



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA  
EN EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS DE TURBINA**

**Mario José Castro Taks**

Asesorado por el Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez

Guatemala, febrero de 2016



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA  
EN EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS DE TURBINA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARIO JOSÉ CASTRO TAKS**

ASESORADO POR EL ING. BYRON ODILIO ARRIVILLAGA MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2016



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADORA	Inga. María Magdalena Puente Romero
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA EN EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS DE TURBINA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 27 de mayo de 2015.



**Mario José Castro Taks**



Guatemala 21 octubre de 2015

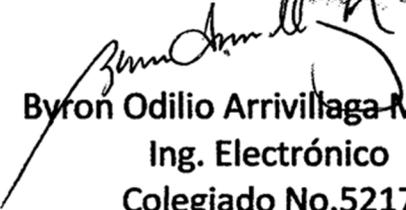
Ingeniero  
Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador del área de Electrónica  
Escuela de Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
USAC

Estimado Ingeniero:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación del estudiante de la carrera de ingeniería electrónica MARIO JOSÉ CASTRO TAKS con carnet 200010949, titulado: **“FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA EN EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS DE TURBINA”**, y a mi criterio el mismo cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo según el protocolo, por lo cual como asesor apruebo su contenido.

Sin otro particular me despido, atentamente.

*Ing. Byron Arrivillaga Méndez*  
*Cof. 5217*

  
Byron Odilio Arrivillaga Méndez  
Ing. Electrónico  
Colegiado No.5217  
Asesor





REF. EIME 73.2015.

Guatemala, 3 de NOVIEMBRE 2015.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director  
Ing. Francisco Javier González López  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A  
BAJA ESCALA EN EXTRACTORES EÓLICOS  
ATMOSFÉRICOS DE TURBINA, del estudiante Mario José  
Castro Taks, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
DID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador Área Electrónica



SRO





REF EIME 73. 2015.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MARIO JOSÉ CASTRO TAKS , titulado: FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA EN EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS DE TURBINA, procede a la autorización del mismo.**

**Ing. Francisco Javier González López**



**GUATEMALA, 17 DE NOVIEMBRE 2015.**

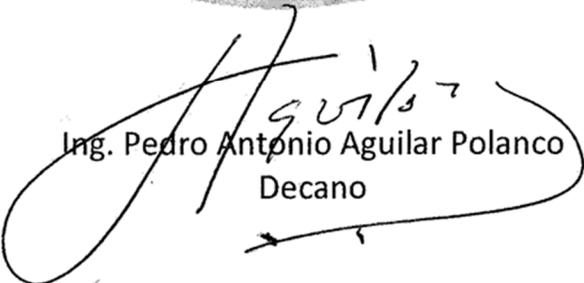




DTG. 049 2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado. **FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA EN EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS DE TURBINA**, presentado por el estudiante universitario **Mario José Castro Taks**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, febrero de 2016



/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por creer y apostar por mí todo el tiempo.
<b>Mi padre</b>	Lic. Mario Arnoldo Castro Pérez, una ofrenda sobre su tumba.
<b>Mi madre</b>	Sonia de Rosales, por ser mi madre, padre y némesis siempre.
<b>Lic. Rolando Rosales</b>	Gracias por estar allí.
<b>Mis hermanas</b>	Madelaine, Amy Castro y Bonnie Rosales, por manifestarme siempre su cariño y apoyo.
<b>Usted</b>	Muy especialmente.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Pueblo de Guatemala</b>	Por aportarnos la Universidad de San Carlos de Guatemala, donde se forjan oportunidades de formación y desarrollo profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser madre de mi formación profesional.
<b>Mis amigos</b>	Por todas las experiencias que compartimos a lo largo de la carrera.
<b>Laboratorio de Electrónica, Fiusac</b>	Por darme la oportunidad de laborar como auxiliar de cátedra.
<b>Ing. Byron Arrivillaga</b>	Por su amistad y apoyo en la realización de este trabajo de graduación.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. ENERGÍA ATMOSFÉRICA, EL VIENTO.....	1
1.1. Naturaleza del fenómeno atmosférico .....	1
1.2. Leyes que rigen el flujo de aire terrestre.....	4
1.2.1. Efecto föhn.....	4
1.2.2. Ley exponencial de Hellmann.....	5
1.3. Energía utilizable del viento.....	6
1.3.1. Curva de duración de la velocidad.....	7
1.3.2. Energía útil del viento .....	8
2. ACTUACIÓN DEL VIENTO EN GUATEMALA .....	9
2.1. Sistemas de presión presentes en la región.....	9
2.2. Densidad del viento para generadoras eólicas.....	12
2.3. Estudio del viento y su influencia en la región .....	16
3. LEGISLACIÓN NACIONAL GUATEMALTECA PARA FUENTES RENOVABLES .....	19
3.1. Decreto número 52-2003.....	20
3.2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica .....	21

3.3.	Administrador de Mercado Mayorista.....	22
4.	EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS.....	25
4.1.	Funcionamiento de un extractor atmosférico eólico .....	25
4.1.1.	Funcionamiento con y sin viento .....	26
4.2.	Leyes que aplican a extractores eólicos.....	28
4.2.1.	Efecto chimenea.....	28
4.2.2.	Estratificación térmica .....	29
4.2.3.	Chimenea termal .....	29
4.3.	Turbinas de eje vertical .....	30
4.3.1.	Potencia de una turbina Darrieus .....	35
4.4.	Tipos de extracción atmosférica eólica .....	37
4.5.	El extractor de turbina .....	38
5.	AEROGENERADORES.....	41
5.1.	Generadores .....	42
5.2.	Generadores síncronos.....	43
5.3.	Generadores asíncronos o inducción.....	44
5.4.	Conexión indirecta a red de aerogeneradores .....	45
5.5.	Cajas multiplicadoras .....	48
5.6.	Controlador electrónico .....	49
5.7.	Calidad de potencia.....	50
6.	BATERÍAS EN SISTEMAS EÓLICOS .....	51
6.1.	Tipos de baterías .....	53
6.2.	Baterías de plomo .....	55
6.3.	Eficiencia en baterías .....	56
6.4.	Nuevas tecnologías.....	58
6.5.	Comparativos entre tecnologías de almacenaje .....	60

6.5.1.	Análisis en el tamaño de las baterías .....	67
6.5.2.	Análisis en el peso de baterías .....	68
6.5.3.	Análisis de costo de recuperación de baterías .....	70
6.5.4.	Análisis por eficiencia .....	71
6.5.5.	Análisis de temperatura .....	73
6.5.6.	Conclusiones generales de las baterías .....	74
7.	DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA EN UN EXTRACTOR EÓLICO ATMOSFÉRICO DE TURBINA.....	75
7.1.	Interacción de los componentes en el diseño.....	80
7.1.1.	Sistema de control .....	83
7.1.2.	Sensores y mecanismos de conexión mecánica ....	85
7.1.3.	Etapa de potencia .....	89
7.1.4.	Almacenaje .....	91
7.1.5.	Generador y mecanismos.....	94
7.2.	Sustentación de la turbina .....	99
7.3.	Pérdida y resistencia de los mecanismos de transmisión .....	100
7.4.	Análisis de velocidades del rotor y potencia máxima .....	101
7.5.	Control de potencia .....	107
7.6.	Seguridad de turbina y trabajo.....	108
7.6.1.	Nivel estructural .....	109
7.6.2.	Nivel de desempeño .....	110
8.	ANÁLISIS DE COSTES DEL ESTUDIO.....	111
8.1.	Costos por permisos municipales, estatales y federales en Guatemala.....	111
8.2.	Costos en la implementación del estudio piloto.....	112
8.3.	Análisis de retribución de capital por generación .....	114

9.	UBICACIONES PILOTO DEL DISEÑO.....	119
9.1.	Ubicación piloto: El Refugio .....	119
9.1.1.	Proyecto: El Refugio.....	120
9.1.2.	Datos meteorológicos de la ubicación.....	122
9.1.3.	Sistema de extracción y ventilación en cocinas ....	124
9.1.4.	Principios de la ventilación natural .....	125
9.1.5.	Principio de generación de energía por medio eólico.....	126
9.1.6.	Propuesta del aerogenerador de turbina.....	127
9.2.	Ubicación piloto: oficina de cómputo .....	129
9.2.1.	Proyecto: oficina fresca .....	130
9.2.2.	Datos meteorológicos de la ubicación.....	132
9.2.3.	Sistema de extracción y ventilación en oficina .....	133
9.2.4.	Principios de la ventilación natural .....	135
9.2.5.	Principio de generación de energía por medio eólico.....	136
9.2.6.	Propuesta del aerogenerador de turbina.....	137
	CONCLUSIONES.....	141
	RECOMENDACIONES .....	147
	BIBLIOGRAFÍA.....	149

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Vientos terrestres causados por el sol .....	3
2.	Rosa de los vientos .....	4
3.	Velocidad del viento promedio anual en Guatemala .....	10
4.	Mapa de densidad del viento y centrales generadoras .....	14
5.	Factor del viento sector departamento de Guatemala.....	15
6.	Mapa de potencial eólico en Guatemala .....	17
7.	Extractor eólico de turbina.....	26
8.	Funcionamiento del extractor en condiciones de viento.....	27
9.	Funcionamiento del extractor de turbina sin viento .....	28
10.	Forma básica de una turbina Darrieus .....	31
11.	Fuerzas que actúan en la turbina Darrieus .....	32
12.	Ángulo de incidencia $\alpha$ en función del de rotación $\phi$ .....	33
13.	Coeficiente de sustentación $C_a$ .....	34
14.	Coeficiente de sustentación $C_w$ .....	34
15.	Coeficiente de par de giro $c_m$ con 3 palas .....	36
16.	Partes del extractor de turbina eólica .....	39
17.	Partes básicas de un aerogenerador .....	41
18.	Proceso de la conexión indirecta .....	46
19.	Funcionamiento de una batería.....	52
20.	Tecnologías en creación de baterías .....	53
21.	Batería de plomo común .....	63
22.	Batería de ciclo profundo .....	65
23.	Batería de litio fosfato.....	67

24.	Tamaño de baterías.....	68
25.	Pesos de baterías .....	69
26.	Recuperación de la inversión.....	70
27.	Costo de adquirir tecnología de almacenaje .....	71
28.	Eficiencia en baterías ante ahorro .....	72
29.	Temperatura en baterías .....	73
30.	Extractor de turbina eólica .....	75
31.	Eje de transmisión rotor–generador.....	76
32.	Mecanismos de transmisión circular .....	77
33.	Funcionamiento del aerogenerador en extractores de turbina .....	78
34.	Sistema mecánico de potencia .....	79
35.	Extractor eólico de turbina .....	81
36.	Estructura de acople del generador .....	81
37.	Sistema aerogenerador a baja escala en un extractor de turbina.....	82
38.	BASIC Stamp 2.....	83
39.	BASIC Stamp 2 partes importantes .....	84
40.	Flujo de lógica de control del sistema aerogenerador.....	85
41.	Generador, sensor y mecanismos .....	86
42.	Solenoide de tiro .....	86
43.	Circuito de frenado por solenoide de tiro .....	87
44.	Rango de salida <i>versus</i> distancia .....	88
45.	Circuito de potencia rectificador, filtrado y almacenaje .....	90
46.	Configuración de bornes y postes.....	92
47.	Batería T-605, 12 voltios ciclo profundo.....	93
48.	Arrancador por espira de sombra .....	94
49.	Generador.....	96
50.	Trasmisiones .....	97
51.	Mecanismos de transmisión circular .....	98
52.	Fuerzas que actúan en la turbina Darrieus .....	102

53.	Forma básica de una turbina Darrieus .....	102
54.	Coeficiente de par de giro $c_m$ con 3 palas .....	105
55.	Potencia entregada por el sistema 6 horas diarias .....	116
56.	Producción mensual de potencia .....	117
57.	Sistema de luces de emergencia y ayuda visual.....	120
58.	El Refugio, Villa Nueva.....	121
59.	Extractor y estructura de acople.....	121
60.	Sistema de control de potencia .....	122
61.	Temperatura máxima ambiente y en operación de la cocina .....	123
62.	Velocidad promedio del viento en el año.....	124
63.	Funcionamiento del extractor en condiciones de viento.....	127
64.	Sistema aerogenerador a baja escala en un extractor de turbina atmosférico.....	128
65.	Oficina de cómputo de El Refugio.....	130
66.	Extractor y estructura de acople.....	131
67.	Sistema de control de potencia .....	131
68.	Temperatura promedio de la oficina.....	132
69.	Velocidad promedio del viento en el año.....	133
70.	Extractor de turbina eólica.....	134
71.	Funcionamiento del extractor en condiciones de viento.....	137
72.	Sistema aerogenerador a baja escala en un extractor de turbina atmosférico.....	138
73.	Sistema mecánico de potencia .....	143

## TABLAS

I.	Exponente de Hellmann según rugosidad del terreno .....	6
II.	Datos promedio de viento en la región central de Guatemala .....	11
III.	Clasificación del poder del viento.....	13
IV.	Requisitos energéticos y estructurales .....	60
V.	Datos técnicos de la batería base de plomo I .....	61
VI.	Datos técnicos de la batería base de plomo II .....	63
VII.	Datos técnicos de la batería base de plomo III .....	65
VIII.	Características de la batería del sistema generador.....	91
IX.	Tabla de carga adecuada según temperatura .....	92
X.	Características del generador .....	95
XI.	Potencia y revoluciones por minuto de turbina .....	106
XII.	Calidad del cable .....	110
XIII.	Costos de implementación del diseño .....	112
XIV.	Escenarios de recaudación y entrega de energía.....	114
XV.	Ahorro mensual de generar por este sistema .....	117
XVI.	Potencia y revoluciones por minuto de turbina I .....	129
XVII.	Potencia y revoluciones por minuto de turbina II .....	139
XVIII.	Potencia y revoluciones por minuto de turbina III .....	141
XIX.	Características del generador .....	142

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Área superficial
<b>Ah</b>	Amperios hora
<b>C</b>	Centígrados
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>E</b>	Energía
<b>°</b>	Grado
<b>Hz</b>	Hertz
<b>h</b>	Hora
<b>K</b>	Kilo ( $1 \times 10^3$ )
<b>m</b>	Metro
<b><i>m</i></b>	Masa
<b>n</b>	Nano ( $1 \times 10^{-9}$ )
<b><math>\nabla</math></b>	Nabla
<b>T</b>	Periodo
<b>P</b>	Potencia
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>s</b>	Segundo
<b>t</b>	Tiempo
<b>v</b>	Velocidad
<b>v</b>	Voltios
<b>VAC</b>	Voltiamperio corriente
<b>W</b>	Watt



## GLOSARIO

<b>Ácido</b>	[Sabor] Que es como el del vinagre, el del limón o ciertas frutas que no han madurado.
<b>AGM</b>	Abreviación inglesa de <i>absorption glass mat</i> y en español absorción por fibra de vidrio.
<b>Álabe</b>	Cada una de las paletas curvas de una rueda hidráulica o de una turbina.
<b>Alternador</b>	Generador de corriente alterna, que crea corriente eléctrica por medio de campos magnéticos.
<b>AMM</b>	Administrador de Mercado Mayorista.
<b>Ánodo</b>	Polo positivo de una pila eléctrica.
<b>Batería</b>	[Sistemas eléctricos] Dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad.
<b>Cátodo</b>	Polo negativo de una pila eléctrica.
<b>CA</b>	Corriente alterna.
<b>CC</b>	Corriente continua.

<b>Centrífuga</b>	[Fuerza] Que tiende a alejar del eje alrededor del cual gira.
<b>Ciclo</b>	Serie de fases o estados por las que pasa un acontecimiento o fenómeno y que se suceden en el mismo orden hasta llegar a una fase o estado, a partir de los cuales vuelven a repetirse en el mismo orden.
<b>Coriolis</b>	Efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia.
<b>Conducción</b>	[Electricidad] Es la transmisión de la carga eléctrica a través de un cable u otro cuerpo. El concepto se utiliza de modo similar para referirse a la conducción de calor.
<b>Claraboya</b>	Ventana situada en el techo o la parte superior de una pared utilizada para proporcionar luz a una habitación.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
<b>Calor</b>	Energía que se manifiesta por un aumento de temperatura y procede de la transformación de otras energías; es originada por los movimientos vibratorios de los átomos y las moléculas que forman los cuerpos.

<b>Corriente</b>	Magnitud física que indica la cantidad de electricidad que recorre un conductor, durante una unidad de tiempo determinada.
<b>Densidad</b>	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia, o entre la masa de una sustancia y la masa de un volumen igual de otra sustancia tomada como patrón.
<b>Decreto</b>	Decisión del Consejo de Ministros, o de una entidad equivalente, que aprueba disposiciones de carácter general.
<b>DSP</b>	Abreviación inglesa de <i>digital signal processing</i> y en español procesamiento digital de señal.
<b>DGE</b>	Dirección General de Energía.
<b>Embalar</b>	Hacer que adquiera gran velocidad un motor desprovisto de regulación automática, cuando se suprime la carga.
<b>Energía</b>	Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, entre otros.
<b>Eólico</b>	[Fuerza] Que está producido o accionado por el viento.
<b>Estator</b>	En las dinamos y motores eléctricos, circuito fijo dentro del cual gira el móvil o rotor.

<b>Fenómeno</b>	Manifestación de una actividad que se produce en la naturaleza y se percibe a través de los sentidos.
<b>Frecuencia</b>	Número de veces que aparece, sucede o se realiza una cosa durante un período o un espacio determinados.
<b>Fibroceso</b>	Compuesto de cemento y polvo de amianto.
<b>Hardware</b>	Conjunto de componentes físicos que integran un computador.
<b>Inducción</b>	[Sistemas eléctricos] Fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz (f.e.m. o tensión) en un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético variable, o bien en un medio móvil respecto a un campo magnético estático.
<b>Insivumeh</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b>Led</b>	Diodo emisor de luz.
<b>Litio</b>	Elemento químico de número atómico 3, masa atómica 6,94 y símbolo Li; es un metal alcalino blanco plateado, blando, dúctil y muy ligero, se corroe rápidamente al contacto con el aire y no existe en estado libre en la naturaleza, sino solamente en compuestos. Se utiliza en la fabricación de acero, en

esmaltes y lubricantes, y el carbonato de litio, en medicina.

