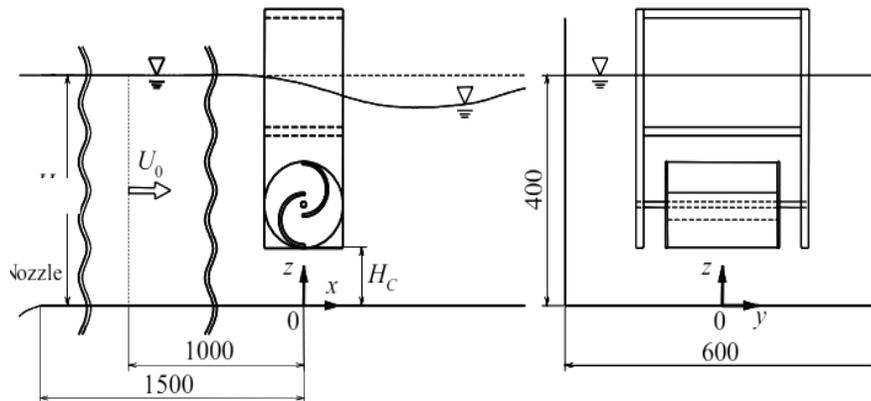
**Figura 3.10:** Diagrama esquemático de las tres aspas desarrolladas para las dos turbinas analizadas en [25]

En Mayo del 2007, J. Sargolzaei realiza la estimación del factor de potencia de siete diferentes turbinas Savonius mostradas en la figura 3.11, usando redes neuronales artificiales, que de acuerdo a los resultados obtenidos, incrementando el número de Reynolds, lleva a un incremento en la relación de potencia [12].



**Figura 3.11:** Configuraciones de las siete diferentes turbinas Savonius

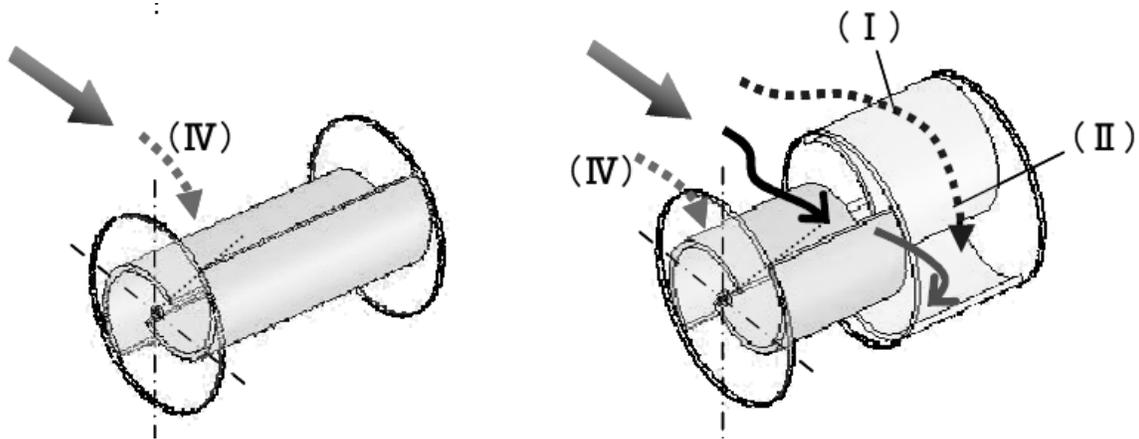
Siete meses después, Miyoshi Nakajima et. Al, realizaron una investigación y experimentación de dos nano turbinas hidráulicas amigables con el medio ambiente. Las cuales fueron estudiadas en un túnel de agua como se observa en la figura 3.12, tomando en cuenta los efectos de dos parámetros de instalación como la distancia entre la turbina y el fondo del túnel, la dirección de rotación de la turbina [26].



**Figura 3.12:** Sección de prueba experimental utilizado en [26]

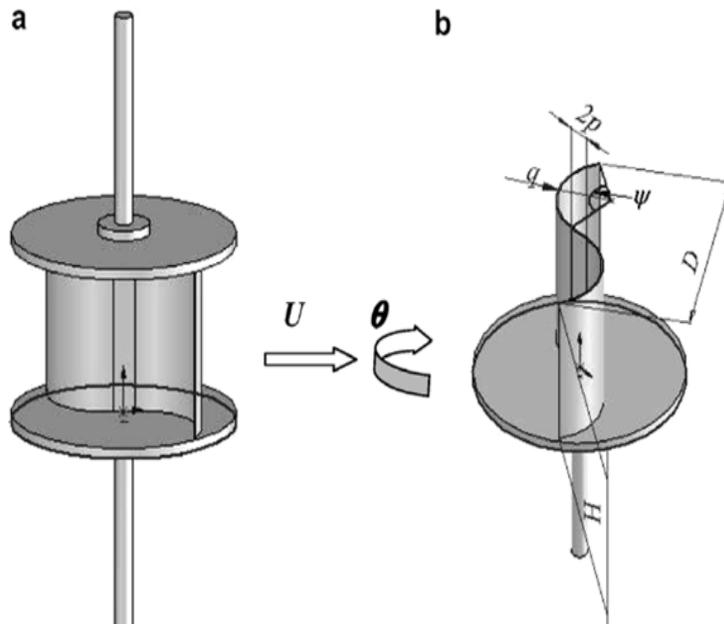
Para Marzo de 2008, nuevamente Miyoshi Nakajima et. Al, realizaron una investigación experimental de tres tipos diferentes de turbinas Savonius, en donde

se visualiza el comportamiento del flujo hidráulico sobre la sección central de la turbina en diferentes posiciones angulares, un ejemplo se muestra en la figura 3.13, esto es debido a que la mejora de las turbinas Savonius es también un importante desafío en la práctica con turbinas hidráulicas, y se concluye que un desfase de  $90^\circ$  de diferencia entre las hojas de las aspas mejora el rendimiento y el coeficiente de potencia cerca de un 10% como máximo [27].



**Figura 3.13:** Patrones de flujo hidráulico sobre las turbinas Savonius

M.A. Kamoji et. Al, seis meses después llevan a cabo una investigación experimental de turbinas Savonius modificadas sin eje en su centro y con dos discos en los extremos de la turbina, (ver figura 3.14), los diferentes experimentos se realizaron cambiando el solapamiento de las aspas, el radio, la altura, el ángulo del arco de las aspas, entre otros parámetros, con los que determinan las configuraciones geométricas adecuadas para obtener un alto coeficiente de potencia de 0.21 [28].



**Figura 3.14:** (a) Turbina Savonius modificada sin flecha entre dos discos terminales, (b)

Parámetros geométricos de la turbina Savonius Modificada

En Mayo del 2009, J. Sargolzaei et. Al, realizan el modelado y simulación de una turbina de viento Savonius usando redes neuronales artificiales para la estimación de la relación de potencia y torque. En su investigación, turbinas con diferentes configuraciones fueron situadas en un túnel de viento y probadas en repeticiones de 4 a 6 tiempos con la finalidad de reducir errores, las diferentes turbinas pueden apreciarse en la figura 3.11. Debido a que el número de Reynolds, tiene un efecto insignificante en la relación de potencia, entonces la relación de velocidad en la periferia es el parámetro de entrada más importante para la predicción con redes neuronales. También simularon tanto el factor de potencia como el factor de torque con diferentes relaciones de velocidades periféricas y diferentes ángulos de las aspas [29] y ocho meses después realizan

una investigación con la finalidad de predecir el rendimiento del torque como una función de la posición angular de la turbina Savonius utilizando la habilidad y precisión del método Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System (ANFIS) [30].

Para Noviembre de 2010, Intiaj Hassan et. Al, presentan un análisis computacional dinámico de fluidos de una turbina Savonius torcida como se muestra en la figura 3.15, usando como herramienta de simulación el software Flow-3D basándose en números de Reynolds promedios y ecuaciones de Navier-Stokes. Proponen el análisis con 1 en la velocidad del agua que incide en una turbina Savonius con un giro de 180° entre sus dos discos extremos y sin flecha en el centro, aplicando diferentes torques con la finalidad de observar la velocidad de rotación de la turbina [21].



**Figura 3.15:** Vista media de la turbina Savonius Torcida analizada en [8]

## Capítulo 4 Modelado computacional para crear un generador eólico.

Objetivo: En este capítulo se abordan tanto un modelado matemático como computacional dinámico de fluidos, con la finalidad de conocer el comportamiento de funcionamiento de la turbina Savonius analizada.

### 4.1 Modelado matemático de la energía cinética del viento

Se empieza analizando el comportamiento de aire que incide en la turbina, considerando que se comporta bajo una aceleración constante, la energía cinética de un objeto con masa  $m$  y velocidad  $v$  es igual al trabajo realizado  $W$  al desplazar el objeto desde el reposo hasta una distancia  $s$  bajo la influencia de una fuerza  $F$ , esto es:

$$E_c = Fs \quad (4.1)$$

De acuerdo a la ley de Newton tenemos que:

$$F = ma \quad (4.2)$$

Entonces,

$$E_c = mas \quad (4.3)$$

Por otro lado, determinamos la velocidad del objeto como función de su desplazamiento de la siguiente manera, sabemos que  $v = ds/dt$  y que  $a_c = dv/dt$ . Entonces

$$vdv = a_c ds \quad (4.4)$$

Suponemos que inicialmente cuando tenemos

$$\int_{v_0}^v v dv = \int_{s_0}^s a_c ds \quad (4.5)$$

Resolviendo la ecuación 4.5

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{1}{2}v_0^2 = a_c(s - s_0) \quad (4.6)$$

Despejando  $v$  de la ecuación 4.6 obtenemos la velocidad en función del desplazamiento del objeto

$$v^2 = v_0^2 + 2a_c(s - s_0) \quad (4.7)$$

Sin embargo, como suponemos que partimos de una posición inicial igual a cero,  $s_0 = 0$  y desde el reposo  $v_0 = 0$ , y al despejar la aceleración constante

$$a_c = \frac{v^2}{2s} \quad (4.8)$$

Al sustituir la ecuación 4.8 en la 4.3 obtenemos la energía cinética del viento como objeto de análisis

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.9)$$

La potencia del viento está dada por la relación de cambio de su energía, esto es:

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2}v^2 \frac{dm}{dt} \quad (4.10)$$

En donde el flujo másico  $dm/dt$  está dado por

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} \quad (4.11)$$

En donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área de barrido de la turbina, y como sabemos que  $dx/dt = v$

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av \quad (4.12)$$

Es por esto que la ecuación 4.10 puede reescribirse como:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4.13)$$

La ecuación 4.13, se interpreta como la potencia total del aire, en función de su velocidad lineal de incidencia, el área sobre el cual incide y la densidad propia del fluido, sin embargo, en 1919 el físico Albert Betz concluyó que solo aproximadamente un 16/27 (59.3 %) de la energía cinética del viento puede ser transformada en energía mecánica por medio de una turbina, para el caso de las turbinas de eje horizontal mas eficientes, esto es llamado coeficiente de potencia máxima.  $C_{Pmax} = 0.59$  [31].

Es por lo anterior que para obtener la potencia total que puede aportar una turbina de viento a un sistema de aerogeneración, la ecuación 4.13 se modifica como sigue:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (4.14)$$

Quedando 4.14 como la ecuación que nos proporciona la potencia teórica total obtenida por una turbina de viento.

La mayoría de las investigaciones describen al  $C_p$  de una turbina como el despeje de la misma en la ecuación 4.14, como sigue:

$$C_p = P_v / \left( \frac{1}{2} \rho A v^3 \right) \quad (4.15)$$

Pero existen algunos trabajos en los que analizan minuciosamente dicho coeficiente, con la finalidad de dejarlo en función de otras variables, en el caso de E. Vaahedi et. Al [32] desarrolla una ecuación para el  $C_p$  que esta en función de

seis variables geométricas de la turbina. Por otro lado, en [33] se propone una ecuación mas sencilla, la cual se describe a continuación:

$$C_p(\lambda) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda} - 9.06 \right) e^{-21 \left( \frac{1}{\lambda} - 0.035 \right)} + 0.0068 \lambda \quad (4.16)$$

En donde  $\lambda$  es el coeficiente de velocidad de una turbina (*Tip Speed Ratio*) por sus siglas en inglés, y es una relación dada por la velocidad de la periferia de la turbina, entre la velocidad lineal del fluido que incide en la turbina.

## **4.2 Modelado computacional dinámico**

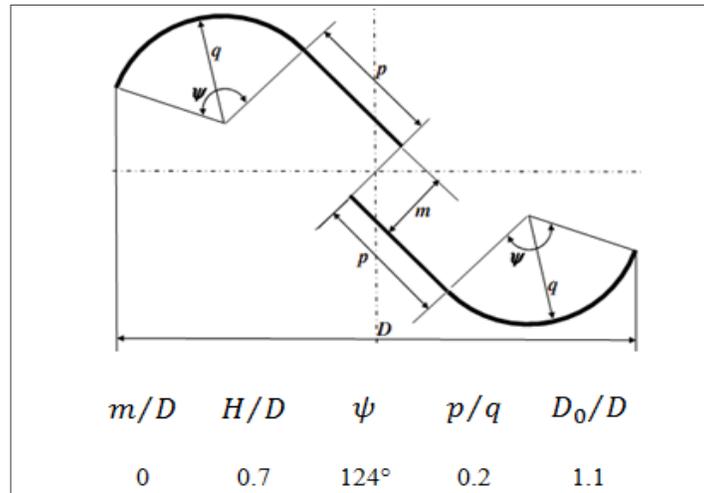
El modelado computacional dinámico de fluidos es una herramienta potencial para la solución de problemas de sistemas altamente complejos, para los cuales las soluciones analíticas simples e intuitivas no están fácilmente disponibles.