<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas
<b>Neumática</b>	Tecnología que utiliza aire comprimido como medio de transmisión de energía, para hacer funcionar un mecanismo.
<b>Nervaduras</b>	Moldura saliente de las bóvedas.
<b>Nominal</b>	[Energía eólica] Límite estable energético entre fase de conexión y parada de un dispositivo generador eólico.
<b>NTGDR</b>	Normas Técnicas para la Conexión, Operación, Control y Comercialización de la Generación Distribuida Renovable.
<b>PWM</b>	Modulación por ancho de pulso.
<b>Plomo</b>	Elemento químico de número atómico 82, masa atómica 207,19 y símbolo Pb; es un metal sólido de color gris azulado, blando, maleable, dúctil, de elevada densidad y mal conductor de la electricidad; se encuentra principalmente en la galena, de donde se extrae; se usa en la fabricación de baterías, en el revestimiento de cables eléctricos, en las tuberías, balas de armas de fuego, tanques y aparatos de rayos

X, como protector de materiales radiactivos, en pinturas, tintes y barnices, entre otros.

<b>Potencia</b>	Capacidad para realizar una función o una acción, o para producir un efecto determinado.
<b>Presión</b>	Fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie.
<b>Radiación</b>	Emisión de energía o de partículas que producen algunos cuerpos y que se propaga a través del espacio.
<b>Renovable</b>	Referencia a aquello que tiene posibilidades de ser renovado. El verbo renovar, por su parte, está vinculado a regresar algo a su primer estado o a dejarlo como nuevo.
<b>Recurso</b>	Referido a recurso renovable, es un bien natural que se puede restaurar por procesos naturales a una velocidad superior a la del consumo por los seres humanos. La radiación solar, las mareas, el viento y la energía hidroeléctrica son recursos perpetuos que no corren peligro de agotarse a largo plazo.
<b>Redox</b>	Reducción oxidación, método de transferencia molecular energética.

<b>Rodamiento</b>	Cojinete que consta de dos cilindros concéntricos entre los que va colocado un juego de rodillos o bolas que pueden girar libremente.
<b>Rotacional</b>	En el cálculo vectorial, el rotacional o rotor es un operador vectorial que muestra la tendencia de un campo vectorial a inducir rotación alrededor de un punto.
<b>RS232</b>	Protocolo estándar de comunicación serial en redes asíncronas.
<b>SCR</b>	Rectificador controlado de silicio.
<b>Sensor</b>	Dispositivo capaz de detectar señales físicas o químicas y convertirlas en señales eléctricas.
<b>Software</b>	Conjunto de componentes lógicos que conforman el soporte de un sistema informático.
<b>SPI</b>	Interfaz serial periférica.
<b>Temperatura</b>	Grado o nivel térmico de un cuerpo o de la atmósfera.
<b>Torsión</b>	Acción de torcer o torcerse una cosa en forma helicoidal.

<b>Torsor</b>	Componente paralelo al eje longitudinal del momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal del prisma mecánico.
<b>Transmisión</b>	[Mecánica] Es el mecanismo que se encarga de transmitir potencia entre dos o más elementos de una máquina, y esto suele llevarse a cabo mediante elementos rotantes, como engranajes con correas o cadenas.
<b>Trifásico</b>	[Sistema eléctrico] Que tiene tres corrientes eléctricas alternas iguales, procedentes del mismo generador, cuyas fases respectivas se producen a la distancia de un tercio de período.
<b>Turbina</b>	Máquina que consiste en una rueda en el interior de un tambor provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión de un fluido haciendo que esta gire.
<b>Tóxico</b>	[Sustancia] Que es venenoso o que puede causar trastornos o la muerte a consecuencia de las lesiones debidas a un efecto químico.
<b>TTL</b>	Lógica transistor a transistor.
<b>UART</b>	Transmisor-receptor asíncrono universal.
<b>USART</b>	Transmisor y receptor síncrono o asíncrono universal.

<b>Viento</b>	Corriente de aire que se produce en la atmósfera al variar la presión.
<b>Voltaje</b>	Tensión o diferencia de potencial, presión que una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz ejerce sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado.
<b>VRLA</b>	Abreviación inglesa de <i>valve regulated lead acid battery</i> y traducida al español, válvula reguladora de ácido de batería de plomo.



## RESUMEN

Se presentan las contribuciones teóricas, técnicas y económicas aportadas por el trabajo de graduación “Factibilidad del diseño de un aerogenerador a baja escala en extractores eólicos atmosféricos de turbina” en tres ámbitos:

- La influencia vectorial de la fuerza del viento en extractores de aire.
- El análisis de control de velocidad de las turbinas eólicas de eje vertical.
- La posibilidad de generación a partir del movimiento rotatorio.

Se pretende contribuir al desarrollo de sistemas generadores de energía limpia, sin necesidad de crear emplazamientos específicos para su recolección y utilizar sistemas ya existentes, dotándoles de una segunda función. El trabajo aporta información sobre la utilización de extractores eólicos tipo turbina de diámetro 0,46 m, como generadores eléctricos. Las características rotatorias producidas en el extractor por flujos de vientos circulantes dentro y fuera de este producen fuerza mecánica que puede ser aprovechada por un sistema generador.

El rotor de la turbina es de eje vertical y, de acuerdo al tipo de palas semiesféricas que este posee, se clasifica como del tipo Darrieus. Las revoluciones que produce con una incidencia máxima del viento de 12 m/s en sus palas de 0,23 m en la parte más larga es 498 RPM con una potencia comprendida de 193,04 W. La potencia entregada no es constante pudiendo presentar potencias iguales a los 32,17 W con 83 RPM con velocidad del viento de 2 m/s.

Los resultados obtenidos han permitido el diseño de un sistema de generación con transmisión 1:3 para dar más estabilidad en ráfagas de viento entre 2 m/s y los 8 m/s. Debido a la necesidad de no arriesgar su función principal de recambio ambiental del extractor, se incluyó un sistema de control de velocidad, el cual reduce a un máximo de 20 % la pérdida de extracción. El sistema produce por 8 horas diarias 6,64 kW mensual teóricamente.

Pese a que el diseño mejora la potencia entregada por el extractor, este no puede producir más energía mecánica sin ser afectada su estructura. El costo de producir energía eléctrica por este medio es muy alto en comparación a los estándares de distribución en Guatemala, dando solamente un ahorro de Q 8 mensual, clasificándolo como una fuente ecológica de generación pero no rentable por el momento.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluación de la factibilidad teórica, técnica y económica de diseñar un sistema generador de energía para extractores atmosféricos eólicos de turbina.

### **Específicos**

1. Calcular teóricamente el máximo porcentaje de potencia de generación de energía eléctrica que puede producir el extractor eólico de turbina al ser acoplado a un modelo de aerogenerador.
2. Evaluar teóricamente el diseño de un sistema de conexión (aerogenerador) a la turbina eólica para una pérdida de extracción menor del 20 %.
3. Asegurar en el diseño la linealidad de la energía entregada evitando fluctuaciones en el tiempo.
4. Verificar una lógica de control de velocidad para una conexión óptima de captura de la energía mecánica proveniente del extractor de turbina.
5. Valorar las dificultades técnicas y económicas que el diseño presente.
6. Comparar el costo de la producción de energía eléctrica a partir del generador de turbina con los precios dados por la CNEE.



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se han realizado estudios sobre sistemas que generan energía eléctrica a partir de fuentes renovables, tales como el viento y el calor. Se han diseñado dispositivos específicos que capturan y recolectan esta energía, como los aerogeneradores, sin embargo, no hay estudios efectuados para encontrar en dichos sistemas un segundo uso. Los extractores de aire de turbina funcionan haciendo un recambio mecánico de aire y temperatura. Este trabajo de graduación tiene la intención de plantear la posibilidad de dar un segundo uso a los extractores eólicos de turbina como generadores eléctricos; el estudio consta de nueve capítulos.

En el primer capítulo se pretende transmitir la naturaleza del viento, los factores que lo producen, su interacción según el área geográfica y el cambio relativo durante el tiempo. También se muestran los modelos estadísticos con los cuales se entiende dicho fenómeno, proporcionando curvas de velocidad, energía producida por el viento y un sistema de presión por el globo terráqueo.

En un segundo capítulo se delimita el campo de estudio a la actuación del viento en Guatemala, cuáles son los sistemas de presión y densidad del viento topográficamente, así como hacer referencia de los estudios más recientes por parte del Insivumeh y Ministerio de Energía y Minas, los cuales muestran que la región de Guatemala posee ventajas para la implementación de plantas generadoras de energía.

El capítulo tres aborda la regulación nacional sobre fuentes renovables. Aunque es normal hablar de dichas fuentes, las leyes y regulaciones en el país son relativamente de reciente creación, pues se tomaba en cuenta únicamente la legislación sobre la energía obtenida a partir de fuentes no renovables. Los compromisos ratificados para generar energía por medio del viento son meros incentivos y no poseen restricciones para su estudio e implementación. Es a partir de la producción de energía eléctrica propiamente dicha, que ya entraría en el campo regulatorio como la generada por fuentes no renovables.

En el capítulo cuatro se estudia al extractor de turbina eólica, el fundamento para su funcionamiento, cómo estos pueden intercambiar aire y temperatura por medios mecánicos sin la necesidad de usar energía para mover grandes densidades de gases y calor. Este capítulo encierra los conceptos de efecto chimenea, estratificación térmica y chimenea termal, dando un panorama más específico sobre cómo el extractor no funciona simplemente con acción del viento, pero en conjunto con este crea la eficiencia de intercambio térmico. El estudio se extiende un poco más que solo el abordaje de su constitución física y se crea la analogía de las turbinas de eje vertical, las cuales fueron usadas en la primera etapa de estudio de los aerogeneradores. El extractor eólico de turbina se definirá como una turbina Darrieus, un sistema de eje vertical ya estudiado por su dinámica y respuesta en aerogeneradores; sus fórmulas dan las herramientas para calcular la potencia de un extractor a partir de datos técnicos encontrados tras el análisis de estos.

En el capítulo cinco, se enfoca la parte total del presente trabajo de graduación, que plantea la posibilidad de dar un segundo uso a un extractor de turbina, conociendo ya sus características, estudiando una forma de generar energía a partir de él. En este capítulo se hace un acercamiento a los sistemas generadores comunes eólicos, descubriendo cómo estos tratan la fuerza

proveniente del viento, ofreciendo herramientas para un diseño modular analizable. Se describen los generadores, sus tipos y cómo se trata la energía capturada. Se plantea la necesidad de tener cajas multiplicadoras o transmisiones para optimizar el movimiento del rotor. El control de velocidad en estos dispositivos es fundamental para evitar pérdidas en su desempeño o fallas en sí mismo, esto asegurará la calidad de potencia que se enviará a la red.

El capítulo seis trata del equilibrio entre la energía mecánica que el extractor produce durante el tiempo y la ausencia de la misma al detenerse el extractor, proponiendo una forma de almacenar la energía por medios acumulativos (baterías). Se describen los medios más comunes de almacenaje, partiendo de una base de plomo, llegando a tecnologías de punta como el AGM y litio. Se plantea un análisis comparativo entre estos elementos, costos y características para el diseño.

En el capítulo siete se plantea el análisis técnico y teórico de la propuesta de un diseño de aerogenerador y la ventaja de conexión para la obtención de energía a partir de un extractor de turbina, se describe la interacción entre cada etapa de control y la lógica a seguir para cada sensor y actuador. La sustentación del diseño es la turbina de eje vertical tipo Darrieus, describiendo datos técnicos y cálculos a partir de información recolectada e introducida en fórmulas específicas que describen el movimiento de este tipo de turbina. Los resultados darán una visión más clara en lo referente a pérdidas y resistencias de los mecanismos de transmisión, la potencia máxima del rotor, el control de potencia y seguridad de la misma.

El capítulo ocho procura dar un panorama del nivel de costo beneficio, si su rentabilidad es la adecuada para implementar el diseño en extractores eólicos de turbina. Se describen tres panoramas, el legal, que debe ser tomado en cuenta

para conocer si existe algún costo por permisos o distribución. El siguiente sería el costo de implementar el diseño en la práctica, una breve descripción de los componentes que intervienen en el proceso de control y generación de la energía y el costo de los mismos. Por último, se analiza el capital de retorno, en donde se hace una comparación entre el costo de generar por este medio y el que distribuye el CNEE, dando una visión de la posibilidad de obtener beneficios a corto plazo.

El capítulo nueve presenta dos entornos posibles para la implementación del diseño, el cual describe las necesidades de cada entorno, así como sus datos térmicos y de flujo de aire. También se describe cómo el diseño puede ayudar a resolver dos problemas en los entornos, la extracción de aire y la obtención de energía de respaldo para sistemas de ayuda visual y lámparas de emergencia. La ubicación se propone para ser implementado experimentalmente en la dirección que consta en este capítulo, donde el índice de calor de las ubicaciones no es confortable y la utilización de extractores es apropiada para el recambio de gases y temperatura. Al dotarla de una segunda función, se podría reutilizar el mismo movimiento de extracción como medio de generación de energía.

# 1. ENERGÍA ATMOSFÉRICA, EL VIENTO

Se define como viento a todo movimiento de masa de aire, que se genera en consecuencia del calentamiento desigual de la superficie terrestre, generando una fuerza mecánica. Gran cantidad de energía que llega a la tierra proviene del sol que, en lugares favorables puede llegar a ser del orden de 2 000 kW/m<sup>2</sup> anuales; el 2 % de ella se transforma en energía eólica capaz de proporcionar una potencia del orden de 1 017 kW.

## 1.1. Naturaleza del fenómeno atmosférico

El aire, resultado de la acción de la presión, se desplaza en la atmósfera a diferentes velocidades, dando lugar al viento. La magnitud de velocidades es mayor cuanto mayor sea la diferencia de presiones en conjunto con el giro de la tierra, generando movimiento.

Las principales variantes del origen del viento son:

- La radiación solar que es más importante en el ecuador que en los polos.
- La rotación de la tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.
- Las perturbaciones atmosféricas.

Las relaciones entre aceleraciones sugiere el movimiento de la tierra, definiéndose una aceleración absoluta de la suma de tres particulares: una relativa según en el eje de medición, la de arrastre o centrífuga y la aceleración

de Coriolis, efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación cuando un cuerpo se encuentra en movimiento respecto de dicho sistema de referencia.

$$a_{(\text{absoluta})} = a_{(\text{relativa})} + a_{(\text{arrastre})} + a_{(\text{Coriolis})} \quad [\text{Ec. 1.1.1}]$$

La teoría indica que el viento es un diferencial de movimiento en un tiempo, pero en su versión simplificada, es resultado de cambios de la presión, densidad del aire, aceleraciones de origen gravitatorio, así como la velocidad angular de la tierra y el vector posición de la partícula en el globo terrestre, dando como resultado cambios en los tres ejes coordenados.

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \nabla \gamma - 2w \cdot \vec{r} \quad [\text{Ec. 1.1.2}]$$

Donde

$\frac{dx}{dt}$  = velocidad del viento

$\nabla P$  = cambio de la presión

$\rho$  = densidad del aire

$\nabla \gamma$  = aceleración de origen gravitatorio

$w$  = velocidad angular de la tierra

$r$  = vector posición de las partículas

Al trabajar en tres dimensiones, la ecuación simplificada del viento se convierte en una ecuación vectorial diferencial, conocida como Navier Stokes, que rige el movimiento del aire sobre la tierra. En aquellas zonas en donde la radiación solar es más intensa, como en el ecuador, el globo terrestre acumula calor, principalmente en el océano, calor que, por el contrario, se pierde en los polos. Sin embargo, ni el ecuador ni los polos vienen a ser, por término medio, los lugares más calientes, o más fríos, de la superficie terrestre.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - 2w \left( \cos \gamma \frac{dz}{dt} - \text{sen} \gamma \frac{dy}{dt} \right) \quad [\text{Ec.1.1.3}]$$

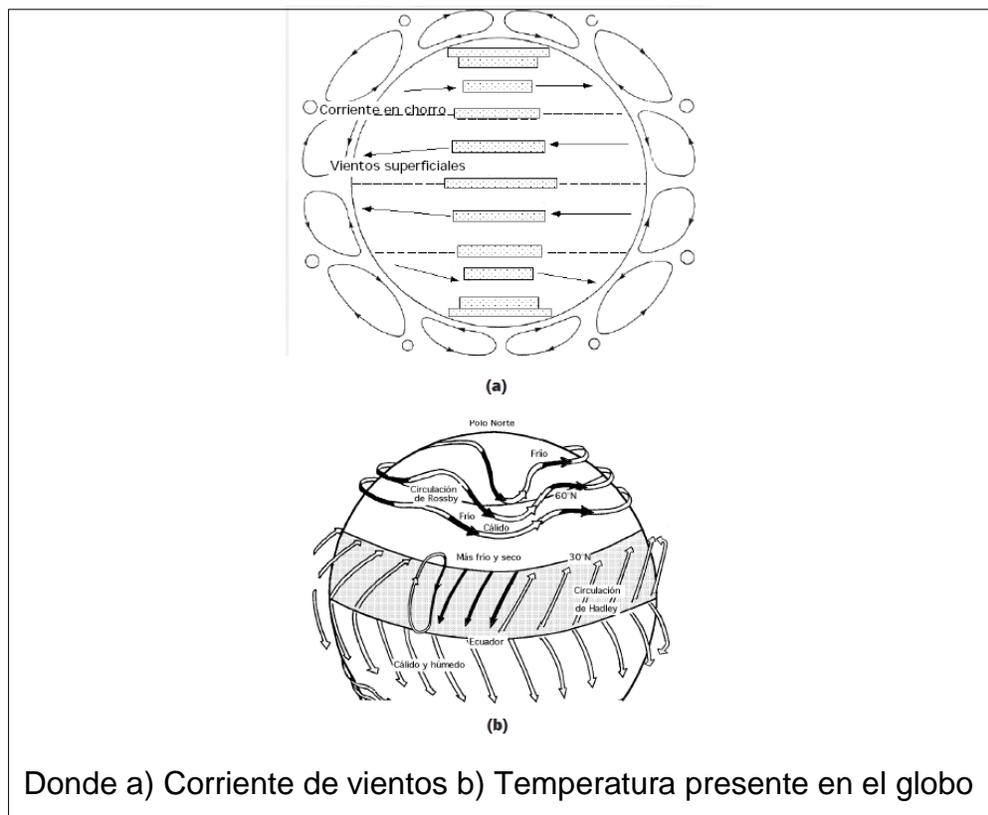
$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - 2w \left( \cos \gamma \frac{dx}{dt} \right) \quad [\text{Ec.1.1.4}]$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - 2w \left( \cos \gamma \frac{dz}{dt} - g \right) \quad [\text{Ec.1.1.5}]$$

Donde

g = gravedad de la tierra

Figura 1. **Vientos terrestres causados por el sol**



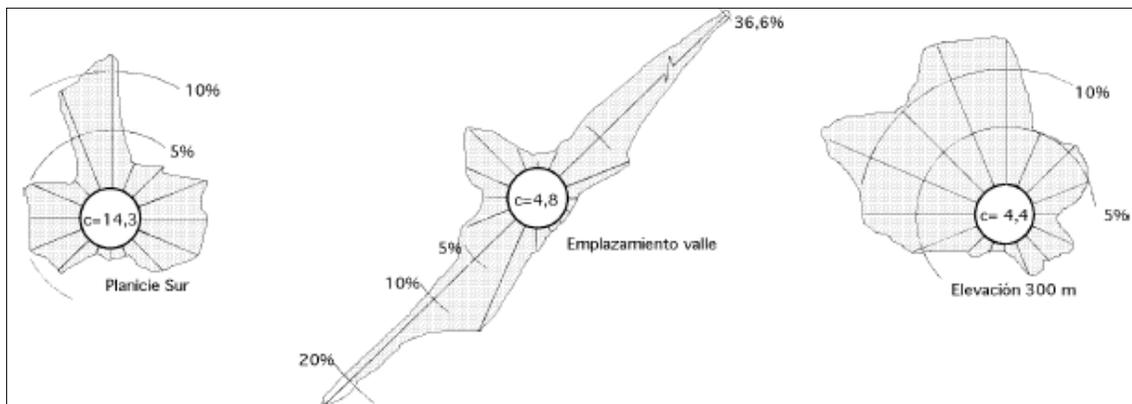
Fuente: *Atmospheric fan system*.