Para llevar a cabo el modelado computacional dinámico de fluidos, primeramente desarrollamos los modelos sólidos tridimensionales de los diferentes tipos de turbinas a analizar, tomando como base, las configuraciones geométricas ya descritas y analizadas por otros autores que han buscado mejorar el rendimiento aerodinámico de dichas turbinas, utilizando algoritmos de optimización para obtener las relaciones dimensionales adecuadas mejorando así sus coeficientes de potencia.

La primera de las configuraciones geométricas a modelar para posteriormente ser analizada, es la de M.A. Kamoji et. Al [28], el cual obtiene un

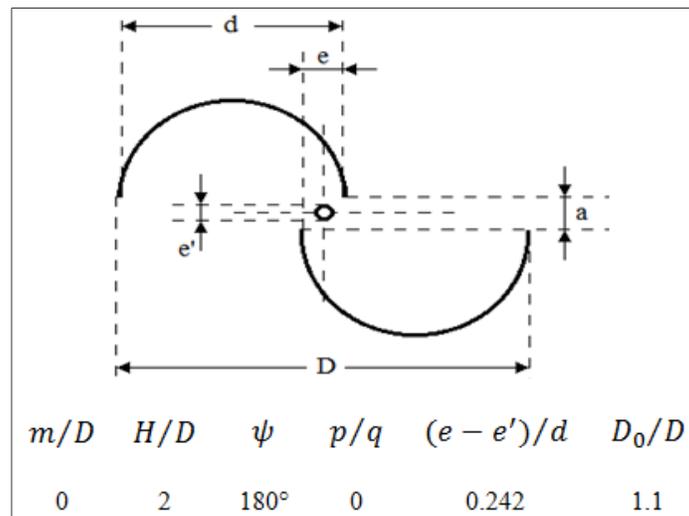
$C_{Pmax} = 0.21$  , como mejor resultado de todas las relaciones geométricas que este utilizó para hacer variaciones en las comparaciones del rendimiento aerodinámico.

En la figura 4.1, se muestra tanto el perfil bidimensional como las relaciones geométricas establecidas para el diseño del sólido en tres dimensiones, una previa imagen de esta turbina es la mostrada en la figura 3.14.



**Figura 4.1:** Perfil y relaciones geométricas por M.A. Kamoji et. Al

El segundo perfil utilizado es el que se muestra en la figura 4.2.

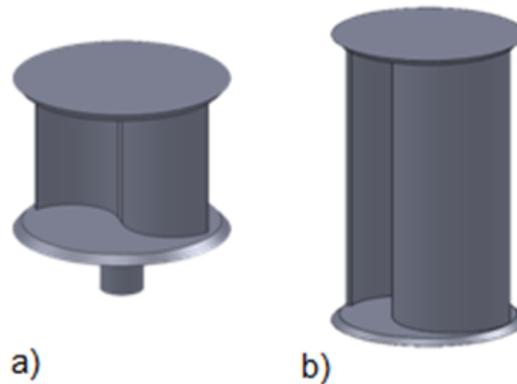


**Figura 4.2:** Perfil y relaciones geométricas por J.L. Menet et. Al

El perfil geométrico y las relaciones mostradas en la figura 4.2 fueron propuestas en una investigación paramétrica realizada por J.L. Menet et. Al [24],

configuración con la que sus resultados arrojan un  $C_{Pmax}=0.30$  aproximadamente.

Los perfiles presentados previamente en la figuras 4.1 y 4.2 son modelados en el software de diseño SolidWorks© 2010 y se muestran en la figura 4.3, con las siguientes dimensiones, para el caso de la turbina Savonius sin flecha propuesta por M.A. Kamoji son:  $D = 21.3$  mm,  $H = 15.9$  mm,  $\psi = 124^\circ$ ,  $p = 1.1$  mm,  $q = 5.7$  mm y  $D_0 = 25$  mm. Para el caso de la turbina Savonius con flecha propuesta por J.L. Menet tenemos:  $D = 22.72$  mm,  $H = 45.45$  mm,  $\psi = 180^\circ$ ,  $e = 7.48$  mm,  $e' = 4$  mm,  $d = 14.4$  mm, y  $D_0 = 25$  mm, en donde:  $m$  representa el desfaseamiento entre las aspas (mm),  $H$  es la altura de la turbina (mm),  $\psi$  es el ángulo del arco de las aspas ( $^\circ$ ),  $p$  es la parte recta de cada aspa (m),  $q$  es el radio del arco de las aspas (m), y  $D_0$  es el diámetro de los platos (m).



**Figura 4.3:** Modelos 3D de las turbinas Savonius propuestas. a) Turbina Savonius convencional sin flecha, b) Turbina Savonius convencional con flecha

Otro parámetro importante que ha sido objeto de estudio en investigaciones recientes es la torsión de este tipo de turbinas, es decir, realizarles un giro sobre

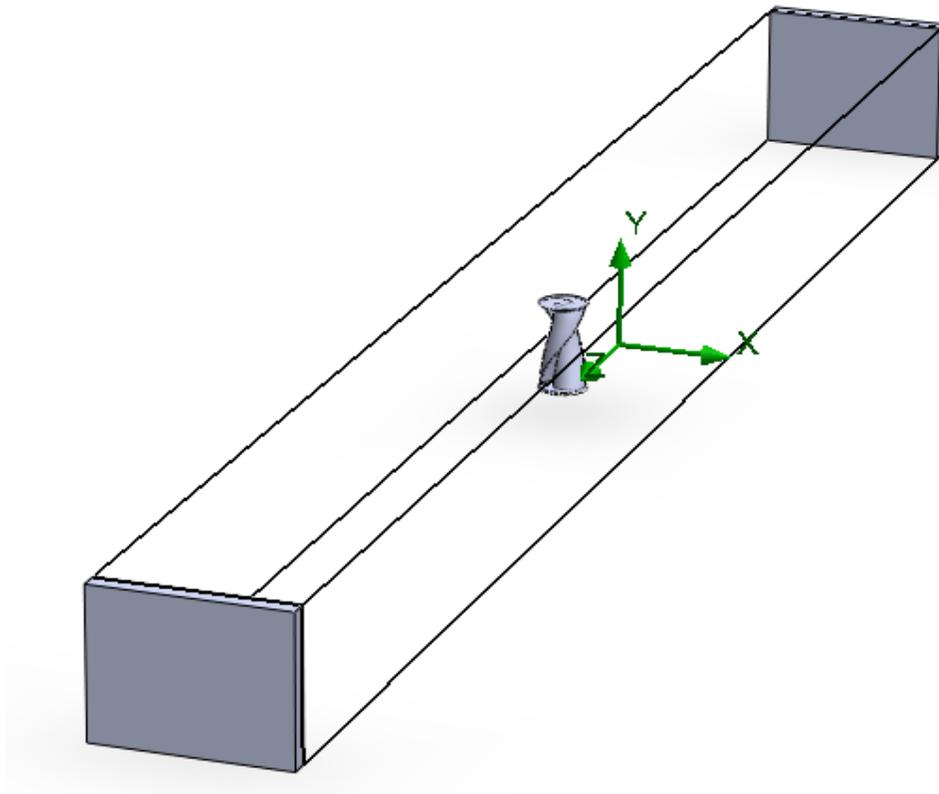
su propio eje pero manteniendo el mismo perfil, según los resultados numéricos de investigaciones [21][34][35], el efecto de torsión de las turbinas Savonius sobre su propio eje, mejora el rendimiento, debido a que se limitan o incluso eliminan las inversiones de torque dadas en la turbinas Savonius convencionales en ciertas posiciones angulares en su funcionamiento. Es por ello, que para este análisis, proponemos la torsión de la turbina savonius con flecha, debido a que es la que mantiene su perfil a lo largo de la altura de su eje, caso que no se puede aplicar a la primera turbina por el hecho de ser de muy baja altura por las relaciones geométricas establecidas con la que se ha modelado. En la figura 4.4 podemos observar el modelo 3D resultante de esta nueva turbina Savonius.



**Figura 4.4:** Turbina Savonius con flecha torcida sobre su propio eje

Con el hecho de tener ya los modelos en 3D de cada una de las turbinas a analizar (los planos de construcción se muestran en la sección A de los anexos), se establecen las condiciones del análisis computacional, el cual es realizado con la paquetería Flow Simulations del Software SolidWorks© 2010, dicho programa ofrece una fiabilidad en la resolución de estos problemas y la precisión de sus

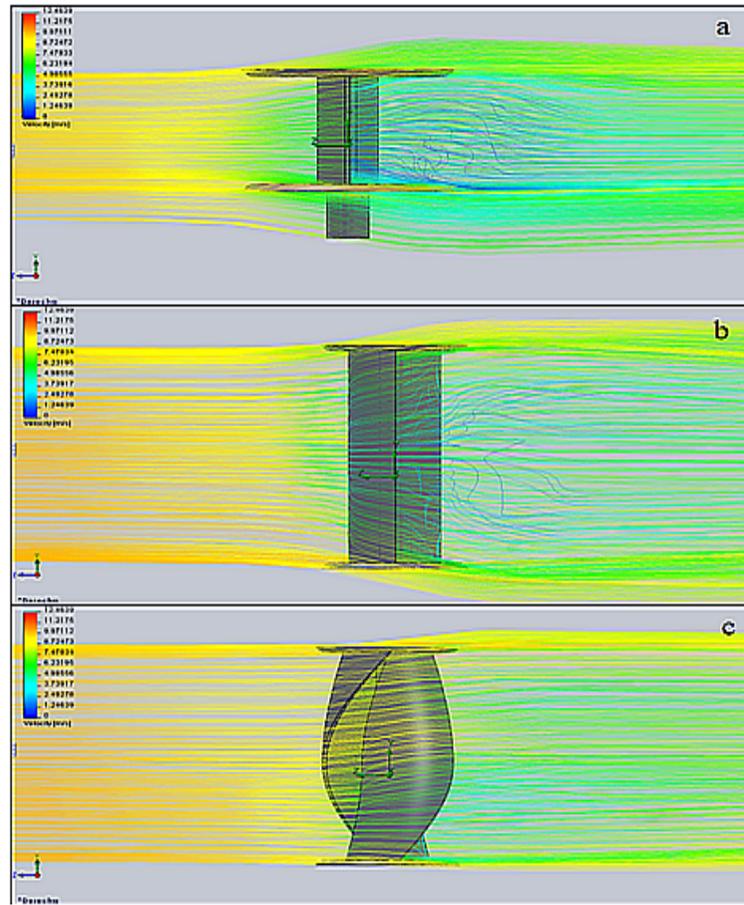
resultados, pues es una gran herramienta de ayuda en muchas áreas de diseño con diferentes aplicaciones, muestra de ello son los trabajos realizados en [36] y [37] . Se establece un flujo laminar en un túnel de viento de 100x100x1,000 mm, en la que las turbinas a analizar se sitúan exactamente a la mitad de la longitud de dicho túnel, como se muestra en la figura 4.5.



**Figura 4.5:** Disposición de la turbina de Savonius torcida en el túnel de viento para su análisis

Con la finalidad de visualizar de la manera más práctica posible, el comportamiento del flujo incidente en cada una de las turbinas Savonius, se configura el software para el análisis con un total de 1,500 líneas de flujo de aire a una velocidad de entrada de 10 m/s (36 km/h aproximadamente), una presión ambiental a la salida de 101,325 pascales, y a una temperatura de 293.2 grados