<http://www.extractores.com.mx/energia%20atmosferica.htm>. [Consulta: junio de 2015].

## 1.2. Leyes que rigen el flujo de aire terrestre

Definido el viento por dos parámetros esenciales, dirección y velocidad. La dirección del viento y el tiempo como magnitud conducen a la ejecución de la llamada rosa de los vientos. Según datos estadísticos del Insivumeh la velocidad media del viento en el departamento de Guatemala en los últimos 3 años varía en promedio entre 2,7 m/s y 14,6 m/s, estas velocidades pueden ser variables durante el día correspondiendo al efecto föhn.

Figura 2. Rosa de los vientos



Fuente: *Atmospheric fan system*.

<http://www.extractores.com.mx/energia%20atmosferica.htm>. [Consulta: junio de 2015].

### 1.2.1. Efecto föhn

Factores como la altitud y de la topografía determinan la velocidad media del viento, donde los vientos más suaves o débiles suceden durante la noche, variando muy poco y aumentando a partir de la salida del sol a un ritmo considerable, llegando a alcanzar su máximo entre las 12 y 16 horas solares. Según sea la velocidad se pueden considerar tres tipos de definiciones:

- Viento instantáneo: se mide la velocidad del viento en un instante determinado.
- Viento medio aeronáutico: se mide la velocidad media durante 2 minutos.
- Viento medio meteorológico: se mide la velocidad media durante 10 minutos.

Se distinguen también ráfagas, que son un aumento brutal y de corta duración de la velocidad del viento, propio de tormentas y borrascas y golpes de viento que se entienden como a la velocidad media del viento en algún lugar.

### 1.2.2. Ley exponencial de Hellmann

La magnitud en la velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann, de la forma:

$$V_h = v_{10} \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha \quad [\text{Ec.1.2.2.1}]$$

Donde

$V_h$  = velocidad del viento a la altura  $h$

$v_{10}$  = velocidad del viento a 10 metros

$h$  = altura a medir

$\alpha$  = exponente de Hellmann

Esta expresión relaciona la velocidad del viento medido a diez metros, la altura a medir y la exponente de Hellmann ( $\alpha$ ) la cual varía con la rugosidad del terreno y cuyos valores están indicados en la tabla I

Tabla I. **Exponente de Hellmann según rugosidad del terreno**

Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha = 0,08 \div 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0,14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0,13 \div 0,16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0,2 \div 0,26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0,25 \div 0,4$

Fuente: *Atmospheric fan system*.

<http://www.extractores.com.mx/energia%20atmosferica.htm>. [Consulta: junio de 2015].

La información de estas tendencias es importante para la aplicabilidad de técnicas de diseño de máquinas eólicas, pues la determinación de cuando es la mejor opción para recolectar energía viene en función de la velocidad, en la cual el viento puede proporcionar una potencia real sin pérdidas.

Una máquina eólica concibe determinadas velocidades de arranque, que se relacionan a una velocidad nominal o de estabilidad ( $V_{nom}$ ), siendo mayores o menores tomará la decisión de cual será la manera de obtener la energía que el viento proporciona.

### 1.3. **Energía utilizable del viento**

Una de las ventajas de entender el comportamiento del viento, es que a partir de un modelo estadístico e integral se puede hacer uso de su fuerza para aplicaciones de generación de energía eléctrica.

### 1.3.1. Curva de duración de la velocidad

La duración que el viento actúa en un lugar, se describe estadísticamente y tiende a aplanarse cuando aumenta el tiempo durante el cual el viento persiste a una cierta velocidad, siendo la velocidad media:

$$\hat{V} = \frac{1}{8760} \int_0^{8760} v dt \quad \text{Velocidad media} \quad [\text{Ec.1.3.1.1}]$$

La intensidad energética del viento es la relación entre la potencia y la superficie frontal y proporcional al cubo de la velocidad.

$$\frac{N_v}{A} = I_h = I_{10} \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{3 \cdot \alpha} \quad [\text{Ec.1.3.1.2}]$$

En el diseño de la máquina eólica que recolecta energía se pueden considerar tres velocidades del viento. La velocidad de conexión ( $V_{\text{conex.}}$ ), aquella velocidad del viento por encima de la cual se genera energía; por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía.

Una velocidad nominal ( $V_{\text{nom}}$ ), velocidad del viento para la que la máquina eólica alcanza su potencia nominal o estable; por encima de esta velocidad la potencia extraída del viento se puede mantener constante. Una velocidad de desconexión ( $V_{\text{emb}}$ ), velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala, los sistemas de seguridad comienzan a actuar frenando la máquina, desconectándose de la red a la que alimenta.

### 1.3.2. Energía útil del viento

Diversos estudios describen una fórmula que relaciona una corriente de aire de densidad ( $\rho$ ) y velocidad ( $\vec{v}$ ), dando lugar la potencia eólica disponible que atraviesa una superficie (A) y hace un recorrido (L) en el tiempo (t).

$$P_{viento} = \frac{E_{cinetica}}{t} = \frac{m \cdot v^2}{2t} = \frac{v^2}{2 \cdot t} \cdot (v \cdot t \cdot A \cdot \rho) = \frac{\rho A}{2} \cdot v^3 \quad [\text{Ec.1.3.2.1}]$$

Donde

$P_{viento}$  = potencia del viento

$\frac{E_{cinetica}}{t}$  = energía cinética en el tiempo

m = masa

v = velocidad

A = área de incidencia

$\rho$  = densidad del medio

De este concepto se obtienen las siguientes consecuencias:

- La potencia del viento ( $P_{viento}$ ) varía fuertemente con la velocidad, siendo preciso hacer las mediciones del lugar exacto donde se quiera instalar el sistema de generación eólica.
- La potencia del viento ( $P_{viento}$ ) varía con la densidad del aire, a causa de las variaciones de presión y temperatura, en valores que pueden oscilar de un 10 a un 15 % a lo largo del año.

## **2. ACTUACIÓN DEL VIENTO EN GUATEMALA**

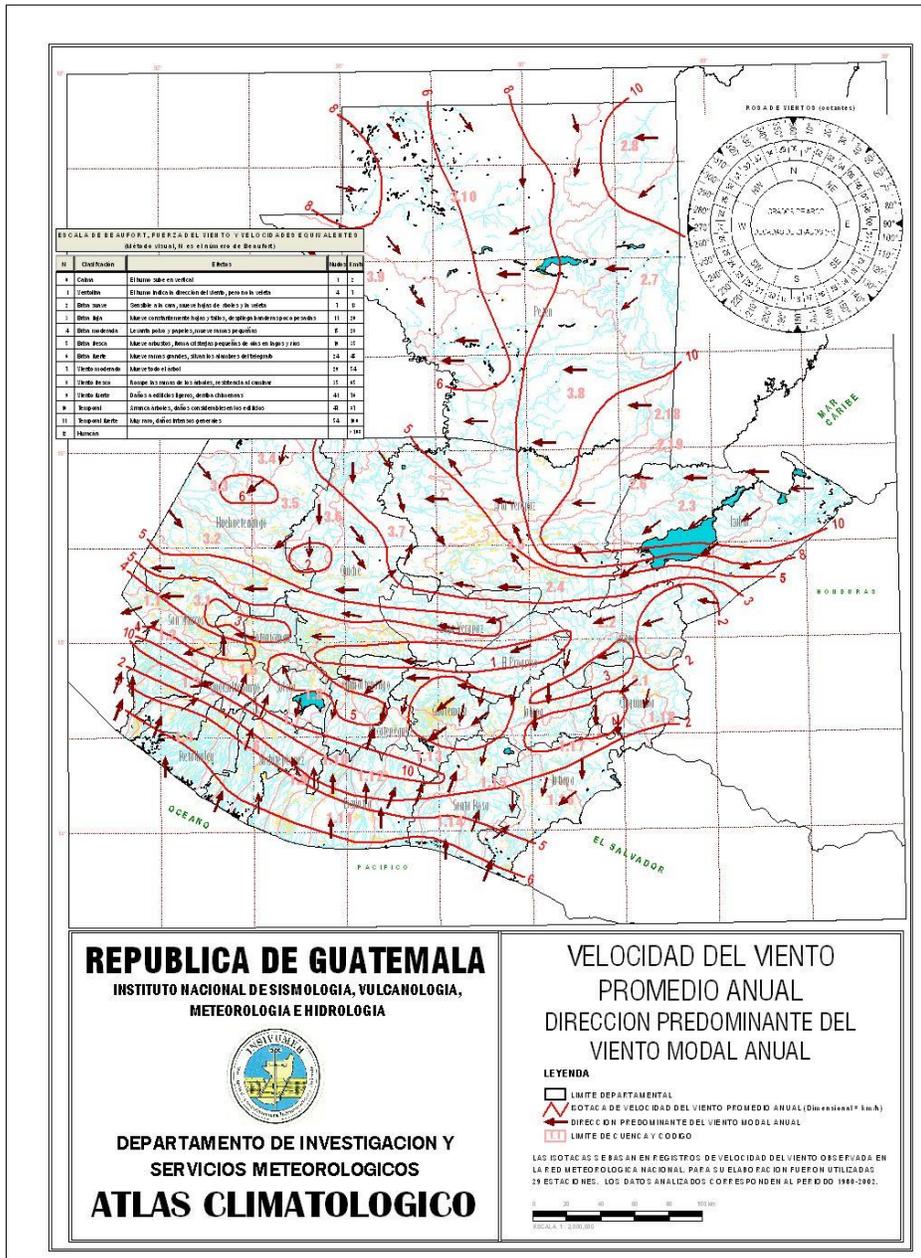
En Guatemala, la actuación del viento es de suma importancia, pues es poseedora de una gran energía renovable sin utilizar. Dicha acción está catalogada en estudios estadísticos, obtenidas a partir de estaciones metrológicas posicionadas en diferentes puntos de la región. Su análisis y muestra de información está a cargo de dos entidades, Ministerio de Energía y Minas (MEM) y el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh).

### **2.1. Sistemas de presión presentes en la región**

Desde un entorno general, los datos recolectados para Guatemala durante los periodos de 1990 a 2012 según el Insivumeh se muestran en la tabla II, su promedio se basa en la razón de los meses del año y las presiones presentes en cada estación.

Concretamente, el valor informativo de estos datos se enfoca en las magnitudes presentes durante el tiempo en la región central del país, precisamente en el departamento de Guatemala, donde los datos indican un promedio general durante los 23 años de estudio en 2,11 m/s, pero indicando un aumento moderado en las velocidades cada año.

Figura 3. Velocidad del viento promedio anual en Guatemala



Fuente: Insivumeh.

[http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS\\_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas\\_Climatologico/viento.jpg](http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico/viento.jpg). [Consulta: junio de 2015].

Tabla II. Datos promedio de viento en la región central de Guatemala

<b>ESTACION INSIVUMEH</b>													
<b>Promedios mensuales y anuales de Velocidad del Viento (Kilómetros Por Hora)</b>													
<b>AÑO</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>ANUAL</b>
1990	14.3	6.0	0.0	N/D	1.7								
1991	4.0	3.0	13.7	11.9	11.4	9.7	15.1	13.9	12.0	11.0	16.8	16.6	11.6
1992	2.0	2.8	3.8	3.2	3.8	3.4	5.6	4.6	4.0	2.9	3.1	6.0	3.8
1993	8.1	5.5	5.0	3.6	2.3	2.8	6.9	5.1	5.1	5.1	7.1	5.6	5.0
1994	7.1	6.6	2.0	5.7	6.6	7.1	8.3	11.6	7.1	6.4	6.7	5.1	6.7
1995	7.0	8.0	8.0	9.6	6.4	8.1	8.6	6.5	7.3	6.8	1.5	2.0	6.7
1996	3.0	4.0	4.0	4.6	5.6	4.3	4.2	5.4	6.2	5.3	N/D	7.0	4.5
1997	5.0	6.4	5.0	5.2	4.9	3.5	7.4	6.7	3.6	4.9	5.4	4.4	5.2
1998	5.6	7.2	6.7	5.0	4.8	4.5	5.1	5.0	3.6	4.1	6.5	6.9	5.4
1999	6.5	6.0	6.3	5.4	5.6	3.0	5.1	3.7	3.0	4.0	7.3	7.8	5.3
2000	6.9	6.5	4.7	5.0	3.4	4.0	5.9	5.3	2.9	6.0	5.1	7.3	5.3
2001	7.2	7.1	5.6	5.6	3.6	4.7	4.9	5.4	4.4	5.6	5.9	5.8	5.5
2002	6.4	6.2	11.9	5.7	8.2	3.7	5.3	5.8	4.7	4.2	5.9	5.2	6.1
2003	6.9	8.8	5.0	4.3	2.7	5.4	6.1	5.0	2.6	3.1	7.2	6.6	5.3
2004	7.0	5.8	8.2	5.7	11.4	4.9	12.3	11.6	7.0	6.6	12.7	13.3	8.9
2005	15.1	14.1	17.4	18.8	13.9	12.1	14.3	15.1	16.2	17.0	21.7	19.7	16.3
2006	24.8	22.4	18.5	18.1	12.3	15.2	16.9	17.1	13.5	6.9	19.8	18.8	17.0
2007	6.9	5.3	5.6	7.6	7.9	4.4	4.6	4.1	4.4	4.3	7.7	5.7	5.7
2008	6.4	8.5	10.3	10.2	8.8	10.0	7.8	8.2	8.4	11.6	23.5	21.9	11.3
2009	10.0	13.7	11.3	9.8	9.1	7.8	11.1	10.7	8.4	8.4	10.8	9.8	10.1
2010	12.6	11.4	11.1	10.0	9.7	9.7	9.7	8.5	7.7	8.0	7.8	9.6	9.7
2011	9.3	8.3	9.8	8.4	7.4	4.8	4.9	4.5	5.9	6.4	7.9	8.6	7.2
2012	8.8	7.9	8.6	7.1	5.2	5.0	5.0	5.7	11.7	15.9	22.7	19.2	10.2

N/D = NO DATO

Fuente: *Insivumeh*.

<http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/GUATEMALA/Insivumeh/Velocidad%20del%20Viento%20Insivumeh.htm>. [Consulta: junio de 2015].

## **2.2. Densidad del viento para generadoras eólicas**

Como objetivo de la política energética (2013-2027) del Ministerio de Energía y Minas, se prioriza la seguridad del abastecimiento de electricidad a precios competitivos. Para lograr cumplir con los objetivos operativos y metas a largo plazo, el MEM ha venido implementando acciones que ayudan a diversificar la matriz de generación eléctrica a través de promocionar e incentivar la generación de energías renovables.

En este sentido, se realizó un estudio de medición del viento en el periodo de 2006 a 2014, en el cual su prioridad era conocer el potencial eólico del país, contar con bases de datos relacionadas en velocidad y dirección del viento, promover la utilización de los recursos renovables y disminuir la dependencia de combustibles fósiles.

Al crear el mapa de densidad de viento y la implementación de centrales generadoras eólicas, en la tabla III y figura 4 se muestra la clasificación de la densidad de viento en watts metro cuadrado a una altura de 50 metros. La clasificación se hace a través de colores y se les asigna un potencial de viento, la cual empieza en uno y termina en siete.

De acuerdo a esta clasificación, al color blanco (clase 1) se le asigna disponibilidad de viento bajo o pobre con velocidades entre 0 y 5,6 m/s. Para el siguiente color (clase 2), el tipo de recurso es marginal y sus velocidades oscilan entre 5,6 y 6,4 m/s. Para el color amarillo (clase 3), la designación es moderada con velocidades entre 6,4 y 7,0 m/s. El color rosado (clase 4), la disponibilidad del recurso es buena y sus velocidades están en el rango de 7,0 y 7,5 m/s. Por último, a partir del color morado (clase 5), el recurso disponible es excelente y las velocidades empiezan en 7,5 y terminan en 8,0 m/s, Los otros dos colores, rojo y

azul (clases 6 y 7), también serían excelentes y las velocidades estarían por arriba de los 8 m/s.

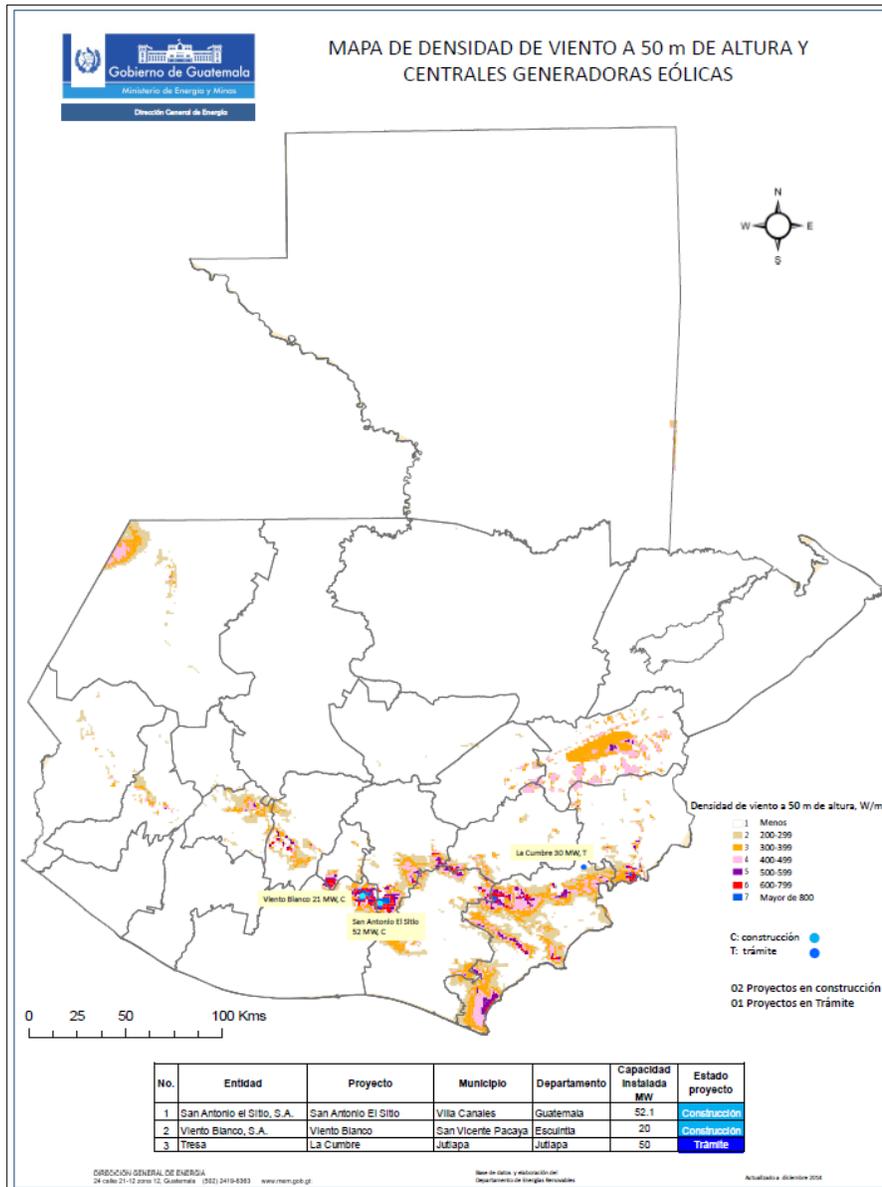
Tabla III. Clasificación del poder del viento

<b>Wind Power Classification</b>			
<b>Nivel del viento</b>	<b>Potencial</b>	<b>Potencia del viento Densidad a 50m W/m<sup>2</sup></b>	<b>Velocidad <sup>a</sup> del viento a 50m - m/s</b>
	1 <b>Pobre</b>	0 - 200	0 - 5.6
	2 <b>Marginal</b>	200 - 300	5.6 - 6.4
	3 <b>Moderado</b>	300 - 400	6.4 - 7.0
	4 <b>Bueno</b>	400 - 500	7.0 - 7.5
	5 <b>Excelente</b>	500 - 600	7.5 - 8.0
	6	600 - 800	8.0 - 8.8
	7	> 800	> 8.8

<sup>a</sup> Datos basados en la distribución de Weibull con K = 2.0

Fuente: MEM. <http://www.mem.gob.gt/viceministerio-del-area-energetica-2/energias-renovables/base-de-datos-recursos-energeticos-renovables/>. [Consulta: junio de 2015].

Figura 4. Mapa de densidad del viento y centrales generadoras

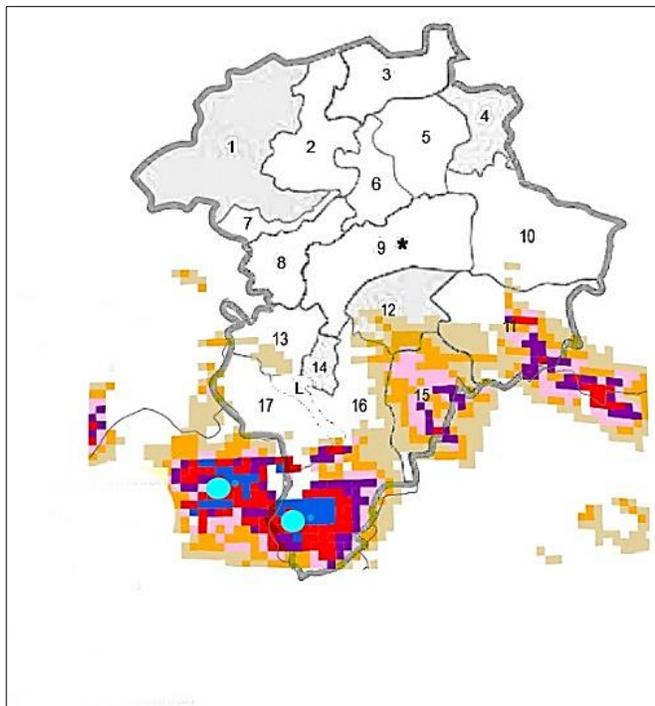


Fuente: MEM. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Resumen-de-Mediciones-de-viento-en-Guatemala-hasta-el-2014.pdf>. [Consulta: junio de 2015].

Sectorizando el punto de interés en la región central, para el departamento de Guatemala y sus municipios, se descubre un rango apreciable de factores que contribuyen a un flujo variado de vientos, los cuales están más fuertemente marcados en la región sur del departamento.

El estudio se limita al sector de ciudad de Guatemala (sector 9) y Villa Nueva (sector 13) del departamento de Guatemala, donde los rangos entre 5,5 a 6,4 m/s son rangos pobres y marginales según el informe. Esto es, no una limitante, sino un precedente para el diseño de un generador eólico por extractor atmosférico de turbina.

Figura 5. **Factor del viento sector departamento de Guatemala**



Fuente: elaboración propia, empleando PaintShop Pro.

### **2.3. Estudio del viento y su influencia en la región**

Como meta a largo plazo, el MEM pretende para el 2027 alcanzar el 80 % de la generación a base de las fuentes renovables, dando paso con esto a la incursión de la generación de tecnologías no convencional, como la energía solar y la energía eólica.

El MEM promueve el desarrollo sostenible y sustentable a partir de los recursos renovables y no renovables del país. En de este contexto, la Dirección General de Energía (DGE) promueve la localización, evaluación e inventario de los recursos energéticos renovables, los cuales sirven para la generación de energía.

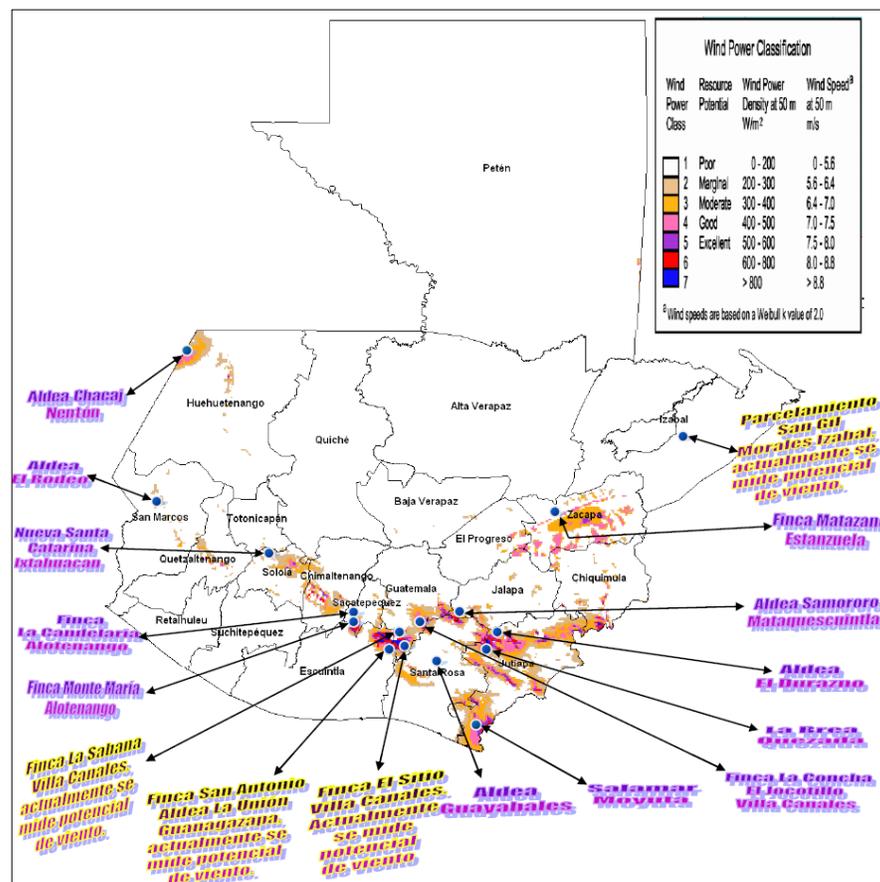
La DGE está desarrollando acciones para el uso de la energía proveniente del viento, a través del proyecto de instalación de estaciones de medición para captación de variables eólicas en Guatemala, las cuales generan información para el desarrollo de proyectos energéticos en el futuro, tales como proyectos de generación de energía eléctrica, bombeo de agua, entre otras aplicaciones.

El proyecto consiste en la medición del recurso eólico a nivel nacional; con la instalación de estaciones de medición se logra medir y recopilar información de las distintas variables eólicas, como la velocidad y dirección del viento, radiación solar, presión barométrica y temperatura.

Actualmente, se miden variables eólicas en los siguientes lugares: finca San Antonio, ubicada en la Aldea La Unión, municipio de Guanagazapa, departamento de Escuintla; finca Bella Vista, parcelamiento San Gil, municipio de Morales, departamento de Izabal; finca La Sabana, Santa Elena Barillas,

municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala y finca El Sitio, aldea Los Llanos, municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala.

Figura 6. Mapa de potencial eólico en Guatemala



Fuente: MEM. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Resumen-de-Mediciones-de-viento-en-Guatemala-hasta-el-2014.pdf>. [Consulta: junio de 2015].



### **3. LEGISLACIÓN NACIONAL GUATEMALTECA PARA FUENTES RENOVABLES**

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) es la institución rectora de los sectores energético y minero, que fomenta el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales del país. Es este el que propicia y ejecuta las acciones que permitan la inversión destinada al aprovechamiento integral de los recursos naturales, que proveen bienes y servicios energéticos y mineros, velando por los derechos de sus usuarios y de la sociedad en general.

La Constitución Política de la República menciona algunos artículos respecto a los recursos no renovables y su explotación en la región, siendo estos:

Artículo 125. Explotación de recursos naturales no renovables. Se declara de utilidad y necesidad públicas, la explotación técnica y racional de hidrocarburos, minerales y demás recursos naturales no renovables.

Artículo 129. Electrificación. Se declara de urgencia nacional, la electrificación del país, con base en planes formulados por el Estado y las municipalidades, en la cual podrá participar la iniciativa privada.

Ley del Organismo Ejecutivo (Decreto 114-97).

“Artículo 34. Ministerio de Energía y Minas. Le corresponde atender lo relativo al régimen jurídico aplicable a la producción, distribución y comercialización de la energía y de los hidrocarburos, y a la explotación de los recursos mineros.”

Reglamento Orgánico Interno del Ministerio de Energía y Minas (Acuerdo Gubernativo 382-2006).

Según estos artículos los recursos renovables no son regulables y están libres, suponiendo esto se acuerda decretar nuevas directrices para el establecimiento de normas e incentivos.

### **3.1. Decreto número 52-2003**

Según este decreto en conformidad con el artículo 119 de la Constitución Política de la República, es obligación fundamental del Estado orientar la economía nacional para lograr la utilización de los recursos naturales, adoptando las medidas que sean necesarias para su aprovechamiento en forma eficiente. En virtud de que el desarrollo de los recursos energéticos renovables es de interés público, así como otorgar incentivos, de conformidad con la ley, a las empresas industriales que se establezcan en el interior de la República y contribuyan a la descentralización.

Considerando que Guatemala cuenta con recursos naturales renovables suficientes en cantidad y calidad, que su aprovechamiento otorgará al país una mayor independencia en la compra de los combustibles fósiles, facilitando con ello el suministro de energía económica a favor del consumidor final, de la población guatemalteca y de la región centroamericana en general, minimizando así una fuga irreversible de divisas por concepto de compra de estos combustibles no disponibles localmente.

Se hace necesario emitir una norma legal que promueva en forma activa el desarrollo y aprovechamiento efectivo de los recursos energéticos renovables en Guatemala, que permita, a mediano y largo plazo, alcanzar un desarrollo continuo

de estos recursos, lograr un equilibrio entre las fuentes de energía nacionales e importadas, lo que repercutirá en una mejora de la calidad ambiental del país y la participación de inversionistas interesados en el sector de energía renovable.

Se pasa a decretar una de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable, donde pretende estimular el estudio, implementación, inversión y desarrollo de recursos renovables en el país. En sus definiciones e incentivos trata de dar facilidades para que las empresas puedan empezar a ver un panorama rentable de estudio e implementación. Esto llevó al Acuerdo Gubernativo número 211-2005, en el cual se pretende dar un reglamento de ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable.

El reglamento tiene por objeto desarrollar los preceptos normativos de la *Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable* y asegurar las condiciones adecuadas para la calificación y aplicación concreta de los incentivos establecidos. Aborda temas como la evaluación y calificación de proyectos, procedimientos específicos para el desarrollo de los proyectos y qué será necesario y afectado en el proceso, así como las obligaciones, repercusiones y aplicaciones de métodos de los titulares de los proyectos ante el país.

### **3.2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica**

Según el Acuerdo Gubernativo 404-97 se crea la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), la cual es parte del Ministerio de Energía y Minas, con independencia en sus funciones y es la encargada de cumplir las leyes y reglamentos, así como imponer sanciones a infractores que no la cumplan. Otra función importante es la definición de tarifas de transmisión y distribución sujetas a regulación. Entre sus muchas normas, la más importante, que concierne a las

energías renovables es *Normas técnicas para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable* (NTGDR).

NTGDR establece las disposiciones generales que deben cumplir los generadores de energía renovable y los distribuidores para la conexión, operación y control comercial de la energía eléctrica producida con fuentes renovables.

Según estas disposiciones, se puede clasificar la generación en autoconsumo, la cual será utilizado solo internamente sin transferencia del mismo a la red, y gran usuario, la cual genera para comercializar. Para esta clasificación, el máximo es 100 KW, con lo cual podrá entrar a vender, si así lo desee, a una empresa intermediaria que luego realizará negocios con el Administrador de Mercado Mayorista (AMM). Si la cuota de generación es mayor a 10 MW, podrá hacer el negocio directamente con la AMM.

### **3.3. Administrador de Mercado Mayorista**

AMM es una entidad privada sin fines de lucro, cuyas funciones, entre otras, son coordinación de la operación de centrales generadoras, interconexiones internacionales y líneas de transporte al mínimo costo para el conjunto de operaciones del mercado mayorista, se creó a partir del artículo 44 de la Ley General de Electricidad.

Establece precios en el mercado de corto plazo para la transferencia de potencia y energía entre generadoras, comercializadores, distribuidores, importadores y exportadores. Su reglamento está regido por el Acuerdo Gubernativo 299-98 y define los límites generales para el funcionamiento del mercado mayorista, la organización, funciones, obligaciones y mecanismos de

financiamiento del AMM. Algunas reformas más se realizaron en el acuerdo 69-2007, sin tener cambios significativos para generadores.

La legislación no establece pautas claras sobre la explotación eólica, es decir que está libre de permisos de explotación e implementación sin regularización aparente. Esto presenta una ventaja par implementaciones a nivel macro, pero una desventaja si esta explotación se hace desmedida. La generación por esta vía tiene las mismas directrices para su venta y distribución que las demás formas de generar energía.



## **4. EXTRACTORES EÓLICOS ATMOSFÉRICOS**

Es el sistema de ventilación y de extracción más eficiente y económico, que proporciona un ambiente renovado permanentemente las 24 horas del día sin consumo eléctrico o combustible. Hacen el intercambio de aire y temperatura entre dos áreas por acción del viento y diferencia de temperatura ambiental iniciando su funcionamiento con una diferencia de 3 °C entre la nave y el exterior o una velocidad del viento de 2,22 m/s.

### **4.1. Funcionamiento de un extractor atmosférico eólico**

El extractor de turbina, estructuralmente formado por una burbuja esférica obtusa creada a partir de pliegues branquiales facilitadores del flujo del aire, llamada turbina, en una acción mecánica de rotación por el fenómeno físico de chimenea de evacuación de fluidos generado por los gradientes de presión y diferencia de temperatura entre una y otra zona de la edificación y entre el exterior y el interior del mismo.

En la parte exterior, la acción del viento incide en las aletas de la turbina en forma permanente, 360° grados, no importando la dirección del viento. Esta acción genera una aportación más a la rotación, aumentando la presión negativa que succiona los gases interiores de la edificación, expulsándolos al exterior. El volumen de aire a extraer está condicionado a la velocidad del viento, la orientación del edificio, el diseño y la existencia de obstáculos en las proximidades del mismo.

Figura 7. **Extractor eólico de turbina**



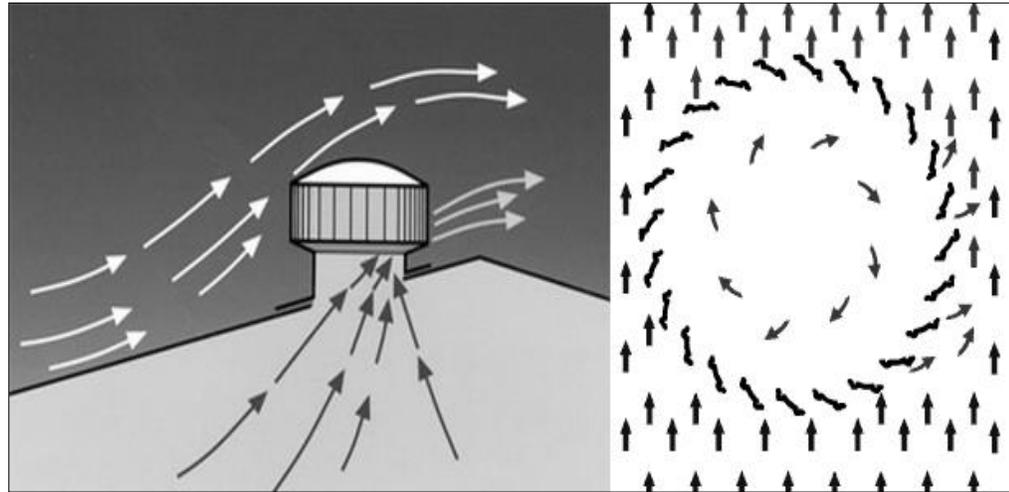
Fuente: *Tecno-renting*. <http://www.tecno-renting.com/wp-content/uploads/2015/03/extractor-grande.jpg>. [Consulta: julio de 2015].