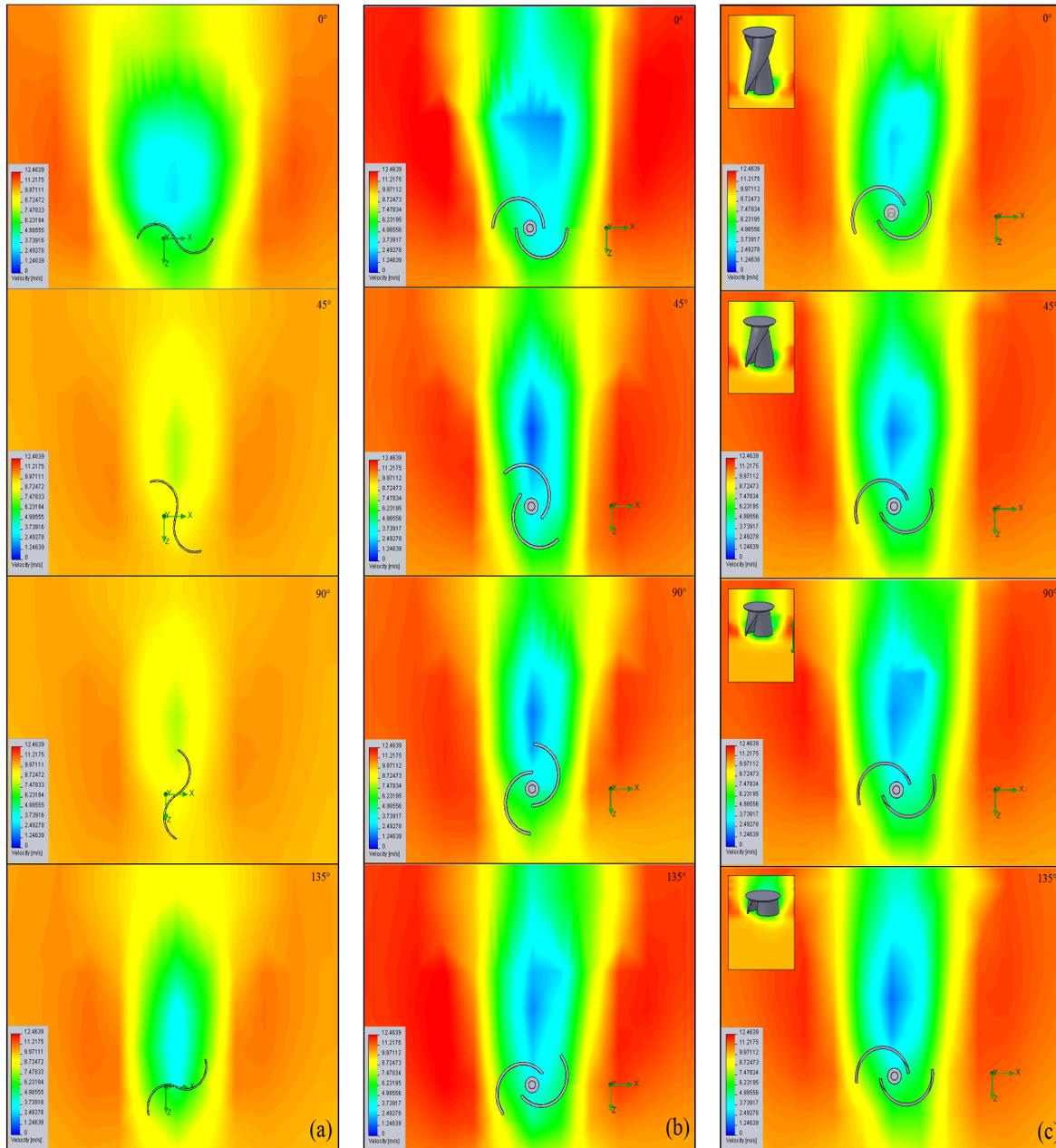
Kelvin (20°C aproximadamente). En la figura 4.6 podemos observar el comportamiento de las líneas de flujo de viento sobre cada una de las turbinas Savonius bajo las mismas condiciones de análisis.



**Figura 4.6:** Comportamiento del flujo incidente en cada una de las turbinas Savonius analizadas, a) turbina Savonius sin flecha, b) turbina Savonius con flecha, c) turbina Savonius torcida con flecha.

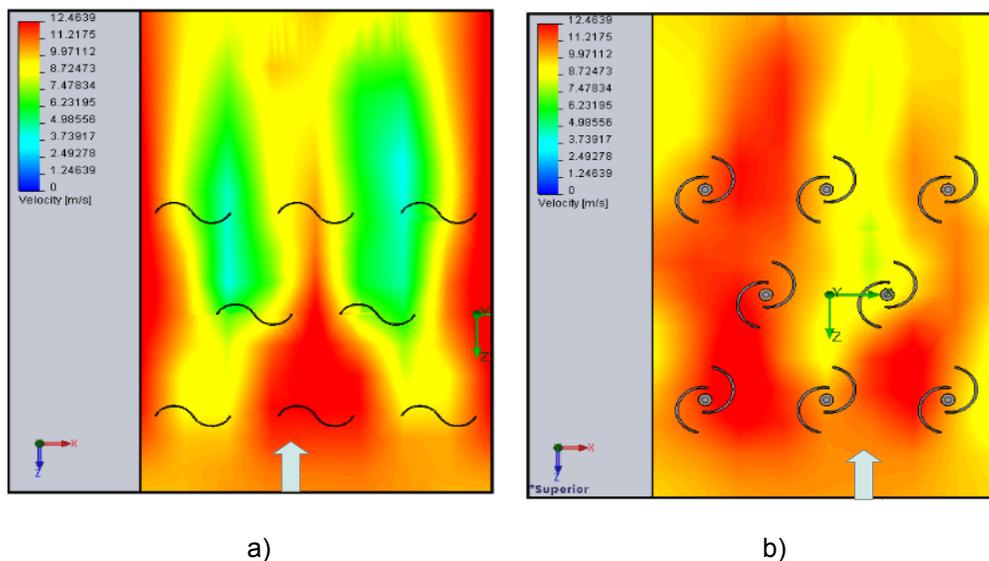
A simple vista, en la figura 4.6, la turbina Savonius torcida con flecha es la que presenta una menor turbulencia residual al paso del flujo de aire que incide en toda su sección transversal, sin embargo, debido a que no podemos apreciar fácilmente las magnitudes de dichas disminuciones de velocidad del fluido que

provocan la turbulencia residual, realizamos una análisis más completo en el que variamos la posición angular de cada turbina como se muestra en la figura 4.7.



**Figura 4.7:** Comportamiento del viento incidente sobre las diferentes turbinas Savonius en distintas posiciones.

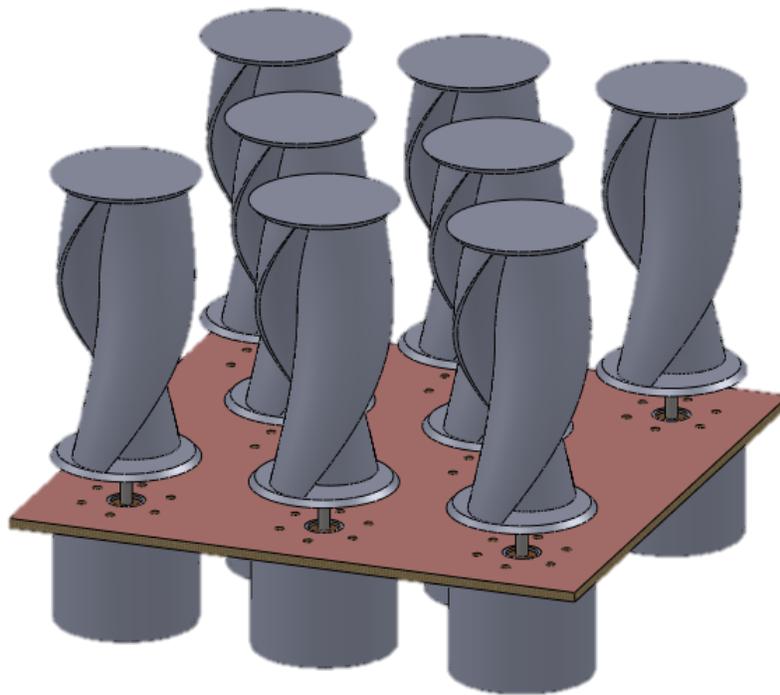
Las diferentes posiciones de las turbinas Savonius contenidas en la figura 4.7 muestran la máxima reducción en la velocidad del aire al pasar sobre la sección transversal de cada turbina. Es importante aclarar que la turbulencia generada por la turbina Savonius sin flecha y la turbina Savonius con flecha se distribuye a lo largo de aproximadamente un 90% de su altura y en el caso de la turbina Savonius torcida esta turbulencia solo se presenta en un 35% de su altura aproximadamente. Es por tal motivo que se propone la turbina Savonius torcida para un nuevo análisis contra la turbina Savonius sin flecha, la cuál presenta una mínima turbulencia en su posición de 45° y 90°. Este nuevo y último análisis computacional dinámico se realiza sobre un arreglo modular de ocho turbinas dispuestas en una posición de 3 filas, de 3, 2 y 3 turbinas respectivamente, la configuración de este módulo se propone de esta manera para permitir que el viento incida con la mayor intensidad posible en todas las turbinas. El resultado de dicho análisis se muestra en la figura 4.8.



**Figura 4.8:** Comparación del comportamiento del modulo de turbinas a) Turbinas Savonius convencionales sin flecha, b) Turbinas Savonius torcidas

El comportamiento del aire incidente sobre el módulo de turbinas Savonius sin flecha mostrado en la figura 4.8(a), en la cual se aprecia por el color azul una pérdida del 60% en la velocidad del viento incidente sobre la última fila de turbinas, por lo tanto esto trae como consecuencia una pérdida considerable en la velocidad de giro de las últimas turbinas, debido a la poca velocidad del viento incidente en estas. Para el caso del módulo con turbinas Savonius torcida (figura 4.8 (b)), la reducción de velocidad del aire a su paso por cada una de las turbinas es mínima (26%) y en una sola sección.

La interpretación de estos resultados sugieren un mejor comportamiento de las turbinas Savonius torcidas, es por ello que del modelado 3D del módulo de turbinas Savonius torcidas (Figura 4.9), procedemos a la manufactura de las turbinas seleccionadas.

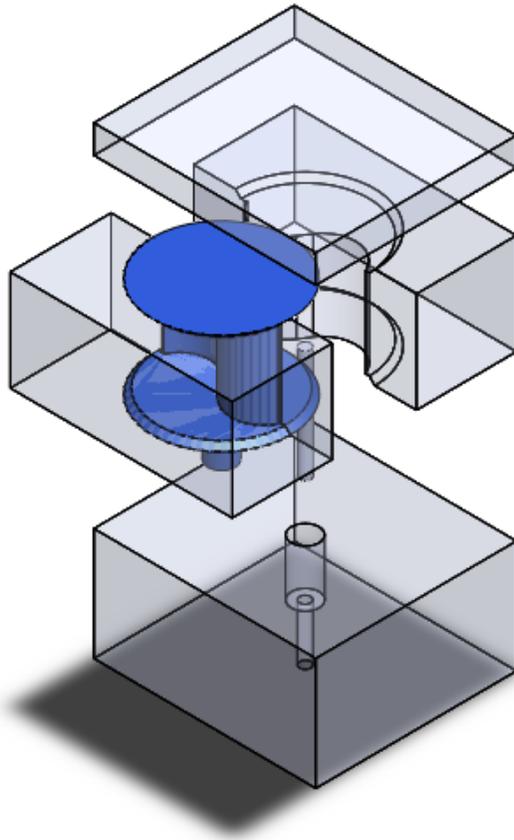


**Figura 4.9:** Modelo 3D del módulo de turbinas Savonius torcidas

### ***4.3 Proceso de manufactura y pruebas experimentales del módulo de turbinas Savonius Torcidas***

Debido a los resultados obtenidos en los análisis computacionales previamente realizados, comenzamos con la búsqueda de opciones para la fabricación de los módulos de aerogeneradores correspondientes.

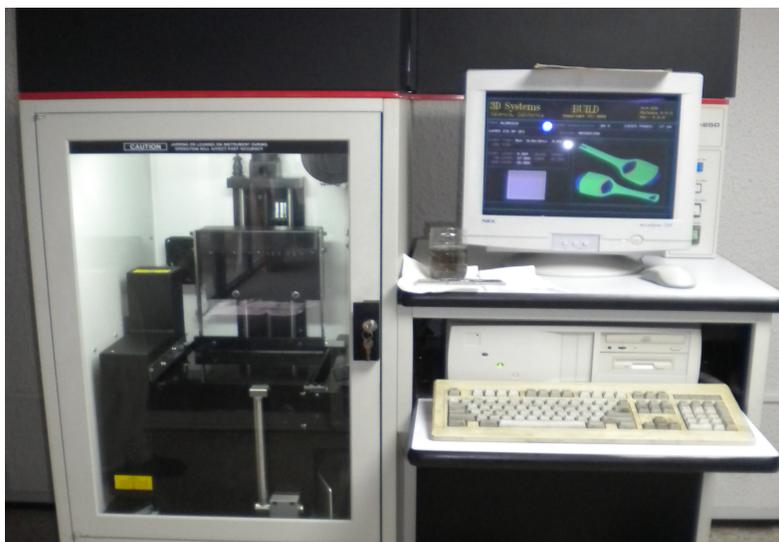
Nuestra primera opción fué pensar en el proceso de manufactura por inyección de plástico, en la cual se necesita de moldes complejos como se muestra en la figura 4.10, y de una máquina inyectora de plástico a la presión necesaria para evitar burbujas de aire en el interior del molde.



**Figura 4.10:** Explosionado de molde para turbina savonius sencilla

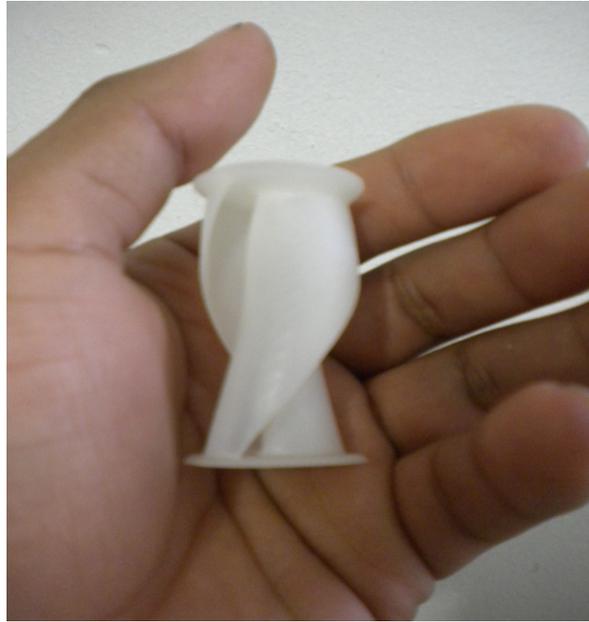
Sin embargo, para el caso de las turbinas Savonius torcidas, la generación del molde para su fabricación, resulto demasiado complejo incluso en el proceso del modelado en 3D, y para el proceso de maquinado del mismo. Cabe hacer mención que aunque se hubiera llegado a poder generar dicho molde para la inyección de plástico de esta turbina torcida, el procedimiento de desmoldeo impediría extraer la pieza del molde sin causarle daño o fractura alguna.

Debido a los problemas antes mencionados en el proceso de manufactura de las turbinas Savonius torcidas propuesto inicialmente, se buscaron alternativas de solución dentro de las cuales se encontró la impresión 3D como la alternativa factible para llevar a cabo dicha tarea, para ello se buscaron empresas dentro del país como D+I PROYECTOS (<http://www.Di-proyectos.com>), IDEAS SOLIDAS (<http://www.ideassolidas.com>), y Rapid Prototyping (<http://www.robtec.com>), las cuales son empresas que cuentan con la tecnología para realizar este tipo de maquinado. Siendo Rapid Prototyping elegida a nuestro criterio, ya que cuentan con una impresora MJM Multijet Modeling como se muestra en la figura 4.11.



**Figura 4.11:** Impresora 3D MJM Multijet Modeling

La impresora MJM Multijet Modeling trabaja con una precisión que permite una tolerancia de  $\pm 0,2\%$ , el material propuesto para la impresión es resina Visijet SR200. Como resultado de la tecnología aplicada por parte de la empresa Rapid Prototyping tenemos la Turbina Savonius torcida que se muestra en la figura 4.12.



**Figura 4.12:** Turbina Savonius torcida construida

### **4.3.1 Ensamblaje del módulo de aerogeneradores con turbinas Savonius**

Como el diseño prototipo de las turbinas, fué realizado para su montaje en micromotores de corriente directa, por su gran aplicación en reproductores de CD y reproductores de DVD entre otros, por su tamaño, su peso ligero, y así como su bajo costo, utilizamos el motor de CD RF-310T-11400 (figura 4.13) como generadores de corriente en nuestros módulos de aerogeneradores, en el anexo C se encuentran las especificaciones de dicho motor.



**Figura 4.13:** Micromotor de CD utilizado como generador de corriente [38]

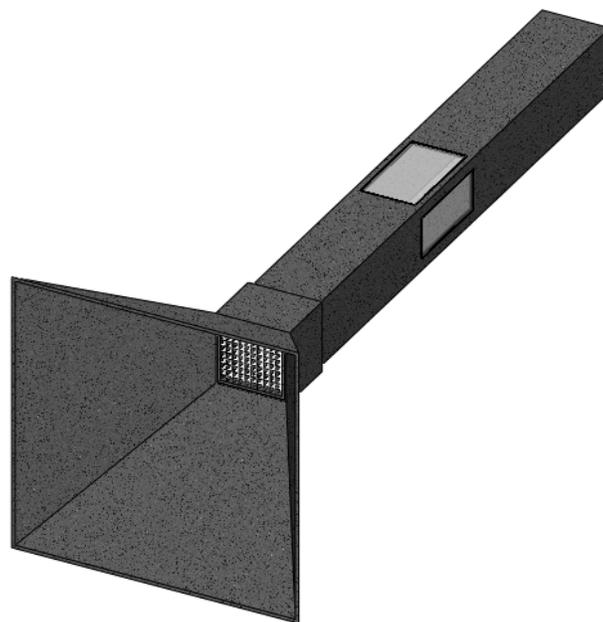
Como parte de la placa base sobre la cual se montaron los generadores con sus turbinas empotradas en sus respectivos ejes fué una placa de cobre para hacer circuitos electrónicos de 100 x 100 mm, teniendo así finalmente el módulo de aerogeneradores mostrado en la figura 4.14.



**Figura 4.14:** Módulo de aerogeneradores con turbinas Savonius torcidas

### 4.3.2 Pruebas experimentales

Para llevar a cabo los análisis experimentales del comportamiento de la turbulencia residual realizamos el diseño en CAD y posteriormente la construcción de un túnel de viento adecuado a las medidas sobre las cuales fueron realizados los análisis de flujo computacional. El diseño en CAD del túnel de viento se muestra en la figura 4.15.



**Figura 4.15:** Modelo en CAD del túnel de viento

Este diseño está compuesto por una tovera que concentra el flujo de viento en la sección central del túnel, una rejilla que se encarga de eliminar la turbulencia del flujo de viento en la entrada del túnel, teniendo así un flujo laminar sobre la sección de análisis, además consta de dos mirillas rectangulares de medidas adecuadas posicionadas en la parte superior y lateral derecha para visualizar el comportamiento del flujo sobre la turbina o el módulo de turbinas

Savonius. El túnel de viento en proceso de construcción, algunas herramientas para fabricarlo, así como parte de los equipos para el análisis experimental se muestra en la figura 4.16.



**Figura 4.16:** Construcción del tunel de viento

Para llevar a cabo la medición experimental del flujo de viento, utilizamos un anemómetro sencillo LA CROSSE TECHNOLOGY (figura 4.17), el cual tiene la capacidad de medir la velocidad del viento en mph, Km/h, m/s o en nudos, cuenta además con una visualización de la temperatura del viento en grados Fahrenheit ó en grados Centígrados, entre otras características.



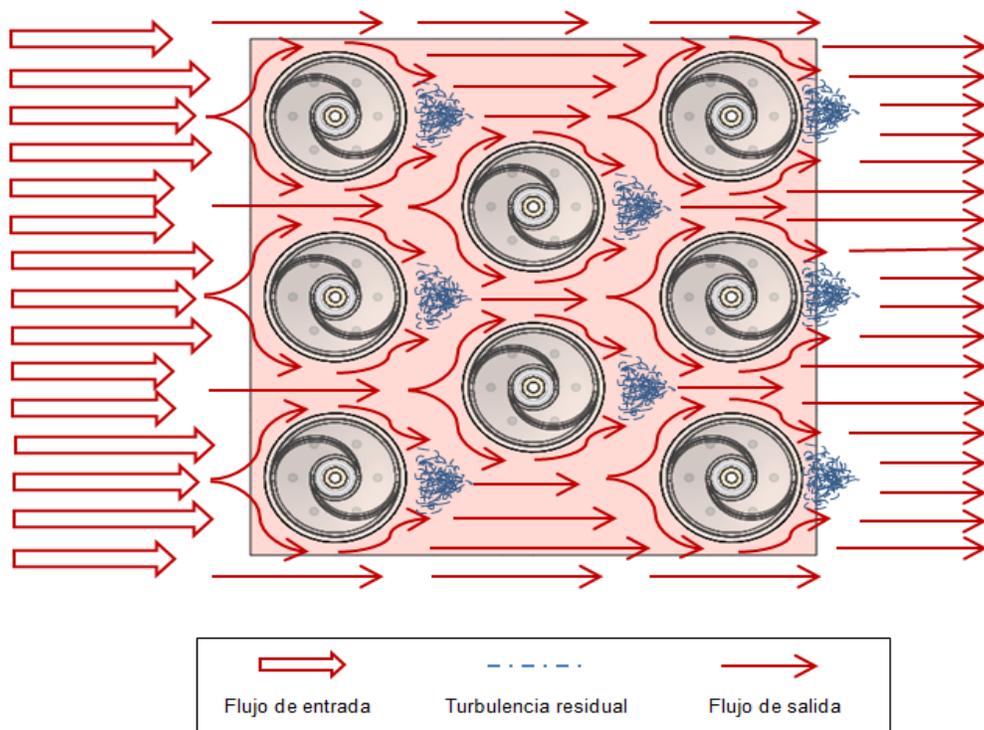
**Figura 4.17:** Anemómetro LA CROSSE utilizado en las pruebas experimentales

### 4.3.3 Resultados

Dentro de los resultados obtenidos en el análisis experimental, se encuentra la visualización de la turbulencia residual de cada una de las turbinas Savonius ubicadas en su respectivo módulo, la pruebas fueron llevadas a cabo con el túnel de viento construido, con un flujo de viento laminar de 10 m/s medido con el anemómetro mostrado en la figura 4.17, y para visualizar el flujo de viento se utilizó hielo seco proporcionado a bajo costo por la empresa “*Aplicaciones industriales de hielo seco S.A. De C.V.*” (<http://www.aplicaciones-hieloseco.com>).

En la figura 4.18, se visualiza de manera gráfica con flechas los resultados obtenidos en la experimentación, se puede observar que aunque existe una turbulencia residual pequeña al final de cada una de las turbinas, esta turbulencia no afecta en gran parte la velocidad del flujo incidente en la turbina posterior. El comportamiento representado en la figura 4.18 se muestra en las fotografías

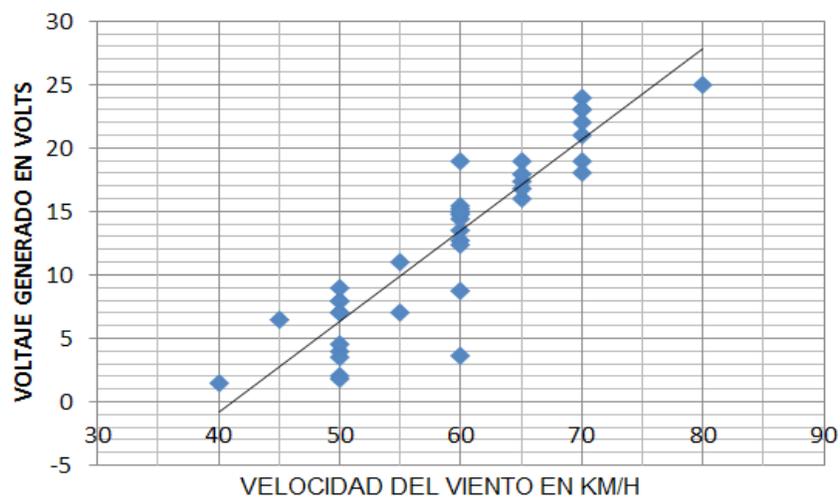
tomadas en la experimentación, sin embargo, debido a las restricciones de luz dentro del túnel de viento, no es posible apreciar en las imágenes el comportamiento de flujo incidente en todas la turbinas ubicadas en el módulo. Dichas fotografías que datan de este experimento se encuentran en el anexo B. A partir de la figura B5 hasta la B8, las fotografías contienen unas flechas de referencia para apreciar la dirección del flujo de viento incidente en las turbinas.



**Figura 4.18:** Comportamiento experimental del flujo de viento incidente en el módulo de turbinas Savonius torcidas

Además de los resultados experimentales del flujo de viento obtenido, la generación de energía eléctrica es otro aspecto de vital importancia que requiere de observación y medición. Para llevar a cabo esto inicialmente se instaló el módulo de aerogeneradores Savonius torcidos sobre la parte central del cofre de

una un automóvil de la línea Hyundai Atos modelo 2003. La medición de la velocidad del viento se realizó con el anemómetro que se utilizó en el túnel de viento, y con la ayuda de un multímetro se obtuvieron los datos del voltaje generado en función de la velocidad del viento incidente en el módulo de turbinas Savonius torcidas. En la figura 4.19 se observa el comportamiento del voltaje generado por el módulo de aerogeneradores construido en el que la conexión fué en serie entre cada uno de los motores.



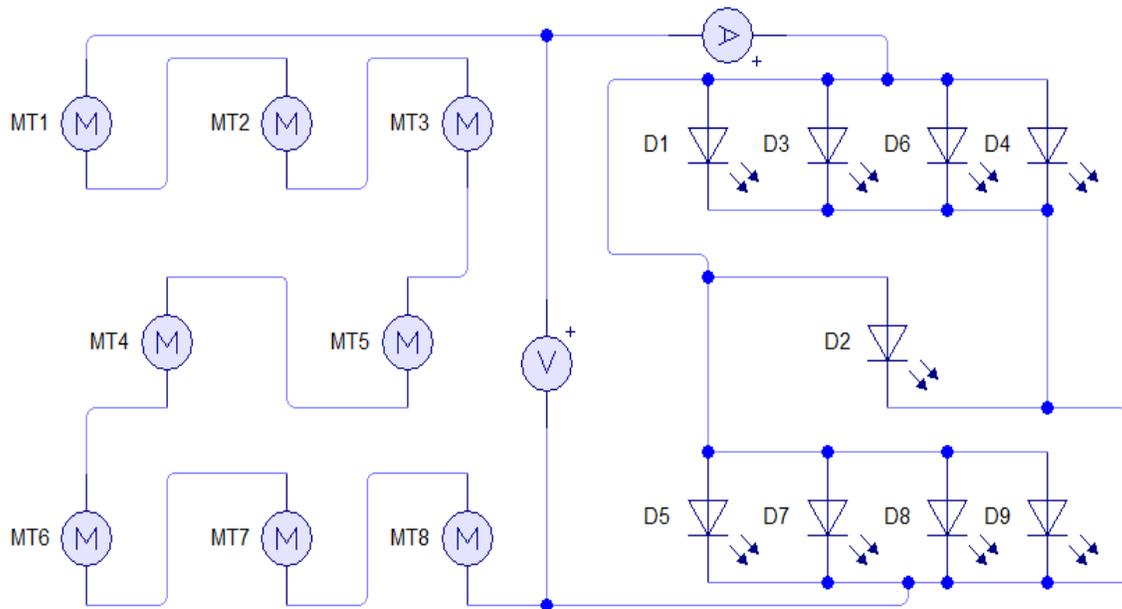
**Figura 4.19:** Voltaje generado con respecto a la velocidad lineal del viento incidente sobre el módulo de microturbinas Savonius

Sin embargo, debido a la falta de una carga sobre la cuál se puedan hacer mediciones de corrientes y por la dificultad de la adquisición de los datos, se procede a buscar otras alternativas que nos permitan obtener datos mas confiables. Entre estas alternativas para solucionar la problemática, para el aprovechamiento de la energía del viento por parte de las turbinas se sustituye la instalación del módulo de aerogeneradores sobre un automovil, por una bomba de aire de flujo radial empotrado al túnel de viento como se muestra en la figura 4.20.