El extractor de turbina permanentemente succiona hacia afuera el aire caliente acumulado debajo de la cubierta, el cual es compensado de manera natural mediante la entrada de aire fresco a través de las ventanas ubicadas estratégicamente en los estratos más bajos de la edificación. Este proceso, técnicamente dirigido, genera un nivel de circulación de aire dentro del recinto que garantiza la correcta ventilación del mismo.

#### **4.1.1. Funcionamiento con y sin viento**

La figura 8 ilustra la manera cómo el viento fresco mueve las aspas del extractor, las cuales, por su diseño aerodinámico, generan una fuerza de succión en el interior del aparato, que permite la extracción del aire caliente acumulado bajo la cubierta del lugar.

Figura 8. **Funcionamiento del extractor en condiciones de viento**

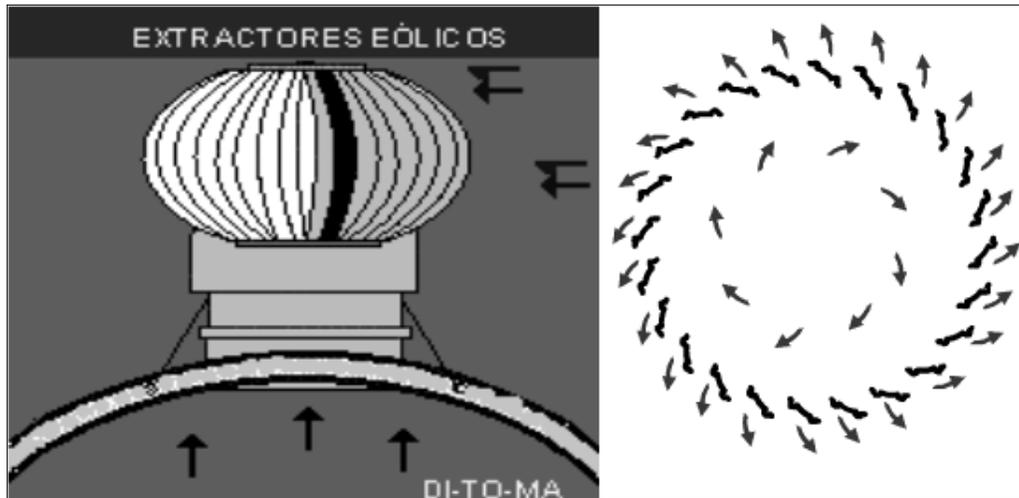


Fuente: *Atmospheric fan system*.

<http://galeon.hispavista.com/extractordecorreos/img/dynamics.jpg>. [Consulta: junio de 2015].

Si el sistema está bajo ausencia total hipotética de viento, el aire frío de los estratos más bajos del interior del inmueble, empuja el aire caliente interior hacia arriba, contra la cubierta, encontrando como vía de escape el extractor. El empuje del aire caliente al chocar con el extractor, mueve sus aspas desde el interior, permitiendo una rápida evacuación.

Figura 9. **Funcionamiento del extractor de turbina sin viento**



Fuente: *Atmospheric fan system.*

<http://galeon.hispavista.com/extractordecorreos/img/EXTRACTOR23.gif>.

[Consulta: junio de 2015].

## 4.2. **Leyes que aplican a extractores eólicos**

Existen estudios exhaustivos matemáticos sobre los intercambios térmicos de fluidos entre diferentes entornos y si a estos se incluyen los aportes de los análisis de turbinas de eje vertical, el conjunto del estudio da como resultado al extractor eólico de turbina, a los cuales se les han catalogado efectos en virtud de una mejor ventilación, estos son los siguientes.

### 4.2.1. **Efecto chimenea**

El movimiento de aire producido por el efecto chimenea ocurre cuando las diferencias de temperatura causan diferencias de densidad en el aire y provocan diferencias de presión entre el interior y el exterior. Al modificar su densidad, el

aire más caliente tiende a elevarse y el más frío a reemplazar el vacío provocado por este desplazamiento.

#### **4.2.2. Estratificación térmica**

La estratificación térmica parte del principio del cambio de densidad del aire, normalmente generada por dos causas principales: las diferencias de los gradientes de presión y temperatura en un espacio determinado, provocando el movimiento interno de las masas de aire, por lo que se origina un flujo en sentido vertical, el cual se verá incrementado si se suman los dos fenómenos. Esta es la razón por la cual, dentro de un espacio cerrado, el aire caliente se posiciona en la parte superior al presentar una menor densidad y el aire más fresco se estaciona en las partes inferiores al presentar mayor densidad, resultado del fenómeno gravitacional.

#### **4.2.3. Chimenea termal**

Utiliza las fuerzas de flotabilidad térmica generadas por las diferencias de temperatura y densidad en un espacio en función de impulsar una circulación vertical de aire a través de su envolvente. Las diferencias de temperatura son causadas por las ganancias térmicas generadas por diversos factores: ocupación, radiación y conducción. El propósito de las chimeneas termales es remover el aire caliente viciado del interior de los edificios.

En este caso, la chimenea termal es un repositorio de aire caliente, que de forma natural se ubica en las zonas superiores de los edificios, permitiendo así la extracción de aire caliente por medio de sus aberturas. Para completar el ciclo, es necesario un ingreso de aire fresco por algunas aberturas inferiores.

### 4.3. Turbinas de eje vertical

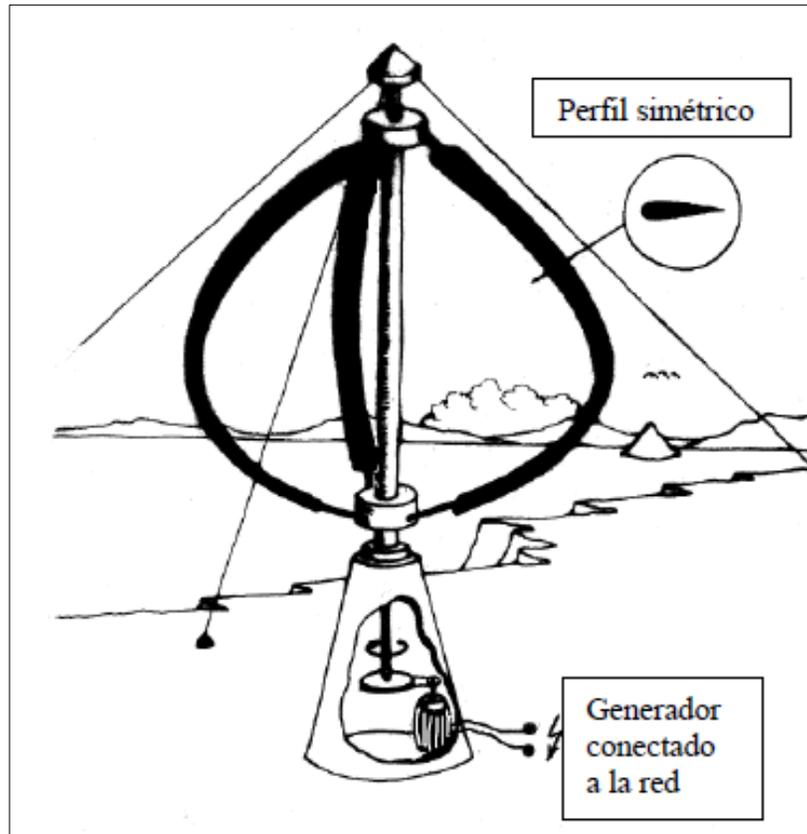
El extractor eólico de turbina, por su constitución, presenta algunos de los lineamientos de las turbinas Darrieus que es de la clase de eje vertical, difiriendo en algunas características propias del extractor. Un rotor Darrieus está constituido con alas de perfil simétrico de alto rendimiento, normalmente se construyen en forma de semicírculos o parábolas y requieren una potencia externa para empezar a girar. La ecuación que explica el comportamiento de la velocidad absoluta de la pala ( $c$ ), la velocidad del viento ( $v'$ ), el ángulo de rotación ( $\varphi$ ) y la velocidad del rotor ( $\lambda$ ) es:

$$c = v' \cdot \sqrt{[(\lambda + \cos\varphi)^2 + (\sin\varphi)^2]} \quad [\text{Ec. 4.3.1}]$$

Entre el ángulo de incidencia  $\alpha$ , el ángulo de rotación  $\varphi$  y la velocidad específica del rotor  $\lambda$  existe la siguiente relación:

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{\sin\varphi}{(\lambda + \cos\varphi)} \right] \quad [\text{Ec. 4.3.2}]$$

Figura 10. Forma básica de una turbina Darrieus

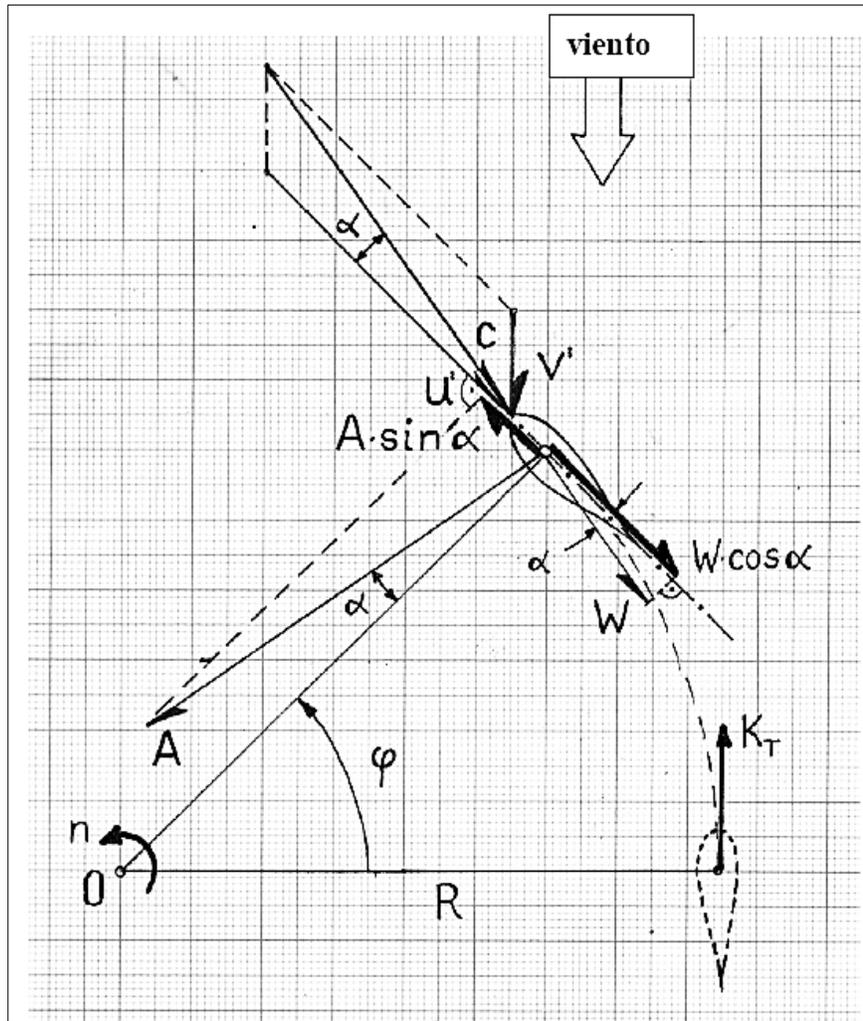


Fuente: *Darrieus - Amics 21*.

[http://www.amics21.com/laveritat/introduccion\\_aerogenerador\\_darrieus.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_aerogenerador_darrieus.pdf).

[Consulta: octubre de 2015].

Figura 11. Fuerzas que actúan en la turbina Darrieus



Fuente: *Darrieus - Amics 21*.

[http://www.amics21.com/laveritat/introduccion\\_aerogenerador\\_darrieus.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_aerogenerador_darrieus.pdf).

[Consulta: octubre de 2015].

El ángulo de incidencia del perfil ( $\alpha$ ) varía durante la rotación de las palas, en cada ángulo ( $\varphi$ ) la fuerza tangencial que actúa sobre las palas es la resultante ( $K_T$ ) de las proyecciones sobre la tangente de los vectores de la fuerza de sustentación  $A$  (área) y la fuerza de resistencia  $W$  (viento).

$$K_T = A \cdot \sin\alpha - W \cdot \cos\alpha$$

$$K_T = [c_a \cdot \sin\alpha - c_w \cdot \cos\alpha] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot c^2 \text{ [N]} \text{ [Ec. 4.3.3]}$$

Donde

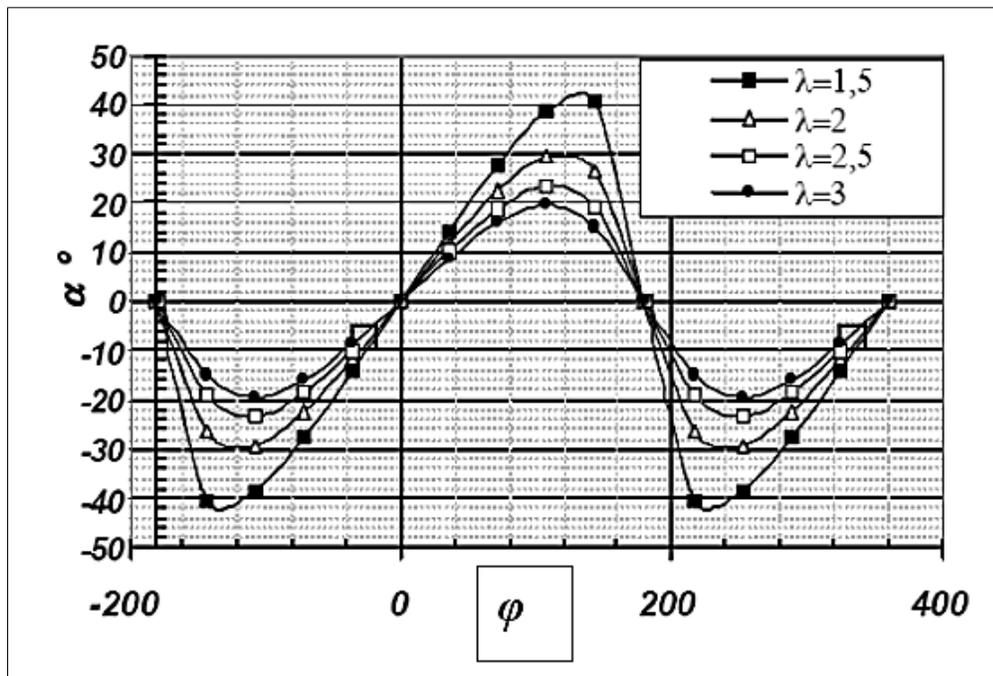
$C_a$  = coeficiente de sustentación del perfil simétrico

$C_w$  = coeficiente de resistencia del perfil simétrico

$\rho$  = densidad media del aire, aproximado 1,25 kg/m<sup>3</sup>

$f$  = superficie de la pala en metros cuadrados

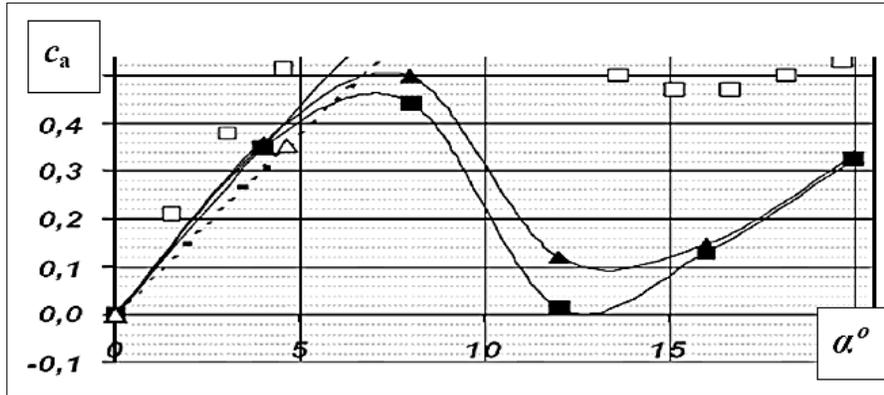
Figura 12. **Ángulo de incidencia  $\alpha$  en función del de rotación  $\phi$**



Fuente: Amics 21.

[http://www.amics21.com/laveritat/introduction\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduction_darrieus_wind_turbines.pdf). [Consulta: octubre de 2015].

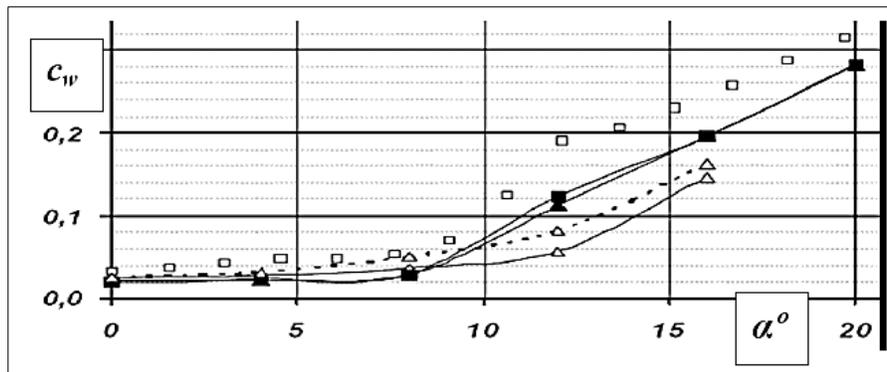
Figura 13. **Coficiente de sustentación  $C_a$**



Fuente: *Amics 21*.

[http://www.amics21.com/laveritat/introduccion\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf/laveritat/introduccion\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_darrieus_wind_turbines.pdf/laveritat/introduccion_darrieus_wind_turbines.pdf). [Consulta: octubre de 2015].

Figura 14. **Coficiente de sustentación  $C_w$**



Fuente: *Amics 21*.