**Figura 4.20:** Montaje de la bomba de aire con el túnel de viento

Además se le conecta al módulo de los aerogeneradores una lámpara de 9 diodos Leds con el objetivo de tener una carga y así realizar la medición de corriente. Un diagrama eléctrico de la primera configuración de conexión se muestra en la figura 4.21.



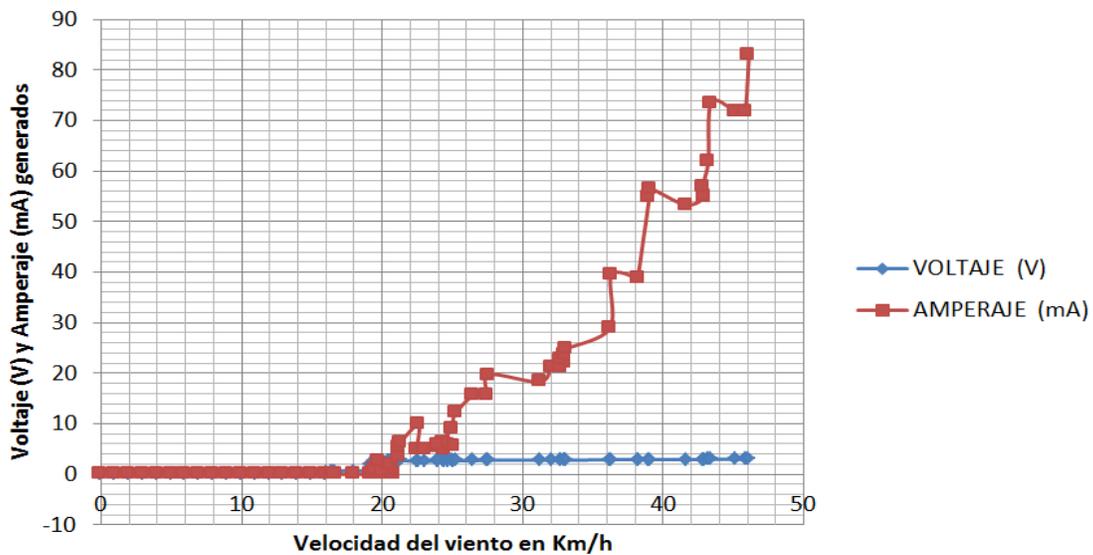
**Figura 4.21:** Primera conexión del módulo de aerogeneradores con una lámpara de 9 leds como carga eléctrica del sistema

Para llevar a cabo las mediciones de voltaje y corriente correspondientes al circuito mostrado en la figura 4.21 se hizo uso de equipos como: el anemómetro para la medición de la velocidad del viento, y dos multímetros digitales configurados en la medición de voltaje y corriente (ver figura 4.22).



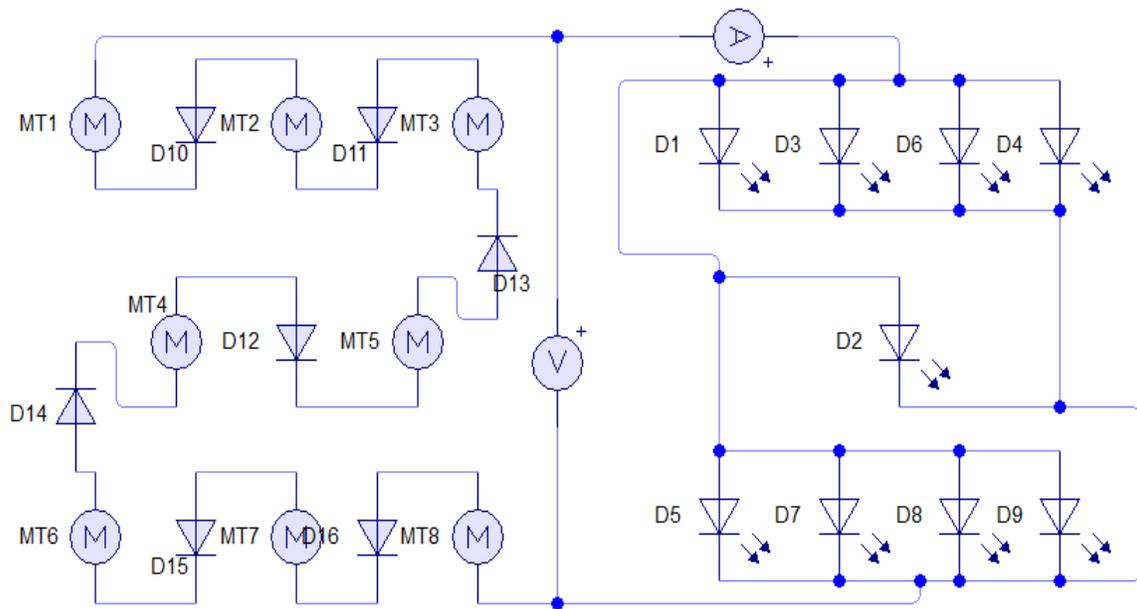
**Figura 4.22:** Equipos de medición ocupados en la adquisición de datos

Los resultados obtenidos de la experimentación con las conexiones de la figura 4.21 se pueden observar en la gráfica mostrada en la figura 4.23



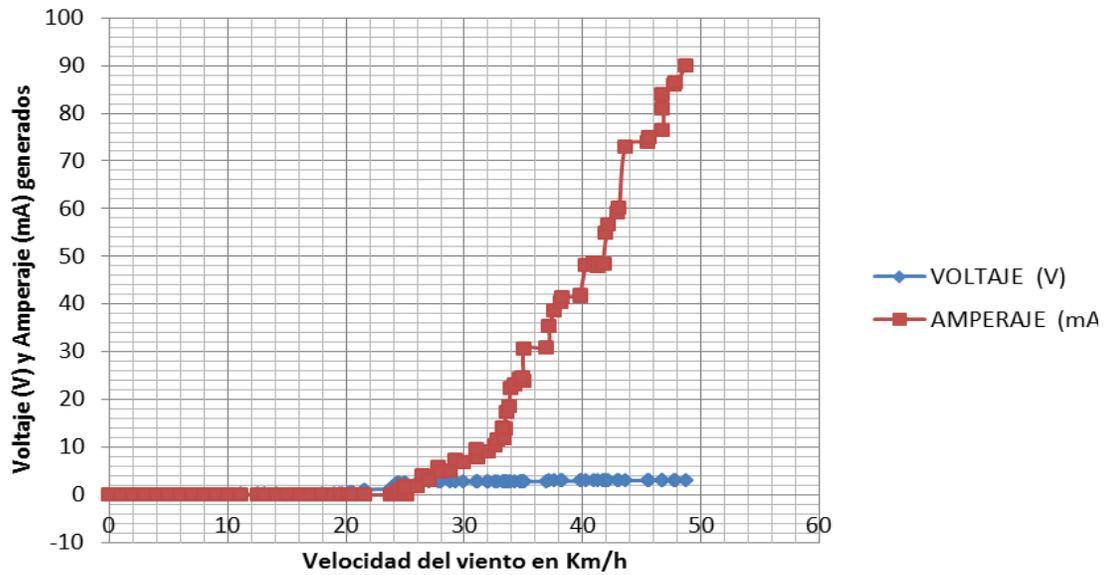
**Figura 4.23:** Comportamiento del voltaje y la corriente con los aerogeneradores conectados en serie

Debido a que el módulo de los aerogeneradores fué construido con motores de CD, y como no todas la turbinas Savonius comienzan a girar al mismo tiempo, se propone el circuito mostrado en la figura 4.24, el cual a diferencia del circuito anterior, integra un diodo entre cada generador para evitar el posible retorno de la corriente



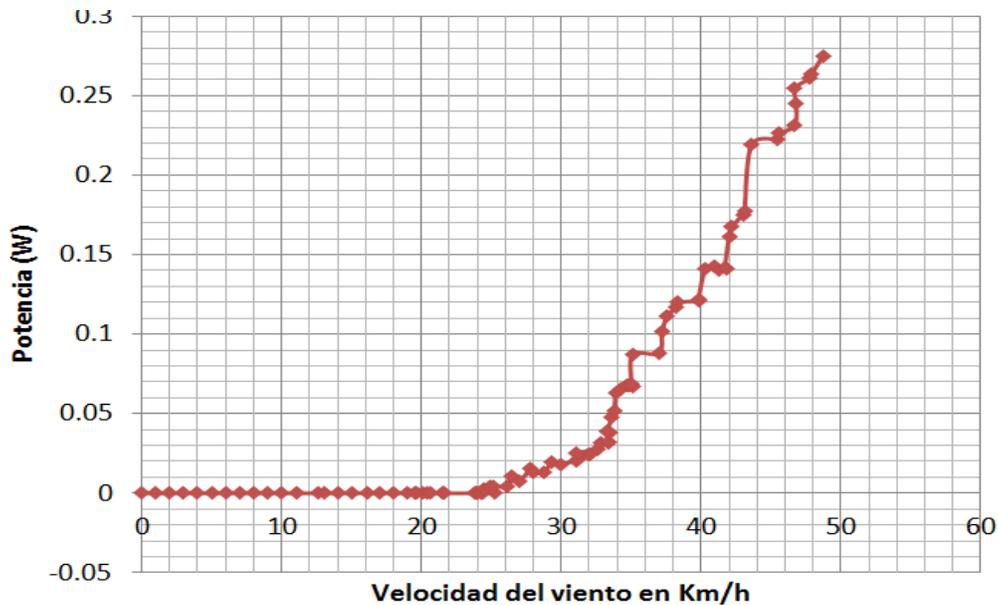
**Figura 4.24:** Segunda Conexión del módulo de aerogeneradores con una lámpara de 9 leds como carga eléctrica del sistema

El comportamiento del voltaje y la corriente medidos en este nuevo circuito se observa en la figura 4.25, en donde es posible apreciar que la corriente presenta menos variaciones y menos picos comparandola con la generación de corriente en el primer cicuito en serie que no contiene diodos, sin embargo en las mediciones realizadas sobre el primer circuito se observa que el flujo de corriente comienza a partir de los 20.6 km/h de la velocidad del viento, mientras que en el segundo circuito esto se da hasta los 24.4 km/h.



**Figura 4.25:** Comportamiento del voltaje y la corriente con los aerogeneradores conectados en serie con diodos entre ellos

Aprovechando los datos de voltaje y corriente se obtiene el comportamiento de la potencia del módulo de aerogeneradores Savonius torcidos, como se muestra en la figura 4.26.



**Figura 4.26:** Potencia generada en función de la velocidad del viento

## **Capítulo 5 Conclusiones y trabajos a futuro.**

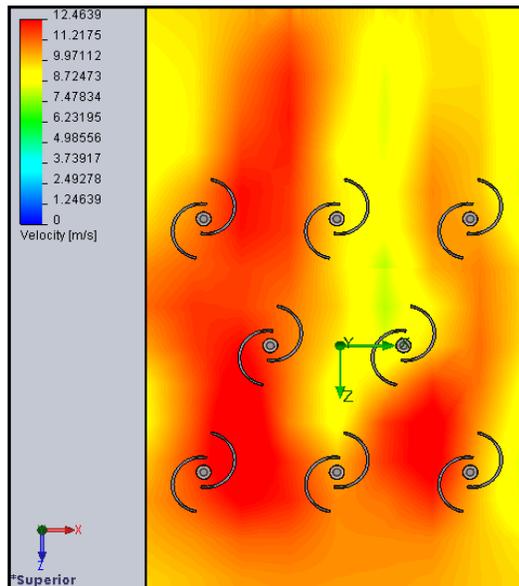
Se diseñó un sistema de aerogeneradores verticales modulares para la generación de energía eléctrica de baja potencia y se realizó la validación experimental del mismo con la construcción de un módulo prototipo.

### **5.1 Conclusiones**

Para lograr este objetivo, el trabajo se dividió en las siguientes tareas de las cuales también se listan algunas conclusiones asociadas con este trabajo.

- La metodología aplicada para el análisis computacional de fluidos dinámicos de las turbinas, fué realizar una revisión literaria de las investigaciones recientes acerca de la mecánica de fluidos publicadas en esta última década, en donde el software de diseño mecánico SolidWorks© sobresale como herramienta de ayuda debido a su ambiente gráfico amigable y sencillo para el usuario.
- Se desarrolló un modelo matemático del sistema, hubo la necesidad de estudiar el comportamiento de la energía contenida en el flujo del viento, pues es la fuente de energía utilizada por las turbinas de viento para hacer la conversión a energía mecánica rotacional ya sea aplicado de manera directa (molinos, bombas) o generando energía eléctrica. En el estudio de este modelo matemático se observa que no toda la energía contenida en el viento es posible de aprovechar por una turbina eólica, y es por esto que existen muchas investigaciones enfocadas a la optimización del rendimiento aerodinámico.