[http://www.amics21.com/laveritat/introduccion\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf/laveritat/introduccion\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_darrieus_wind_turbines.pdf/laveritat/introduccion_darrieus_wind_turbines.pdf). [Consulta: octubre de 2015]

### 4.3.1. Potencia de una turbina Darrieus

Si se toma la ecuación 4.3.3 y se introduce la ecuación 4.3.1 como el valor  $c$  se obtiene:

$$K_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot v^2 \cdot [c_a \cdot \sin\alpha - c_w \cdot \cos\alpha] \cdot [(\lambda + \cos\varphi)^2 + (\sin\varphi)^2] \quad [\text{Ec. 4.3.1.1}]$$

Donde  $f$  es la superficie de la pala. Además, se supone que hay una determinada velocidad del viento constante, en ese caso, el producto de la ecuación  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot v^2$  será una constante y con la ayuda de las figuras 12, 13 y 14, se define el par que representa potencia teórica que define una turbina Darrieus como:

$$f(\lambda, c_a, c_w, \alpha, \varphi) = [c_a \cdot \sin\alpha - c_w \cdot \cos\alpha] \cdot [(\lambda + \cos\varphi)^2 + (\sin\varphi)^2] \quad [\text{Ec. 4.3.1.2}]$$

Con estas se define, tras el estudio de las gráficas de desempeño, el coeficiente de giro de la turbina en:

$$M = \frac{1}{4} \cdot c_m \cdot \rho \cdot H \cdot D^2 \cdot v^2 \quad [\text{Nm}] \quad [\text{Ec. 4.3.1.3}]$$

Así como la potencia desarrollada por la misma

$$P = [(2 \cdot \pi \cdot n) / 60] \cdot M \quad [\text{Ec. 4.3.1.4}]$$

Donde

$v$  = velocidad del viento

$D$  = diámetro de la turbina Darrieus (palas verticales)

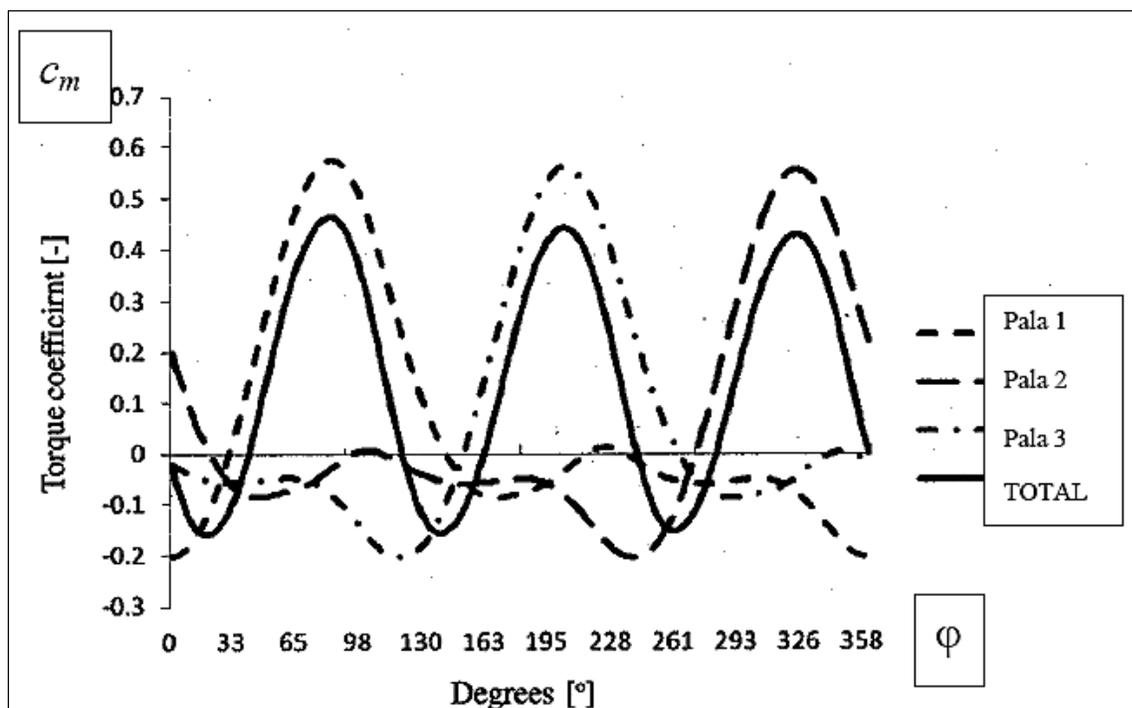
$H$  = altura de la turbina Darrieus (longitud de las palas)

$n$  = número de revoluciones de la turbina Darrieus

Si el diseño de la turbina posee más palas para el giro, la eficiencia es la suma de las aportaciones de cada una en cada revolución. Según la teoría de turbinas eólicas, existe un límite entre la potencia que puede aportar un rotor eólico, el criterio se denomina límite de Betz y radica que la potencia máxima ideal, es igual a:

$$P_{w,max} = 0.37 \cdot F \cdot v^3 = 0.29 \cdot D^2 \cdot v^3 \quad [\text{Ec. 4.3.1.5}]$$

Figura 15. Coeficiente de par de giro  $c_m$  con 3 palas



Fuente: Fuente: *Amics 21*.

[http://www.amics21.com/laveritat/introduction\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf/laveritat/introduction\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduction_darrieus_wind_turbines.pdf/laveritat/introduction_darrieus_wind_turbines.pdf). [Consulta: octubre de 2015].

Donde  $F = (\pi D^2)/4$ , es la superficie en metros cuadrados de barrida por longitud útil de las palas y  $(v)$  la velocidad del viento. Según estudios solo se puede aprovechar 16/27 de la energía del viento.

#### **4.4. Tipos de extracción atmosférica eólica**

Comercialmente, existen muchos modelos que ofrecen la extracción del aire o el recambio de temperaturas en dos lugares, siendo los más importantes:

- Tornado: diseñados para funcionar como equipos estáticos, estos solo empiezan a rotar a partir de vientos a velocidades de 15 kilómetros por hora. Su diseño obedece a que las grandes bocas de salida del equipo permiten la evacuación de fluidos por la sola diferencia de presión, sin requerir mucha rotación. No pueden girar a muchas revoluciones por minuto, como lo hacen los equipos de turbina, porque la carga dinámica que generaría esta rotación acabaría destrozando la cubierta de la edificación. Estos dispositivos hacen uso del efecto de rotación del aire llamado Coriolis, que hace que el aire de la edificación salga con mayor rapidez hacia al exterior.
- Venturi: sistema mecánico que funciona por los fenómenos físicos de chimenea de evacuación de fluidos y Venturi. El primero generado por los gradientes de presión y las diferencias de temperatura entre una y otra zona de la edificación y entre el exterior y el interior del mismo. El segundo por la acción del viento que orienta la boca de salida del extractor siempre hacia sotavento, por medio de una veleta o timón ubicada en la parte superior del extractor que gira de 0 a 360 grados, buscando en forma permanente su misma dirección del aire dominante o sotavento. Esta acción, llamada efecto de Venturi, provoca una presión negativa en la boca de salida que absorbe los gases interiores de la edificación expulsándolos al exterior. El volumen

de aire a extraer está condicionado a la velocidad del viento, la orientación del edificio, el diseño y la existencia de obstáculos en las proximidades del mismo.

- Turbina: sistema mecánico que funciona haciendo rotar la turbina por el fenómeno físico de chimenea de evacuación de fluidos generado por los gradientes de presión y las diferencias de temperatura entre una y otra zona de la edificación, y entre el exterior y el interior del mismo. En la parte exterior, la acción del viento le pega a las aletas de la turbina en forma permanente 360 grados, no importando la dirección del viento. Esa acción la hace rotar aumentando la presión negativa que succiona los gases interiores de la edificación expulsándolos al exterior, el volumen de aire a extraer está condicionado a la velocidad del viento, la orientación del edificio, el diseño y la existencia de obstáculos en las proximidades del mismo.
- Axial: trabaja por la diferencia de presión del interior del recinto con el exterior, no requiere energía para su funcionamiento.

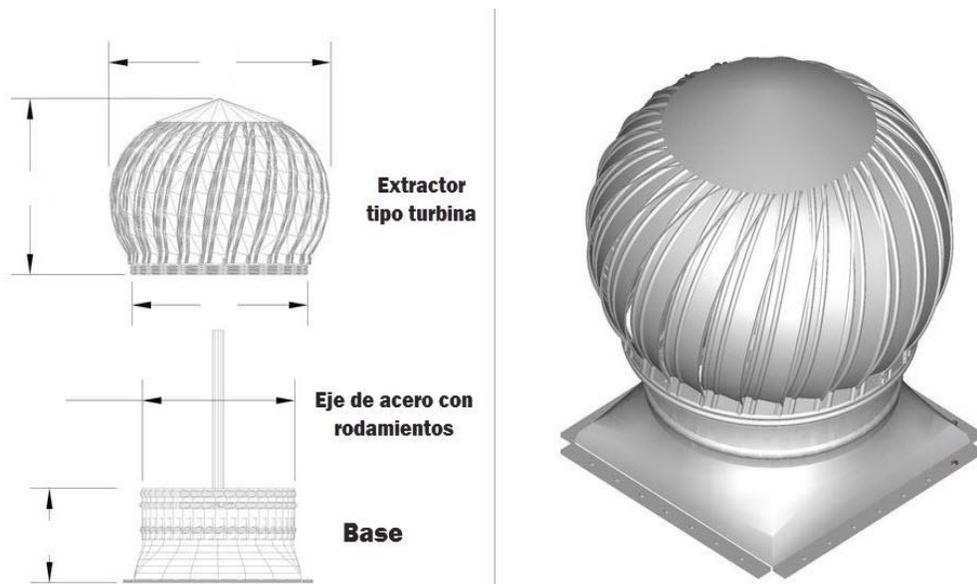
#### **4.5. El extractor de turbina**

Este tipo de extractor presenta una característica muy interesante, la de rotar un eje en el que una burbuja con salidas en sus costados empuja aire al exterior de él, tanto por la acción del viento como por la diferencias de presiones. Este dispositivo genera energía mecánica, el movimiento queda sujeto los parámetros de potencia del viento y temperatura dentro del lugar de extracción.

Comúnmente su estructura es de latón o aluminio, dos elementos livianos que ofrecen una moderada fuerza en el par gravitatorio y, aunado a su moldeado, no presentan mucha resistencia al movimiento. Las partes generales que conforman un sistema de extracción de aire con turbina son:

- Base: adapta el extractor a cualquier tipo de techo: chapa, fibrocemento, loza, claraboyas, entre otros.
- Extractor eólico: consta de una parte giratoria accionada por el viento y una parte fija que lo asegura a la base. Álabes de aluminio con nervaduras longitudinales y micro nervaduras que le otorgan mayor rigidez. Ejes de acero con rodamientos blindados.

Figura 16. **Partes del extractor de turbina eólica**



Fuente: *Ventiladoresindustriales*.

<http://www.ventiladoresindustriales.com.mx/>.

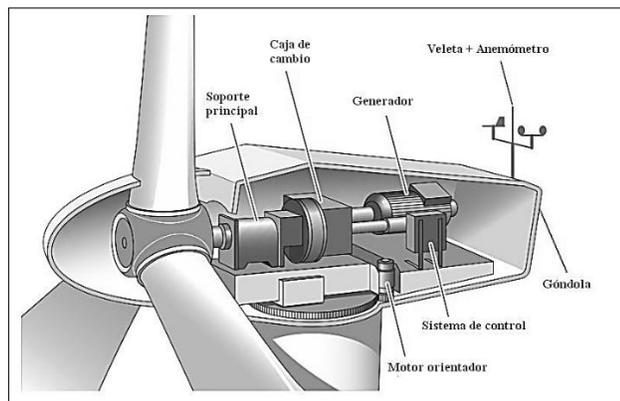
[Consulta: junio de 2015].



## 5. AEROGENERADORES

El generador de inducción, o comúnmente denominado aerogenerador, en términos generales es un dispositivo que convierte la energía del viento en fuerza mecánica de torsión con un diseño específico de turbina, sea esta vertical o horizontal. Esta energía mecánica pasa luego a un generador que puede ser de dos tipos, síncrono o asíncrono, para luego ser distribuida directamente a la red. Para convertir la energía mecánica en energía eléctrica, debe trabajar su generador con una turbina eólica como rotor, el cual suministra una potencia mecánica muy variable (momento torsor). Los aerogeneradores de gran alcance (alrededor de 100-150 kW), pueden producir voltajes 690 V de corriente alterna trifásica (AC), pero esta debe ser enviada a través de un transformador anexo, para aumentar su voltaje entre 10 000 y 30 000 V, para su distribución, dependiendo del estándar de la red eléctrica local.

Figura 17. Partes básicas de un aerogenerador



Fuente: *Energiadoblezero*. [http://energiadoblezero.com/wp-content/uploads/2010/03/turbina\\_eolica.jpg](http://energiadoblezero.com/wp-content/uploads/2010/03/turbina_eolica.jpg). [Consulta: septiembre de 2015].

## 5.1. Generadores

Existen varias definiciones para explicar el proceso por el cual un sistema transforma la energía mecánica en eléctrica, pero, dando una definición general, se puede decir que un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos llamados polos, transformando la energía mecánica en eléctrica, transformación que se consigue al incidir un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura o estator. Al generarse mecánicamente un movimiento sobre los conductores y el campo, se produce una fuerza electromotriz (FEM).

Aunque la corriente generada es corriente alterna, puede ser rectificadas para obtener una corriente continua. El proceso inverso sería el realizado por un motor eléctrico, que transforma energía eléctrica en mecánica, es decir que un motor puede ser a la vez un generador. Los generadores necesitan también refrigeración durante su funcionamiento. Esta refrigeración se lleva a cabo mediante encapsulamiento del generador, utilizando un gran ventilador para la refrigeración por aire y para mejores resultados se usa agua. Los generadores refrigerados por agua pueden ser construidos de forma más compacta, lo que también les proporciona algunas ventajas en cuanto a rendimiento eléctrico, aunque precisan de un radiador en la góndola para eliminar el calor del sistema de refrigeración por líquido.

Otro factor a considerar es el arranque y parada del generador, si se conecta o desconecta un gran generador de turbina eólica a la red simplemente accionando un interruptor de corriente, muy probablemente se dañará el generador, el multiplicador y la corriente de red en la que está conectado.

En generadores eólicos se debe tomar en cuenta que estarán variando su frecuencia de operación a razón del giro y el tiempo en que estos cambios duran y se mantienen estables necesitando ciertos parámetros en el diseño. Las turbinas eléctricas pueden ser diseñadas tanto con generadores síncronos como asíncronos, y con varias formas de conexión directa o conexión indirecta a red del generador.

La conexión directa a red significa que el generador está conectado directamente a la red de corriente alterna (generalmente trifásica). La conexión indirecta a red significa que la corriente que viene de la turbina pasa a través de una serie de dispositivos eléctricos que ajustan la corriente para igualarla a la de la red. Los dos tipos de generadores que se usan para los sistemas eólicos son los generadores síncronos y los asíncronos, en virtud de sus prestaciones y regulaciones se toma en cuenta el uso de uno u otra forma de generar energía, en una visión más general se describe los dos sistemas.

## **5.2. Generadores síncronos**

Son un tipo de motor de CA en el que la rotación del eje está sincronizada con la frecuencia de la corriente de alimentación; el período de rotación es exactamente igual a un número entero de ciclos de CA. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectado y por el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad como velocidad de sincronismo. Este tipo de motor contiene electroimanes en el estator del motor que crean un campo magnético que rota en el tiempo a esta velocidad de sincronismo.

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es:  $n = \frac{60*f}{P}$  donde, f, es la frecuencia en hertz de la red

eléctrica;  $P$ , el número de polos del motor y  $n$ , la velocidad de sincronismo o revoluciones por minuto. Las turbinas eólicas que utilizan generadores síncronos suelen usar imanes en el rotor alimentados por corriente continua de la red eléctrica. Dado que la red suministra corriente alterna, hay que convertir la corriente alterna en corriente continua, antes de enviarla a las bobinas arrolladas a los electroimanes del rotor. Los electroimanes del rotor están conectados a la corriente mediante escobillas y anillos rozantes en el árbol (eje) del generador.

En la práctica, los generadores síncronos de imán permanente no son muy usados en turbinas eólicas. Una de las desventajas de usar este tipo de generador es su alto costo, así como el desgaste de los electroimanes en altas potencias y de no poder variar la velocidad del rotor, un aspecto que en el diseño de turbinas eólicas es apreciado para no tener rupturas en los sistemas de transmisión.

### **5.3. Generadores asíncronos o inducción**

Los diseños más comunes de turbinas eólicas utilizan un generador asíncrono trifásico, conocido como generador de inducción, los cuales producirán corriente alterna, la elección de este tipo de generador es su alta estabilidad y el costo de producción no es tan elevado. Sus propiedades mecánicas lo hacen especialmente útil en turbinas eólicas, como el deslizamiento del generador y su posibilidad de soportar cierta capacidad de sobrecarga.

La característica de deslizamiento sucede cuando el rotor gira mucho más rápido que la velocidad síncrona del estator (idealmente 1 % más), lo cual produce ese deslizamiento o asincrónica. Este hecho, de aumentar o disminuir ligeramente su velocidad si el par torsor varía, es una propiedad mecánica muy útil en los diseños de turbinas eólicas, razón por la cual habrá menor rotura y

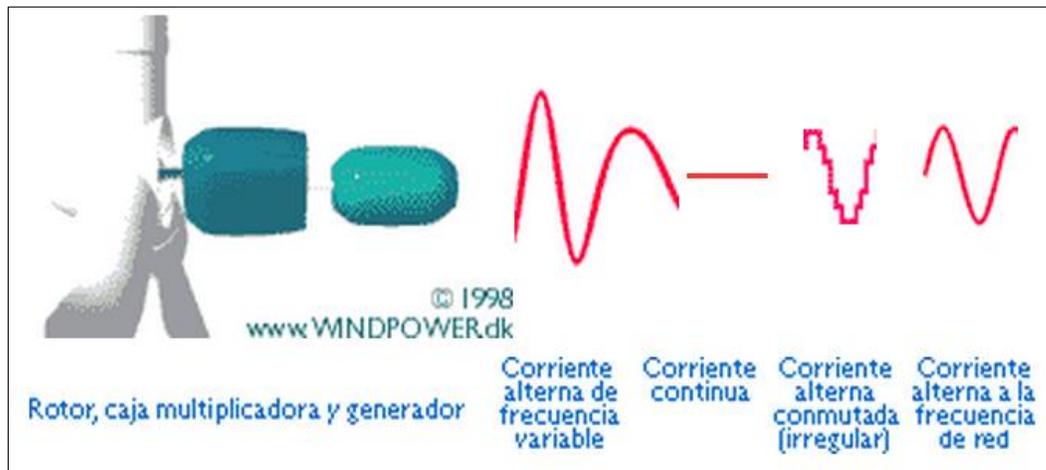
desgaste en la caja multiplicadora. Esta es una de las razones más importantes para la utilización de generadores asíncronos, en lugar de generadores síncronos, en aerogeneradores directamente conectados a la red eléctrica.

En un generador asíncrono precisa que el estator esté magnetizado por la red antes de funcionar. Sin embargo, se puede hacer funcionar un generador asíncrono de forma autónoma si se le provee de condensadores que le suministren la corriente de magnetización necesaria. También, es preciso que haya algo de remanencia en el hierro del rotor, es decir, algo de magnetismo restante, cuando se ponga en marcha la turbina.

#### **5.4. Conexión indirecta a red de aerogeneradores**

La mayoría de aerogeneradores funcionan a una velocidad casi constante con conexión directa a red. Sin embargo, con conexión indirecta a red, el generador de la turbina eólica funciona en su propia minired separada de corriente alterna. Esta red está controlada electrónicamente (utilizando un inversor), por lo que puede variarse la frecuencia de la corriente alterna en el estator del generador. De esta forma, se puede hacer funcionar la turbina a una velocidad de giro variable. Así pues, la turbina generará corriente alterna exactamente a la frecuencia variable aplicada al estator.

Figura 18. **Proceso de la conexión indirecta**



Fuente: *Danish Wind Industry Association*.

[http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/res/indirect.gif](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/res/indirect.gif).

[Consulta: septiembre de 2015].

El generador puede ser bien un generador síncrono o un generador asíncrono, y la turbina puede tener una caja multiplicadora o no tenerla, si el generador tiene muchos polos. Por medio de la conversión a una corriente continua, partiendo de las diferentes frecuencias en alterna, se puede tener un flujo constante (etapas de inversión a tiristores y filtrado por inductancias y condensadores), que posteriormente se deberá regenerar en una sola señal alterna limpia de frecuencia única y constante.

La ventaja de la conexión indirecta a red es que permite hacer funcionar la turbina eólica a velocidad variable. Permitiendo que el rotor gire más rápidamente durante ráfagas de viento y almacenar así parte del exceso de energía en forma de energía rotacional hasta que la ráfaga haya terminado. Obviamente, esto requiere de una estrategia de control muy inteligente, pues se debe tener la capacidad de distinguir entre ráfaga y altas velocidades de viento en general. De

esta forma, es posible reducir el par de torsión máximo reduciendo así el deterioro del multiplicador y del generador, con cargas de fatiga en la torre y en las palas del rotor.

La ventaja secundaria es que con la electrónica de potencia se puede controlar la potencia reactiva (es decir, el desfase de la corriente respecto a la tensión en la red de corriente alterna), y así mejorar la calidad de potencia de la red eléctrica. Esto puede ser particularmente útil en turbinas funcionando en una red eléctrica débil.

La desventaja básica de la conexión indirecta a red es el coste. Como se menciona anteriormente, la turbina necesitará un rectificador y dos inversores, uno para controlar la corriente del estator y el otro para generar la corriente de salida. Otras desventajas son la pérdida de energía en el proceso de conversión CA-CC-CA, y el hecho de que la electrónica de potencia puede introducir distorsión armónica de la corriente alterna en la red eléctrica y, por lo tanto, reducir la calidad de potencia.

La distorsión armónica se produce porque el proceso de no es perfecto y puede dejar algunos tonos agudos (múltiplos de la frecuencia de la red) en la corriente de salida. Existen varias configuraciones adicionales de conexión entre la turbina y el generador, no siendo este trabajo una fuente de información de los tipos más usados en generadoras eólicas, sino más bien dar en términos generales la forma más básica con la que los diseños parten para obtener la energía del viento.

## 5.5. Cajas multiplicadoras

La potencia de giro del rotor de la turbina eólica se trasfiere al generador a través del eje principal y si de alguna forma se necesitan más velocidad, es necesario incluir una caja multiplicadora y el eje de alta velocidad. La utilización de una caja multiplicadora radica en que si se usará un generador ordinario, directamente conectado a una red trifásica de CA (corriente alterna) a 60 Hz, con dos, cuatro o seis polos, se debería tener una turbina de velocidad extremadamente alta, de entre 1 000 y 3 000 revoluciones por minuto (RPM).

Con un rotor de 43 metros de diámetro, esto implicaría una velocidad en el extremo del rotor de bastante más de dos veces la velocidad del sonido, algo que no es factible. Se podría construir un generador de CA lento con muchos polos, pero al conectar el generador directamente a la red, acabaría con un generador de 200 polos para conseguir una velocidad de rotación razonable de 30 RPM

También, se debe tomar en cuenta que la masa del rotor del generador tiene que ser aproximadamente proporcional a la cantidad de par torsor (momento, o fuerza de giro) que tiene que manejar. Así que, un generador accionado directamente será muy pesado. Tras análisis, se ha utilizado una manera de trabajar estos parámetros incluyendo una caja multiplicadora.

Un multiplicador hace la conversión entre la potencia de alto par torsor, que obtiene del rotor de la turbina eólica girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que utiliza en el generador. La caja multiplicadora de la turbina eólica no cambia las velocidades. Normalmente, suele tener una única relación de multiplicación entre la rotación del rotor y el generador. Para una máquina de 600 o 750 kW, la relación de multiplicación suele ser aproximadamente de 1:50.

## **5.6. Controlador electrónico**

Otra parte que constituye un aerogenerador, es el controlador de la turbina eólica. Este consta de varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de la turbina eólica y recogen estadísticas de su funcionamiento. Como su propio nombre indica, el controlador también controla un gran número de interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina.

Cuando el tamaño de una turbina eólica crece hasta máquinas de megavatios, se hace incluso más importante que su tasa de disponibilidad sea alta, es decir, que funcione de forma segura todo el tiempo. Los ordenadores y sensores suelen estar por duplicado (son redundantes) en todas las áreas de precisión, de seguridad o de servicio, de las máquinas grandes más nuevas. El controlador compara continuamente las lecturas de las medidas en toda la turbina eólica, para asegurar que tanto los sensores como los propios ordenadores funcionan correctamente.

Es posible monitorizar o fijar alrededor de entre 100 y 500 valores de parámetros en una turbina eólica moderna. Por ejemplo, el controlador puede contrastar la velocidad de rotación del rotor, el generador, su voltaje y corriente. Además, los rayos y su carga pueden ser registrados. También pueden realizarse medidas de la temperatura del aire exterior, la temperatura en los armarios electrónicos, la temperatura del aceite en el multiplicador, la temperatura de los devanados del generador, la temperatura de los cojinetes del multiplicador, la presión hidráulica, el ángulo de paso de cada pala del rotor, el ángulo de orientación (contando el número de dientes en la corona de orientación), el número de vueltas en los cables de alimentación, la dirección del viento, la velocidad del viento del anemómetro, el tamaño y la frecuencia de las vibraciones

en la góndola y en las palas del rotor, el espesor de las zapatas del freno, si la puerta de la torre está abierta o cerrada.

## **5.7. Calidad de potencia**

Pese a que se tenga un sistema eólico que genere energía, para poder ser distribuida debe ajustarse a parámetros las compañías locales, que algunas veces exigen que la conexión a red de los aerogeneradores se realice "suavemente". Este parámetro es que la corriente alterna y la tensión se mueva de forma sincronizada la una respecto a la otra. En la parte de control electrónico se encuentra el referente a la potencia reactiva. Típicamente, la tensión y la corriente son medidas 128 veces por ciclo de corriente alterna (es decir, 50 x 128 veces por segundo o 60 x 128 veces por segundo, dependiendo de la frecuencia de la red eléctrica). Partiendo de esto, un procesador DSP calcula la estabilidad de la frecuencia de la red, así como la potencia activa y reactiva de la turbina (la componente reactiva de la potencia es básicamente una cuestión de si la tensión y la corriente están o no en fase).

Para asegurar que la calidad de potencia sea la adecuada, el controlador debe conectar y desconectar un gran número de condensadores eléctricos, que ajustarán la potencia reactiva (es decir, el ángulo de fase entre la tensión y la corriente). En una turbina eólica, alrededor de los cables para transporte de energía y de los generadores hay campos electromagnéticos muy potentes. Esto implica que la electrónica del sistema de control tiene que ser insensible a estos campos electromagnéticos y, a la inversa, la electrónica no debería emitir radiación electromagnética que pueda inhibir el funcionamiento de otros equipos electrónicos.

## 6. BATERÍAS EN SISTEMAS EÓLICOS

La disponibilidad de la energía por parte de un sistema eólico para distribución radica en la cantidad de viento que puede generar durante un determinado tiempo continuo, esto hace que el factor posición del mecanismo en un entorno con flujo continuo sea muy importante, dándole una dependencia muy alta a ese factor y limitante para mantener una distribución constante, es por eso que se hace necesario la implementación de formas de acumulación de energía.

La utilización de baterías cumple dos funciones, la primera es la acumulación en momentos de flujo continuo y la segunda es mantener un flujo constante todo el tiempo para su distribución. Balancear la energía entre la producción y el uso es imprescindible. Para aplicaciones eólicas se usan comúnmente baterías a base de plomo y en menor medida las de ion de litio (Li-ion) que aún se encuentra en desarrollo para crear mejores y más grandes.

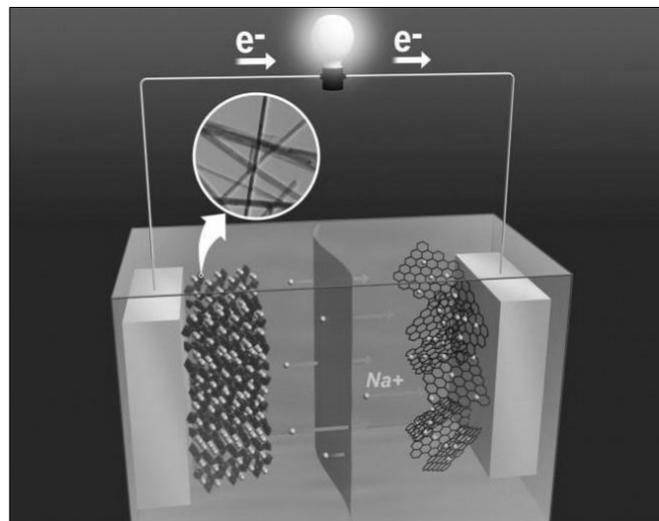
La desventaja de las baterías de plomo convencionales para la utilización en plantas generadoras eólicas es que su vida media es poca y con un suministro no continuo, su vida se reduce mucho más rápido, es necesario entonces tomar en cuenta características especiales para esta función en pro de tener una acumulación a largo plazo y más ciclos de vida.

Una batería no es más que el resultado de un proceso químico llamado reducción oxidación, redox. En este proceso, uno de los componentes se oxida, desprendiendo electrones, mientras que otro componente se reduce, ganando electrones.

Este proceso es reversible, es decir que en el proceso de recombinaiones los componentes no resulten consumidos ni se pierde, simplemente cambian su estado de oxidación, el cual puede regresar a su estado normal en circunstancias adecuadas.

La restitución adecuada de este mecanismo químico es con el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente externa durante la carga. Comúnmente, las relaciones entre elementos químicos y la electricidad se denominan electrólisis o polarización. Las baterías son dispositivos en los que la polarización se lleva a sus límites, en los cuales dos electrodos de materiales distintos son sumergidos en un electrolito o sustancia permeable. La reacción química de recombinación por causa de una corriente externa genera una acumulación de energía dentro de ella, la cual puede ser distribuida posteriormente.

Figura 19. **Funcionamiento de una batería**



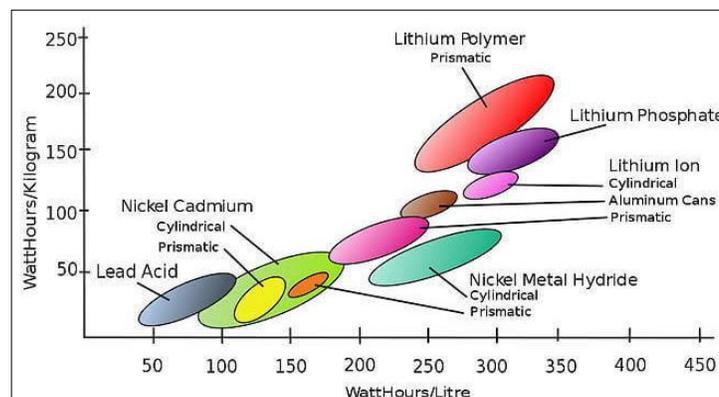
Fuente: *Noticias de la ciencia*. [http://noticiasdelaciencia.com/upload/img/periodico/img\\_3773.jpg](http://noticiasdelaciencia.com/upload/img/periodico/img_3773.jpg).

[Consulta: octubre de 2015].

## 6.1. Tipos de baterías

Las tecnologías de almacenaje se han estado estudiando por algún tiempo para mejorar su desempeño y calidad, por el momento, existen variantes de su constitución primordial en los cuales el plomo, el litio y variantes de otros elementos son los que hacen el proceso de recombinación de la energía. En aplicaciones eólicas son usadas en gran medida baterías a base de plomo, por su economía y calidad en el almacenaje.

Figura 20. **Tecnologías en creación de baterías**



Fuente: *Delta Volt*. <http://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>. [Consulta: octubre de 2015].

La figura 20 relaciona las diferentes tecnologías de baterías comparando con la cantidad de potencia por hora en relación a su peso y volumen. Aunque se observa en la figura que los materiales como el litio presentan mejores prestaciones en absorción de la energía y trasmisión de potencia, su costo de producción es una limitante para algunas propuestas de proyecto, pero su viabilidad es superior a las demás. Las baterías de ion de litio tienen prestaciones superiores, actualmente se investiga fuertemente en mejorarlas y en el desarrollo

de alternativas como las de litio-aire o de litio de estado sólido, las cuales principalmente solucionan los requerimientos de energía en vehículos eléctricos.

Par usos de energías renovables son frecuentes las baterías de litio-ferrofosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ) que no contienen elementos tóxicos y tienen una eficiencia del 98 %. Se puede descargar hasta un 20 % de su capacidad y pueden tener una vida hasta más de 10 000 ciclos. Son más livianas y poseen menos volumen en relación a baterías de plomo, la desventaja, su alto costo.

Para aplicaciones eólicas, se ha optado en remplazar las baterías de plomo convencionales a nuevos modelos de eficiencia, siempre con el mismo material base (el plomo). Existe una razón por la cual se sigue utilizando plomo en lugar de litio, se vio que tiene mejores indicios de desempeño y es la estabilidad ante la temperatura y su costo de producción más bajo. En este sentido, se usan diferentes tipos de baterías de plomo como:

- Baterías líquidas con versiones abiertas con tapas que dejan sustituir el agua o en versión libre de mantenimiento que son cerradas, pero con válvulas para que posibles gases puedan escapar durante cargas excesivas. El precio y su bajo índice de sobrecarga son los factores por los cuales se utilizan pero teniendo el problema de que durante la carga escapa hidrógeno (material explosivo) y existe el peligro de perder el ácido, un control del nivel del agua es necesario, y su corta vida típica se aproxima a 400 ciclos de carga y descarga. Una ventilación es muy importante para estos tipos de batería y temperaturas bajo cero pueden destruirlas rápidamente.

- Baterías tipo VRLA (abreviación del inglés: *valve regulated lead acid battery* o válvula reguladora de ácido de batería de plomo). No son completamente selladas, pero contienen una tecnología que recombina el oxígeno e hidrógeno que sale de las placas durante la carga y así eliminan la pérdida de agua si son sobrecargadas. Hay dos tipos principales: Las que soportan temperaturas bajas, como las de consistencia de gel; su vida es mucho mayor que la vida de las baterías líquidas y son las de menor sensibilidad en casos de descargas profundas, su límite es poseer una resistencia interna alta que reduce el flujo máximo de la corriente, delicadas para cargar y un precio mayor. Su aplicación al poseer larga vida es en la industria y la telecomunicación.

El segundo tipo de tecnología de acumulación es la del tipo AGM (*absorption glass mat* o absorción por fibra de vidrio). Estas baterías, desarrolladas inicialmente para la aviación, el ácido está fijado en fibras de vidrio, por su poca cantidad de ácido se les ha llamado del tipo secas. Sus ventajas son una alta resistencia en climas fríos, su autodescarga sobre el tiempo es mínimo y tiene la eficiencia más alta de todas las baterías de plomo (hasta 95 %). Tienen una baja resistencia interna que permite corrientes altas. Lo decepcionante de estas sería, a parte del precio, su vulnerabilidad más alta a descargas profundas. La vida puede variar considerablemente según calidad.

## **6.2. Baterías de plomo**

Haciendo referencia al acumulador más frecuente, el cual tiene como su constitución principal para almacenar energía, el plomo, es necesario abordar otros temas que pueden ser de importancia. En sistemas eólicos se utilizan baterías AGM en lugar de las comunes de plomo, la diferencia entre las comunes

y las optimizadas es la disponibilidad en el tiempo. Las comunes son requeridas para dar mucha energía durante un corto tiempo, principalmente para arrancar un motor. La corriente necesaria de estas se logra con capas de plomo delgadas.

En sistemas eólicos, las baterías tienen que dar la energía sobre un tiempo relativamente largo y frecuentemente se descargan a niveles más bajos. Estas baterías de tipo ciclo profundo tienen capas de plomo gruesas que además brindan la ventaja de significativamente prolongar su vida. Estas baterías son relativamente grandes y pesadas por el plomo. Son compuestas de celdas de 2 voltios nominales que se juntan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios.

Hay que diferenciar entre baterías para el uso cíclico (cargar y descargar diariamente) y las baterías para el uso en sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS). Estas solamente entran en función cuando hay un fallo de electricidad. Baterías para el uso en UPS frecuentemente no aguantan el uso cíclico en sistemas de energías renovables.