- Así se procedió a realizar los análisis computacionales correspondientes a las turbinas Savonius propuestas, con la finalidad de observar el comportamiento de éstas con un flujo de viento a través de ellas, de tal manera que el mejor resultado obtenido de este análisis se encuentra en el módulo de turbinas Savonius torcidas mostrado en la figura 5.1. en la que observamos que el comportamiento del módulo de las turbinas Savonius torcidas presenta pérdidas máximas de un 20% en la velocidad del aire incidente, esto se aprecia en el cambio de tonalidad del color naranja al color amarillo, ya que se reduce la velocidad de entrada del aire de 10 m/s hasta aproximadamente 8 m/s sobre la totalidad de solo dos turbinas, lo cuál es considerablemente bajo, comparado con las pérdidas del 60% de la velocidad del aire incidente en las turbinas Savonius sin flecha.



**Figura 5.1:** Comportamiento del aire sobre el módulo de turbinas Savonius torcidas

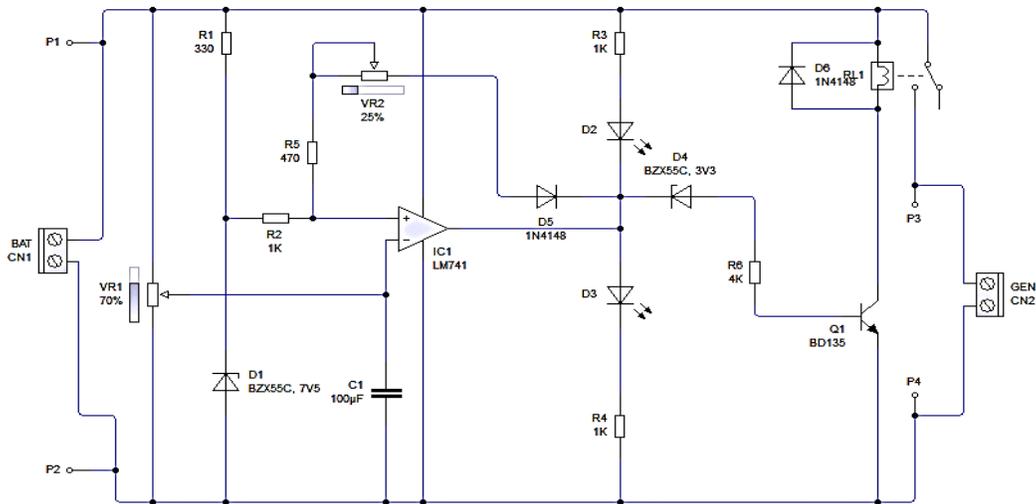
- Se construyó el prototipo de las turbinas Savonius, y se observan aspectos muy importantes como la complejidad en el proceso de manufactura de las turbinas Savonius torcidas, buscando desde las opciones de maquinado mecánico por control numérico, el cual presentó gran complejidad debido al tamaño y al perfil torcido de la turbinas, a continuación se llevó a cabo el procedimiento de inyección de plástico que de igual manera se complicó debido a la generación del molde y del procedimiento de desmoldeo, por lo que finalmente la opción de construcción de nuestros prototipos fué la impresión en 3D. De esto se concluye que la manufactura de las turbinas Savonius torcidas incrementa en costos con respecto a las turbinas Savonius convencionales con flecha o sin flecha, sin embargo si los prototipos se incrementan en tamaño, existen menos complicaciones en la fabricación de la turbinas Savonius torcidas con diferente métodos de manufactura, lo cual reduce los costos del proyecto.
- Se construyó y montó el módulo de aerogeneradores verticales, por su tamaño reducido, y por su gran habilidad de captación del viento en cualquier dirección no presentó complicación alguna para su ubicación en cualquier superficie con presencia de energía del viento, o sobre algún automóvil que al desplazarse sobre la superficie para cumplir una tarea específica genera una resistencia al viento la cual puede ser aprovechada por estos módulos generadores de energía eléctrica.

- Para la obtención de los resultados experimentales, surgió la necesidad de diseñar y fabricar un túnel de viento para poder realizar las pruebas correspondientes al análisis del flujo de viento, esto con la finalidad de comparar los resultados de las simulaciones contra los resultados experimentales. Una vez construido el túnel de viento y puesto a punto para realizar el experimento, se comprobó el comportamiento de las turbinas Savonius torcidas antes simulado, de tal forma que se concluye que para arreglos modulares pequeños en los que la distancia de las turbinas entre sí de cada módulo sea relativamente corta con la finalidad de aprovechar mejor el área en el que estos módulos se implementen, las turbinas Savonius torcidas son la mejor opción. Por otra parte, referente a los resultados de la generación de electricidad, el módulo conectado en serie sin carga presenta un comportamiento del voltaje con crecimiento proporcional a la velocidad del viento. Sin embargo, al conectar al módulo la carga de 9 leds para la iluminación, el voltaje tiende a ser constante a 3 Volts mientras la corriente asciende de manera exponencial en función de la velocidad del viento, lo que permite de igual manera un crecimiento exponencial de la potencia generada desde 0 hasta 0.3 Watts, obteniendo así la iluminación completa de la lámpara de leds.

## ***5.2 Trabajos a futuro***

Debido a los resultados experimentales obtenidos en la generación de electricidad, como una propuesta futura se pretende instalarle un circuito para la recarga de un acumulador de corriente (ver figura 5.2) ubicado entre el módulo de

los aerogeneradores y la carga, con la finalidad de almacenar la energía producida para su posterior aplicación.

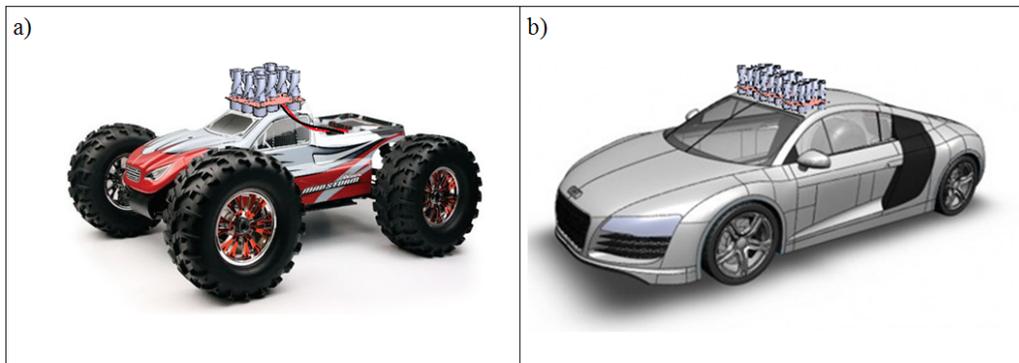


**Figura 5.2:** Circuito de un cargador de baterías

Posteriormente implementar estos módulos de aerogeneradores verticales sobre dispositivos móviles como carros de radiocontrol y automóviles, los cuales requieren de un suministro de energía eléctrica para satisfacer sus necesidades de funcionamiento, que hasta ahora, como en el caso de los autos de radiocontrol, no existe un medio de generación de energía que recargue sus baterías en pleno funcionamiento con la finalidad de incrementar el tiempo de descarga, y en el caso de los automóviles comerciales de hoy en día, estos recargan sus acumuladores de energía con la ayuda de un alternador, el cual requiere de una potencia aproximada de 1 HP que se le resta al motor de combustión interna con la finalidad de satisfacer esta necesidad de recarga.

La disposición de estos módulos de aerogeneradores se realizaría en arreglos que dependan del área de montaje así como de la capacidad de energía

requerida por el móvil. Dos ejemplos del montaje de estos módulos de aerogeneradores sobre un automóvil se muestran en la figura 5.2. En la figura 5.2 (a) se observa un auto de radiocontrol con un módulo de aerogeneradores Savonius torcidos que tendrán la tarea de recargar la batería mientras el auto se encuentre en movimiento, o incluso, si existe viento aunque el juguete se encuentre estacionado, de tal forma, el usuario podrá divertirse más tiempo de manera continua. En el caso de la figura 5.2 (b) se aprecia un automóvil con varios módulos de aerogeneradores Savonius torcidos, los cuales, al satisfacer las necesidades de recarga del acumulador automotriz, se podría desinstalar el alternador automotriz que le resta potencia al motor de combustión interna del automóvil.



**Figura 5.2:** Disposición de un módulo sobre un carro de radio control (a), y disposición de arreglos de módulos sobre un automóvil (b)

Una aplicación mas directa que puede plantearse como propuesta a futuro se encuentra en la rama de la iluminación automotriz, ya que las tendencias de la iluminación apuntan al uso de Leds para satisfacer dichas necesidades, y para este caso en particular, el módulo de aerogeneradores verticales diseñado y construido presenta buenos resultados.

## Referencias

- [1] Energía eólica, Pedro Fernandez Díez. Consultado el 16 de Enero de 2011 en <http://es.libros.redsauce.net/index.php?pagelD=16>
- [2] Sandra Eriksson, Hans Bernhoff and Mats Leijon, "Evaluation of different turbine concepts for wind power", *Renewable & Sustainable Energy Reviews.*, Vol 12, May. 2006, pp. 1419-1434.
- [3] Manwell JF, McGowan JG, and Rogers AL. *Wind energy explained*, 1st ed. Amherst, USA: Wiley; 2002.
- [4] Liuchen Chang, "Wind Energy Conversion System", *IEEE Trans. Canadian Review-Spring*, pp. 12-16, 2002.
- [5] M. Castro Gil and A. Colmenar Santos, *Monografías técnicas de energías renovables "Energía Solar Térmica de baja Temperatura"*, España, PROGNSA, 2004, pp.7-8
- [6] SENER, *Estadísticas destacadas del sector energético Junio 2011*. Consultado el 15 de mayo de 2011 en [http://www.sener.gob.mx/res/380/06\\_Cifras\\_relevantes\\_Jun\\_11.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/380/06_Cifras_relevantes_Jun_11.pdf)
- [7] Luis Arribas, "Microgeneración y pequeños aerogeneradores", *Ciemat*, pp. 46-51, Febrero 2007.
- [8] M. Castro Gil, A. Colmenar Santos, J. Carpio Ibáñez and R. Guirardo Torres *Monografías técnicas de energías renovables "Energía Solar Térmica de media y alta Temperatura"*, España, PROGNSA, 2006, pp.7-9.
- [9] Miralles Luis, and Röbbke Doerr Peter, "Energía Solar, Práctica del Bricolage", España, SEAC S.A.,1996.
- [10] *Energía Solar del Pacífico*, Consultado el 1 de Agosto de 2011 en <http://energia-solar.com.mx/tienda/index.php?cPath=22>
- [11] *Plantas solares SAECSA*. Consultado el 1 de Agosto de 2011 en <http://saecsaenergiasolar.com/catalogo1/plantas/>
- [12] J. Sargolzaei, "Prediction of the power ratio in wind turbine Savonius rotors using artificial neural networks", *International Journal of Energy and Environment.*, Vol 1, no. 2, 2007, pp. 51-56.
- [13] SENER, *Prospectiva del sector eléctrico 2010-2025*. Consultado el 20 de mayo del 2011 en [http://www.sener.gob.mx/res/1825/SECTOR\\_ELECTRICO.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/1825/SECTOR_ELECTRICO.pdf)

- [14] Sistema de información energética. Producción de energía Eólica real anual en Mexico. Consultado 15 de mayo de 2011 en <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController?action=login>
- [15] Sistema de información energética. Producción de energía Hidráulica real anual en Mexico. Consultado 15 de mayo de 2011 en <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController?action=login>
- [16] SENER, Energia renovables para el desarrollo sustentable en México. Consultado en [http://www.sener.gob.mx/res/0/ER\\_para\\_Desarrollo\\_Sustentable\\_Mx\\_2009.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/0/ER_para_Desarrollo_Sustentable_Mx_2009.pdf)
- [17] Sistema de información energética. Producción de Bioenergía del bagazo de cana real anual en México. Consultado 15 de mayo de 2011 en <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController?action=login>
- [18] J. Zargolzaei and A. Kianifar, "Neuro-fuzzy modeling tools for estimation of torque in Savonius rotor wind turbine", *Advances in Engineering Software.*, Vol 41, 2010, pp. 619-626.
- [19] Cristian Gebhardt, Sergio Preidikman, Julio C. Massa, and Guillermo Weber, "Comportamiento aerodinámico y aeroelástico de rotores de generadores eólicos de eje horizontal y de gran potencia", *Mecánica Computacional*, Vol 27, Noviembre 2008, pp. 520-539.
- [20] Ehsan Mostery Farahani, Nasser Hosseinzadeh, and Mehran Montamed Ektesabi, "Comparison of Dynamic Responses of Dual and Single Rotor Wind Turbines under Transient Conditions", *IEEE Trans. ICSET*, Dec. 2010, pp. 1-8.
- [21] Hassan, M., Iqbal, T., Khan, N., Hinchey, M., & Masek, V. "CFD Analysis of a Twisted Savonius Turbine"., Paper presented at NECEC 2010, Holiday Inn, St. John's, Newfoundland, Canada. Consultado en <http://necec.engr.mun.ca/ocs2010/viewabstract.php?id=64>.
- [22] Hayashi, T., Li, Y., Hara, Y. and Suzuki, K. "Wind tunnel tests on a three-stage out-phase Savonius rotor", *JSME International Journal* , 2005, vol. 48(1), pp. 9-16.
- [23] M.A. Kamoji, S.B. Kedare and S.V. Prabhu, "Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor", *Applied Energy*, Vol. 86, No. 7-8, Sept. 2008, pp. 1064 – 1073.
- [24] Jean-Luc Menet and Nachida Bourabaa, "Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation", *presented at the Conf. European wind energy*, London, U.K., 2004.

- [25] U.K. Saha, and M. Jaya Rajkumar, "On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades", *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 11, Sept. 2006, pp. 1776-1788.
- [26] Nakajima M, Iio S, and Ikeda T. "Performance of Savonius rotor for environmentally friendly hydraulic turbine". *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, No. 3 (2008), pp. 420-429.
- [27] Nakajima M, Iio S, and Ikeda T., "Performance of Double-step Savonius Rotor for Environmentally Friendly Hydraulic Turbine", *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 3, No. 3 (2008), pp.410-419.
- [28] M.A. Kamoji and S.B. Kedare and S.V. Prabhu, "Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor", *Applied Energy*, Vol. 86, No. 7-8, Sept. 2008, pp. 1064 – 1073.
- [29] J. Sargolzaei and A. Kianifar, "Modeling and simulation of wind turbine Savonius rotors using artificial neural networks for estimation of the power ratio and torque", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 17, No. 7, 2009, pp. 1290 – 1298.
- [30] J. Sargolzaei and A. Kianifar, "Neuro-fuzzy modeling tools for estimation of torque in Savonius rotor wind turbine", *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, No. 4, Jan. 2010, pp. 619 - 626.
- [31] RWE npower renewables, "Wind Turbine Power Calculations", Mechanical and Electrical Engineering Power Industry. Consultado en: [http://www.raeng.org.uk/education/diploma/maths/pdf/exemplars\\_advanced/23\\_Wind\\_Turbine.pdf](http://www.raeng.org.uk/education/diploma/maths/pdf/exemplars_advanced/23_Wind_Turbine.pdf)
- [32] E. Vaahedi, and R. Barnes, "Dynamic Behaviour of a 25m variable-geometry vertical-axis wind-turbine generator, *IEEE in proc.* 1982, Vol 129, Pt. C, No. 6.
- [33] Mingfu LIAO, Li DONG, Lu JIN, and Siji WANG. , "Study on rotational speed feedback torque control for a wind turbine generator system", *IEEE in proc., 2009 in the International Conference on Energy and Environment Technology*, pp. 853-856.
- [34] Zhenzhou Zhao, Yuan Zheng, Xiaoyun Xu, Wenming Liu, and Guoxiang Hu, "Research on the Improvement of the Performance of Savonius Rotor Based on Numerical Study", in *Proc. April 2009 of the international conference Sustainable Power Generation and Supply*. pp. 1-6.
- [35] Chang Can, Zhang Feng, and Mao Xuejum, "Comparison Study of a Vertical-axis Spiral Rotor and a Conventional Savonius Rotor". In *Proc. Of the Power and energy Engineering Conference, 2010 Asia-Pacific*. pp. 1-4.

- [36] Wang Songtao and Li Aijun, "Parameterizedly Desing Cam Based on Excel and Solidworks© and Finite element analysis and Simulation by COSMOS", In *Proc. 2010 International Conference on E-product E-service and E-Entertainment(ICEEE)*. pp. 1-4
- [37] Qi Shu, Yunjing Cui, and Yaoguang Qi, "Study of Building Virtual Human Body Model Based on SalidWorks", IEEE. Artículo 30
- [38] Mitsumi, Dc Mini-Motors M25E-13 Series, Consultado el 10 de Octubre de 2011 de <http://www.datasheets.org.uk/M25E-13/Datasheets-SL3/DSASL0048963.html>

## Anexo A. Planos de construcción de la turbinas

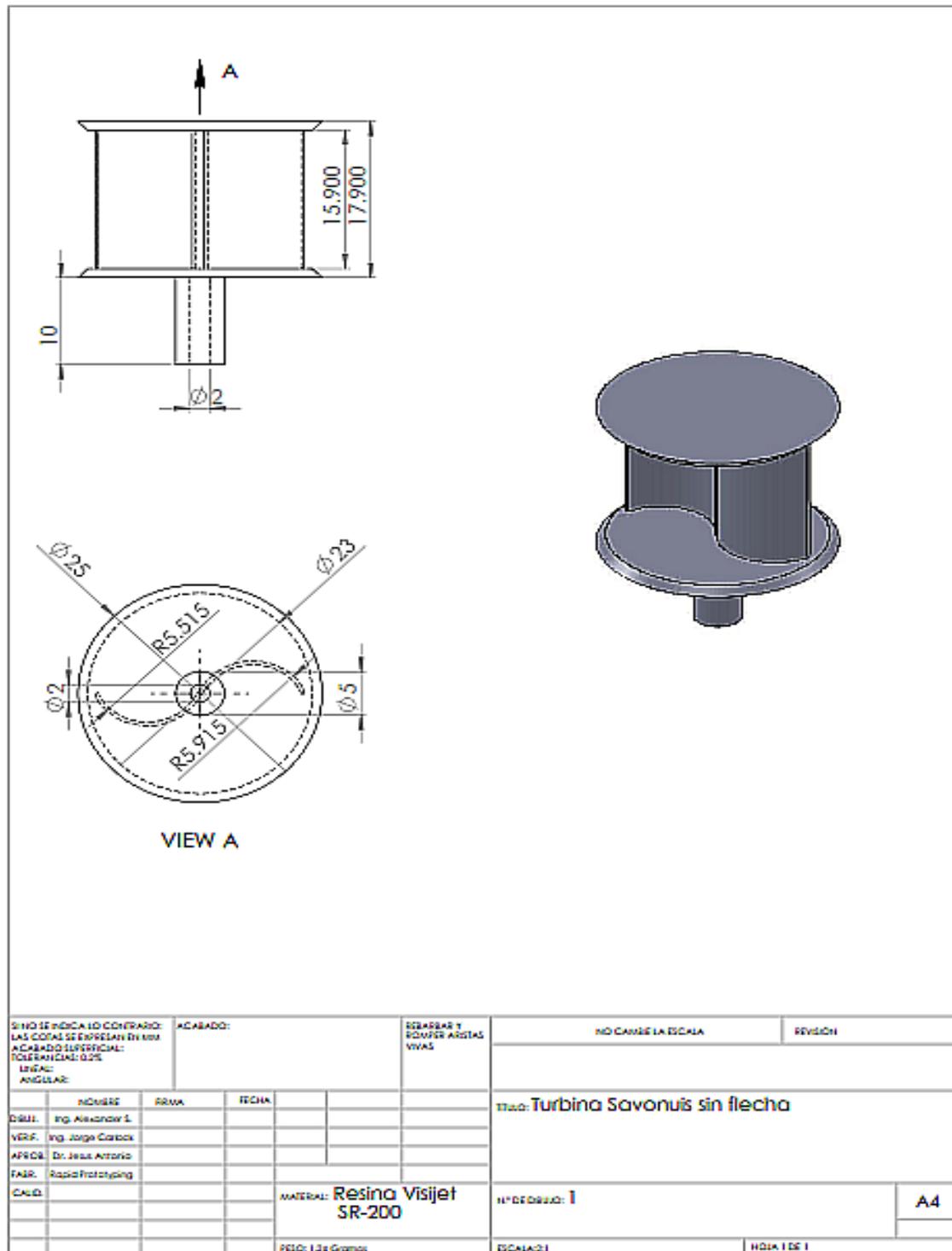


Figura A1: Plano la turbina Savonius convencional sin flecha

# Anexo A

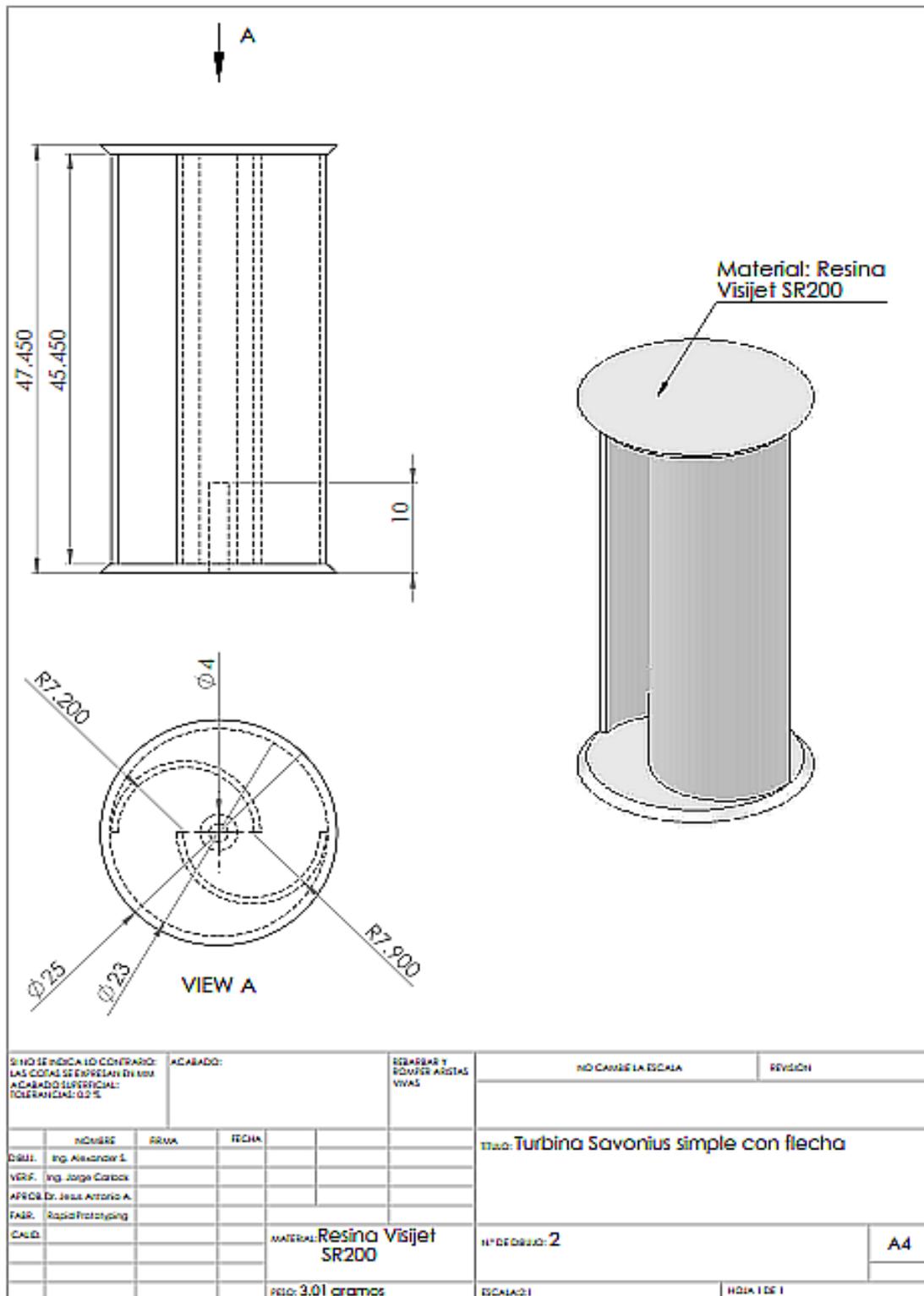


Figura A2: Plano de la turbina Savonius convencional con flecha

# Anexo A

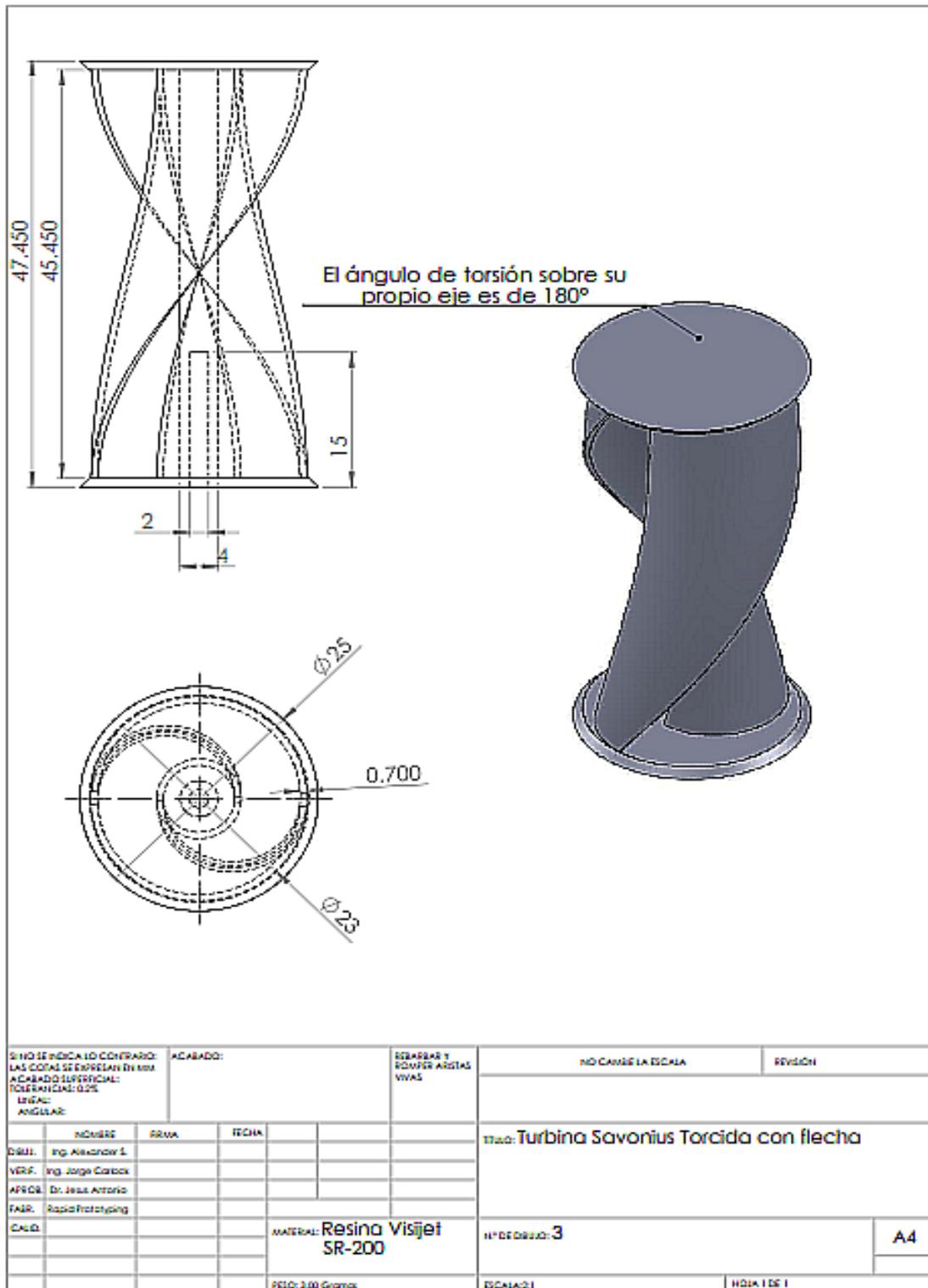


Figura A3: Plano de la turbina Savonius torcida con flecha

**Anexo B. Fotografías del comportamiento experimental  
del flujo de viento sobre el módulo de turbinas  
Savonius torcidas**



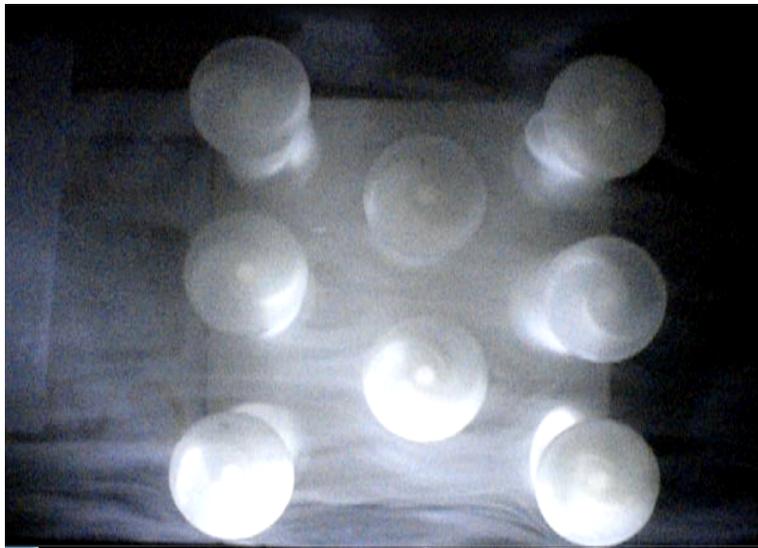
**Figura B1:** Fotografía del flujo de viento experimental 1



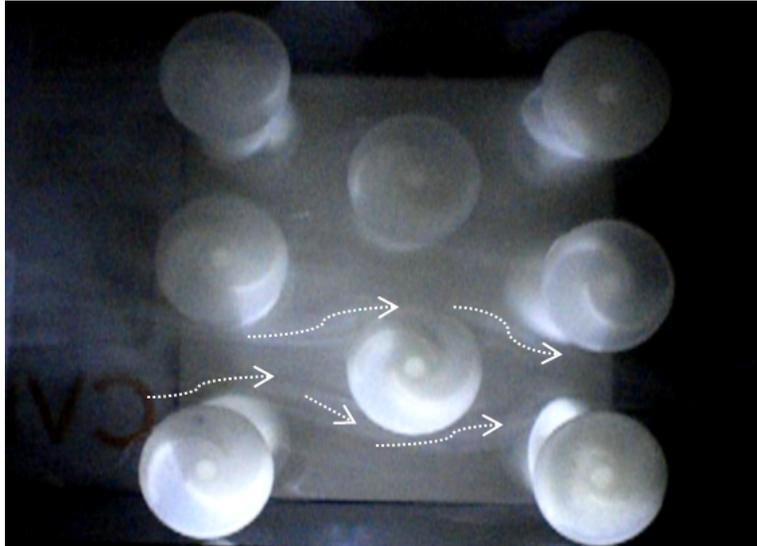
**Figura B2:** Fotografía del flujo de viento experimental 2



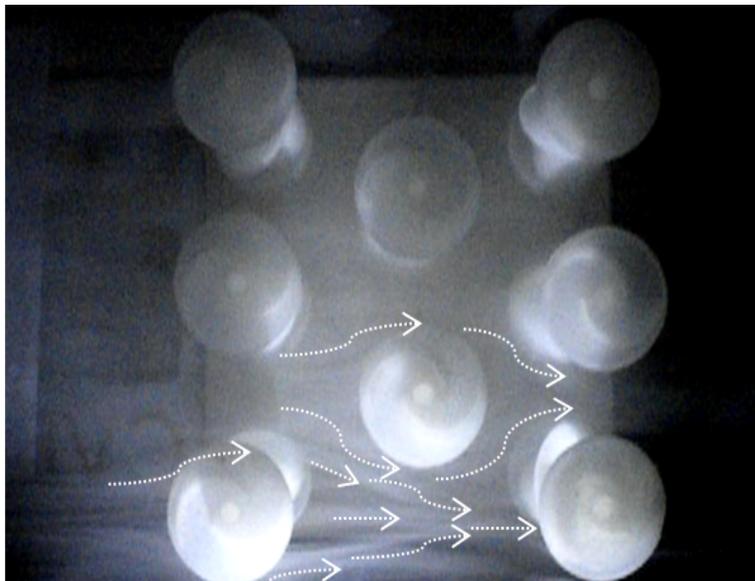
**Figura B3:** Fotografía del flujo de viento experimental 3



**Figura B4:** Fotografía del flujo de viento experimental 4



**Figura B5:** Fotografía del flujo de viento experimental 5



**Figura B6:** Fotografía del flujo de viento experimental 6

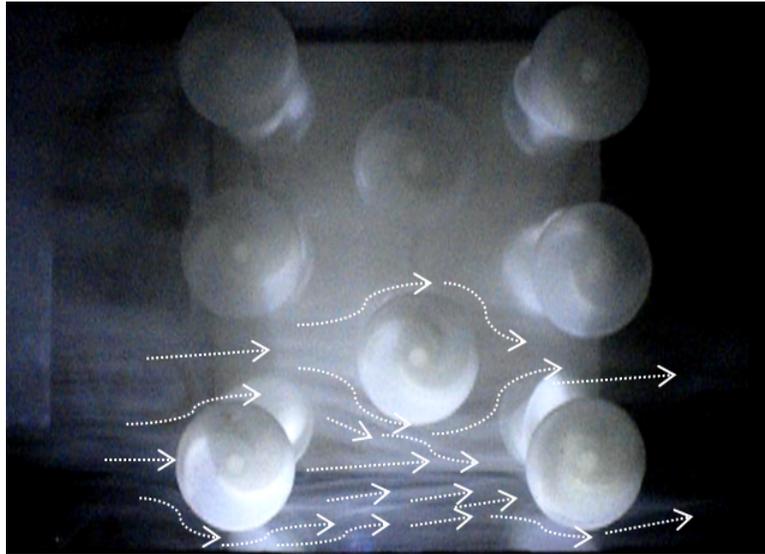


Figura B7: Fotografía del flujo de viento experimental 7

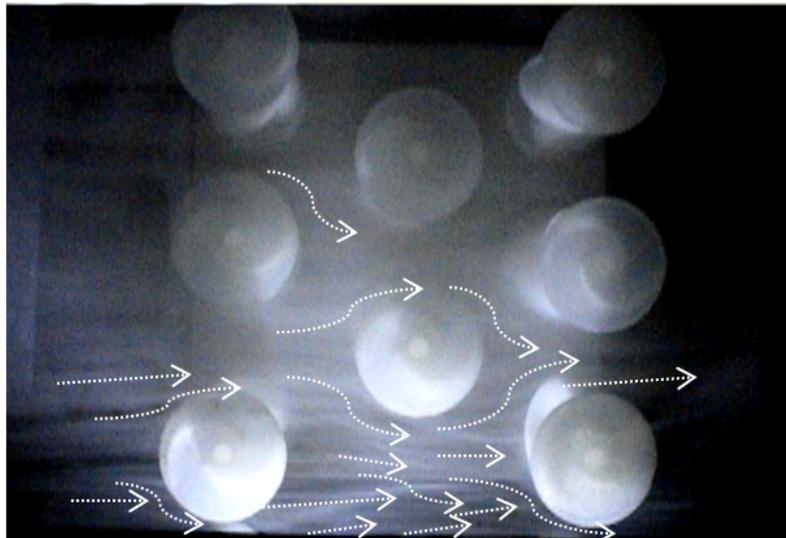


Figura B8: Fotografía del flujo de viento experimental 8



# **Glosario**

## **Acumulador**

Dispositivo que almacena energía química para liberarla en forma de energía eléctrica. Los acumuladores más utilizados son de Plomo-ácido (PB-ácido) y Níquel-cadmio (Ni-CD).

## **Aerogenerador**

Dispositivo mediante el cual se puede llevar a cabo la captación de la energía eólica para transformarla en energía eléctrica. Unidad constituida por un generador eléctrico unido a un aeromotor que se mueve por impulso del viento.

## **Alternador**

Generador eléctrico rotativo destinado a producir fuerzas electromotrices que sean funciones sinusoidales del tiempo.

## **Biomasa**

En su acepción más amplia, el término biomasa abarca toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluidos los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Por tanto, la energía de la biomasa se puede obtener de multitud de materiales: cultivos que se transforman posteriormente en energía (cultivos energéticos), residuos de diferente tipo (forestales, agrícolas, ganaderos, lodos de depuración de aguas residuales, emisiones de gas de vertederos controlados o biogás, etc.), la transformación química o biológica de determinadas especies vegetales o de los aceites domésticos usados para

convertirlos en biocombustibles (metanol y etanol) y emplearlos como sustitutos o complementos del gasóleo y de la gasolina.

No obstante, sea cual sea el tipo de biomasa, todos tienen en común el hecho de provenir, en última instancia, de la fotosíntesis vegetal. Un proceso que utiliza la energía del sol para formar sustancias orgánicas a partir del CO<sub>2</sub> y de otros compuestos simples.

### **Célula solar**

Dispositivo, normalmente a base de silicio, que permite la transformación de la radiación solar en electricidad. Es la unidad básica del sistema fotovoltaico.

### **Central generadora de energía eléctrica**

Instalación donde se efectúa la transformación de una fuente de energía primaria en energía eléctrica.

### **Combustibles fósiles**

Sustancias combustibles procedentes de residuos vegetales o animales almacenados en periodos de tiempo muy grandes. Son el petróleo, gas natural, carbón, esquistos bituminosos, pizarras y arenas asfálticas.

### **Combustión**

Reacción química del oxígeno (comburente) con una sustancia (combustible). La combustión es una reacción exotérmica.

### **Energía primaria**

Fuente de energía natural existente en la Naturaleza, como el carbón, el petróleo, el gas natural, el sol, agua almacenada o en movimiento, las mareas, el viento, el uranio, calor almacenado en la tierra (geotermia), etc. Después de su transformación, la energía primaria produce energía intermedia (gasolina, carbón, electricidad, etc.).

### **Energías renovables**

Son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana. El sol está en el origen de casi todas ellas porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica, por ejemplo.

El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que provoca la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica.

Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa.

Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica.

### **Potencia**

Variación de la energía intercambiada con el tiempo. La unidad de potencia es el vatio (W).  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ .

### **Radiación solar**

Es la radiación electromagnética producida por el sol con una temperatura equivalente a 5777 K y que se recibe en una superficie y tiempo determinados.

**Reserva**

Cantidad conocida de un recurso explotable con las condiciones económicas y técnicas del momento.

**Veleta**

Mecanismo que mide la orientación del viento, enviando sus señales al controlador electrónico de forma que éste pueda girar el rotor de la turbina y situarlo en contra del viento, de forma que pase a través del rotor la mayor proporción posible de energía.