### **6.3. Eficiencia en baterías**

Otro aspecto a considerar es la vida de las baterías que no solo depende de la calidad de la fabricación y del tipo uso. Los parámetros se refieren a los ciclos de carga/descarga a cierta profundidad de descarga con una temperatura determinada (normalmente a 20 o 25 °C). La mayoría de baterías de uso común viven menos de 200 ciclos si se descarga regularmente a 50 % de su capacidad. Baterías líquidas de ciclo profundo son capaces de 400 ciclos, pero las de tipo AGM y de gel superan fácilmente 800 ciclos.

Hay baterías para el uso industrial (por ejemplo los tubulares OPzS y OPzV) que pueden manejar bajo buenas condiciones más de 10 000 ciclos. Los años de vida depende entonces de su uso: si se conoce la profundidad de descarga y la cantidad de ciclos, se puede estimar su vida en años. Todas las baterías a base de plomo necesitan una buena alimentación (carga). Baterías de calidad, siempre cargadas, sin sobrecargarlas, pueden vivir 10 años o más. Si se descargan frecuentemente en forma profunda, mueren más rápidamente y mantenerlos sin carga sobre un tiempo prolongado es su fin.

En la práctica, es importante instalar suficiente capacidad para no descargar las baterías a menos del 50 % de su valor nominal. Entonces, dependiendo de la necesidad de electricidad, es importante calcular un balance óptimo para la capacidad instalada. La temperatura tiene gran influencia sobre la batería. Son sensibles a condiciones de frío extremo o calor: temperaturas de 20 y 25 °C es lo óptimo para una batería en uso. A más alta temperatura, la vida es más reducida. Una temperatura 10 grados arriba de 25 °C puede cortar la vida por la mitad. Por otro lado, la capacidad de almacenar energía disminuye en temperaturas bajas, pero no reduce la vida. Entonces, para una batería sin uso, es preferible mantenerla a una temperatura más baja, pero sin congelarla.

La temperatura también influye como cargar una batería. Con el aumento de la temperatura hay que disminuir el voltaje para evitar una gasificación, pero todavía asegurando una carga por completo. Por eso, todos los controladores buenos tienen una compensación de temperatura incorporada. Una gasificación en baterías selladas no es recuperable, el líquido se pierde por las válvulas sin tener la posibilidad de rellenarlas.

La capacidad de las baterías varía según tipo, su calidad de construcción, la temperatura, vejez, y el estado de descarga. Una batería descargada con una corriente alta en poco tiempo tiene menos capacidad que la misma descargada con una corriente pequeña sobre un tiempo prolongado. Normalmente, los fabricantes de baterías indican la capacidad de la batería descargada sobre 24 horas (C24), pero algunos miden la capacidad hasta 100 horas (C100) y así indican un valor comparativo más alto de la competencia.

Más importante es la diferencia entre la cantidad de energía que entra en la batería (cargando) y la que es disponible en la batería (descargando). Esta eficiencia de Coulomb (conocido como eficiencia de Faraday) es en baterías normales de plomo entre 70 y 85 %. Significa por ejemplo que de 100 Ah usados para cargar la batería, solamente entre 70 y 85 Ah son disponibles, el resto de la energía se pierde principalmente en calor y el proceso químico. Las baterías de buena calidad, sobre todo los de tipo AGM, pueden tener una eficiencia hasta 95 por ciento. Esta pérdida frecuentemente se olvida en la planificación de sistemas con baterías.

#### **6.4. Nuevas tecnologías**

En lo referente a baterías, existen muchas empresas interesadas en encontrar la batería perfecta, la cual presente las características necesarias de alto desempeño en el almacenaje de energía y ciclos grandes de descargas, así como una estructura más liviana y pequeña. Los estudios hacen hincapié en la tecnología a base de iones de litio.

La batería de iones de litio, también denominada batería Li-ion, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, junto con el poco efecto memoria que sufren o su capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido diseñar acumuladores livianos, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados a las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo.

Pese a que las baterías de Li-ion han solventado el problema de tamaño y capacidad, presentan un problema térmico que las hace incapaces de prestar un desempeño a escalas donde se necesite tenerlas en ambientes muy hostiles. Para ambientes como los generadores eólicos o solares, este tipo de dispositivos son muy caros comparados con los de plomo, gel o líquidas que no requieren un cuidado tan especial como el térmico en las baterías de Li-ion.

En el 2015 se presenta la batería de iones de litio Tesla Powerwall por Tesla Motors, con la que pretenden revolucionar el mercado doméstico de las baterías mediante su utilización junto a sistemas de energías renovables. Esta se basa en modelos de baterías de litio, pero a escalas más pequeñas, lo que resuelve el tema térmico, al tener menos carga y densidad, su paso térmico es menor y más controlable.

Al tener un conjunto de estas baterías pequeñas, del tamaño de un pulgar, se puede presentar variantes de baterías que dan una carga considerable, con ciclos muy grandes y prestaciones inmejorables que superan la barrera térmica de sus antecesores modelos de baterías de litio. El costo de estas baterías es aún inalcanzable para pequeñas industrias y pese a la modalidad de alquiler, aún está en la espera de un nicho de mercado que la pueda acoger, por el momento solo se usan en tecnologías automotrices.

### 6.5. Comparativos entre tecnologías de almacenaje

Como se ha estado revisando, cada tecnología de almacenaje puede tener su ventaja en lo concerniente a sus prestaciones y funciones, pero es necesario tener una base comparativa, para que el proyecto pueda tener la más adecuada, tanto en costo y beneficio. Por ello, se analizarán una serie de características especiales de las baterías que son utilizadas el ramo de la generación de fuentes renovables. Dichos acumuladores a presentar cumplen con los requerimientos necesarios para la planeación en el diseño, se presentan algunas variantes de modelos que en su eje central comparten prestaciones de voltaje y corriente que a criterio del diseño serán las opciones más rentables y posibles a implementar en el proyecto. Sus requerimientos son los siguientes:

Tabla IV. **Requisitos energéticos y estructurales**

<b>Voltaje [V]</b>	<b>Tipo</b>	<b>Corriente [A]</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>
10-12	Recargable	8-18	6-7	0,005

Fuente: elaboración propia.

Adicional a estos requerimientos específicos, se basó el análisis en sus materiales de construcción y tecnología, esto dará una visión más clara de cuáles son las más idóneas en el momento de plantear una batería adecuada en el diseño. Se presentaron 3 tipos de tecnología de acumulación, las cuales fueron:

- Plomo con único componente activo ácido en placas delgadas.
- Plomo ciclo profundo (placas gruesas) en compuesto activo ácido más compuesto especial.
- Litio más compuesto especial.

La base de análisis es una batería de plomo ácido PowerSonic, de placas delgadas de 12 voltios, que brinda estas características:

Tabla V. Datos técnicos de la batería base de plomo I

Voltaje [V]	Corriente [AH]	Peso [kg]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Ciclos [#]	Temperatura de trabajo [K]	Potencia por ciclo [Wh]	Eficiencia [%]	Vida media [Años]
10,20	12,5	4,20	0,0014	500	233-323	127,51	50	5-8

Precio [Q]	Potencia total ciclos [W]	Recuperación [Wh/Q]	Ahorro tarifa CNEE [Q]
300	63 755	0,0047	80,27

Donde:

**Voltaje:** la magnitud de energía suministrada por la batería en voltios nominal con corriente de 2,5 A.

**Corriente:** la magnitud de corriente entregada por la batería en amperios hora.

**Peso:** la magnitud en kilogramos de la batería.

**Volumen:** la magnitud en metros cúbicos.

Continuación de la tabla V.

**Ciclos:** el número de ciclos de uso a un 50 % de su capacidad de descargada de la batería.

**Temperatura de trabajo:** rango en kelvines en los cuales la batería funciona normalmente a 298 K.

**Potencia por ciclo:** es la potencia en watts hora que puede suministrar en un ciclo de descarga.

**Eficiencia:** porcentaje en el cual la batería puede proporcionar toda su cantidad energética en carga y de descarga a temperatura .

**Vida media:** la cantidad de años en promedio en el cual la batería funciona normalmente.

**Precio:** Costo de compra de este tipo de baterías en el mercado.

**Potencia total ciclos:** Basada en la cantidad máxima de ciclos por la potencia entregada en watts hora ( ciclos x potencia entregada de la batería).

**Recuperación:** basada en el costo de recuperar la inversión de compra de la batería en cantidad de watts hora que puede producir en toda su vida de trabajo (precio/potencia total)

**Ahorro tarifa CNEE:** medida en quetzales del ahorro de no usar el suministro energético local, según las tarifas de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en tarifa plena de 1,2591 Q/kWh  
([Potencia total /1 000]\*1,2591)

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Batería de plomo común**



Fuente: *Power sonic*. [http://www.power-sonic.com/images/powersonic/sla\\_batteries/ps\\_psg\\_series/12volt/PS12140F2.pdf](http://www.power-sonic.com/images/powersonic/sla_batteries/ps_psg_series/12volt/PS12140F2.pdf).  
[Consulta: junio de 2015].

Se parte de una batería de plomo normal como base para comparar las ventajas de la utilización de nuevas tecnologías en plantas generadoras eólica y solar. La primera propuesta a comparar es la batería de plomo AGM PowerSonic de ciclo profundo de 12 voltios con las siguientes características:

Tabla VI. **Datos técnicos de la batería base de plomo II**

Voltaje [V]	Corriente [AH]	Peso [kg]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Ciclos [#]	Temperatura de trabajo [K]	Potencia por ciclo [Wh]	Eficiencia [%]	Vida media [Años]
10,5	12,72	4,30	0,0015	800	233-323	133,56	90	5-8

Precio [Q]	Potencia total ciclos [W]	Recuperación [Wh/Q]	Ahorro tarifa CNEE [Q]
700	106 848	0,0065	134,53

Donde:

**Voltaje:** la magnitud de energía suministrada por la batería en voltios nominal con corriente de 2,5 A.

Continuación de la tabla VI

**Corriente:** la magnitud de corriente entregada por la batería en amperios hora.

**Peso:** la magnitud en kilogramos de la batería.

**Volumen:** la magnitud en metros cúbicos.

**Ciclos:** el número de ciclos de uso a un 50 % de su capacidad de descargada de la batería.

**Temperatura de trabajo:** rango en kelvines en los cuales la batería funciona normalmente a 298 K.

**Potencia por ciclo:** es la potencia en watts hora que puede suministrar en un ciclo de descarga.

**Eficiencia:** porcentaje en el cual la batería puede proporcionar toda su cantidad energética en carga y de descarga a temperatura .

**Vida media:** la cantidad de años en promedio en el cual la batería funciona normalmente.

**Precio:** costo de compra de este tipo de baterías en el mercado.

**Potencia total ciclos:** basada en la cantidad máxima de ciclos por la potencia entregada en watts hora ( ciclos x potencia entregada de la batería).

**Recuperación:** basada en el costo de recuperar la inversión de compra de la batería en cantidad de watts hora que puede producir en toda su vida de trabajo (precio/potencia total).

**Ahorro tarifa CNEE:** medida en quetzales del ahorro de no usar el suministro energético local, según las tarifas de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en tarifa plena de 1,2591 Q/kWh ( $[\text{Potencia total} / 1\ 000] * 1,2591$ ).

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Batería de ciclo profundo**



Fuente: *Power sonic*. [http://www.power-sonic.com/images/powersonic/sla\\_batteries/PDC-1214012\\_Oct\\_2.pdf](http://www.power-sonic.com/images/powersonic/sla_batteries/PDC-1214012_Oct_2.pdf). [Consulta: octubre de 2015].

La segunda propuesta es la batería de litio-fosfato Tender con las siguientes características

Tabla VII. **Datos técnicos de la batería base de plomo III**

Voltaje [V]	Corriente [AH]	Peso [Kg]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Ciclos [#]	Temperatura de trabajo [K]	Potencia por ciclo [Wh]	Eficiencia [%]	Vida media [Años]
10,0	12,6	1,7	0,0018	1 400	288-303	126	90	2-3

Precio [Q]	Potencia total ciclos [W]	Recuperación [Wh/Q]	Ahorro tarifa CNEE [Q]
1 490	176 400	0,0085	222,10

Donde:

**Voltaje:** la magnitud de energía suministrada por la batería en voltios nominal con corriente de 2,5 A.

Continuación de la tabla VII

**Corriente:** la magnitud de corriente entregada por la batería en amperios hora.

**Peso:** la magnitud en kilogramos de la batería.

**Volumen:** la magnitud en metros cúbicos.

**Ciclos:** el número de ciclos de uso a un 50 % de su capacidad de descargada de la batería.

**Temperatura de trabajo:** rango en kelvines en los cuales la batería funciona normalmente a 298 K.

**Potencia por ciclo:** es la potencia en watts hora que puede suministrar en un ciclo de descarga.

**Eficiencia:** porcentaje en el cual la batería puede proporcionar toda su cantidad energética en carga y de descarga a temperatura .

**Vida media:** la cantidad de años en promedio en el cual la batería funciona normalmente.

**Precio:** costo de compra de este tipo de baterías en el mercado.

**Potencia total ciclos:** basada en la cantidad máxima de ciclos por la potencia entregada en watts hora ( ciclos x potencia entregada de la batería).

**Recuperación:** basada en el costo de recuperar la inversión de compra de la batería en cantidad de watts hora que puede producir en toda su vida de trabajo (precio/potencia total).

**Ahorro tarifa CNEE:** medida en quetzales del ahorro de no usar el suministro energético local, según las tarifas de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en tarifa plena de 1,2591 Q/kWh ( $[\text{Potencia total} / 1\ 000] * 1,2591$ ).

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Batería de litio fosfato**



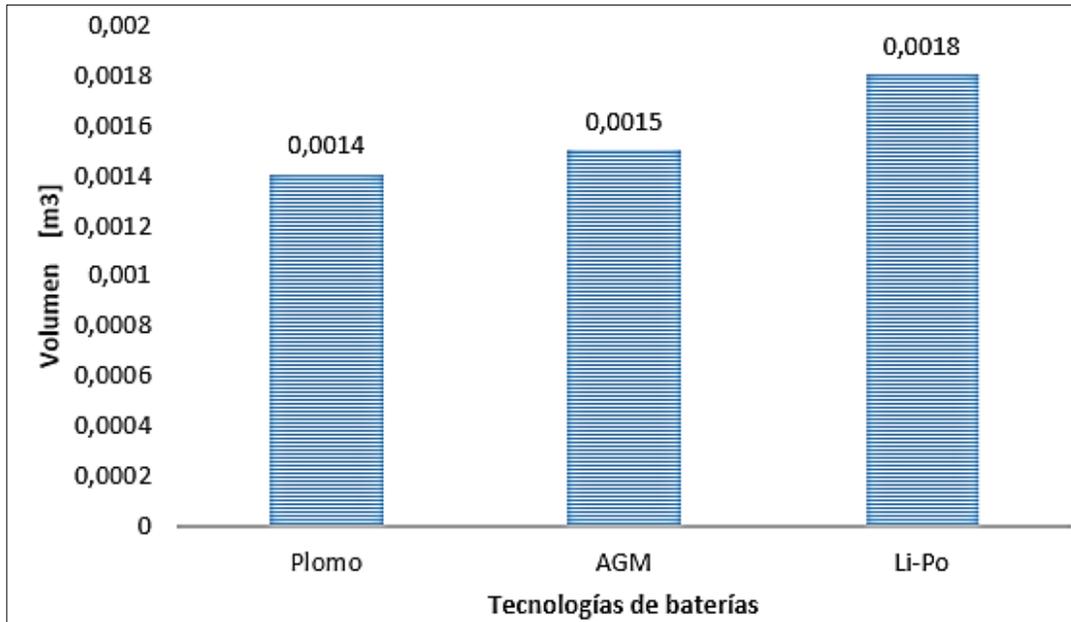
Fuente: Amazon. [http://www.amazon.com/dp/B00F9LPJ8S/ref=cm\\_wl\\_huc\\_continue](http://www.amazon.com/dp/B00F9LPJ8S/ref=cm_wl_huc_continue).  
[Consulta: octubre de 2015].

#### **6.5.1. Análisis del tamaño de las baterías**

Se analiza su robustez en su fabricación, dimensiones volumétricas específicas, según las tablas IV,V y VI de los datos técnicos anteriores los resultados son:

Entre tecnologías, las dimensiones volumétricas pueden variar según el fabricante y pueden ser de interés al momento de plantear una estructura específica, por el momento las tres tecnologías presentan unas proporciones semejantes que no interfieren con un modelo óptimo de diseño.

Figura 24. **Tamaño de baterías**

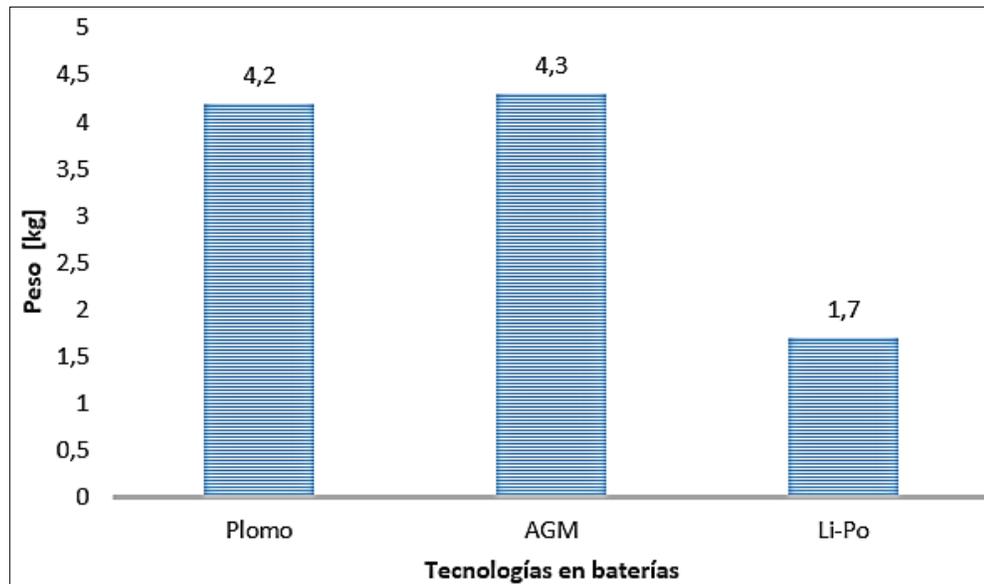


Fuente: elaboración propia.

### 6.5.2. **Análisis del peso de baterías**

Característica debida al proceso de fabricación, donde se ha usado elementos que aporten mayor o menor densidad molecular a la estructura de la batería, dándole más peso a la misma. Según las tablas IV,V y VI de los datos técnicos anteriores, los resultados son:

Figura 25. **Pesos de baterías**



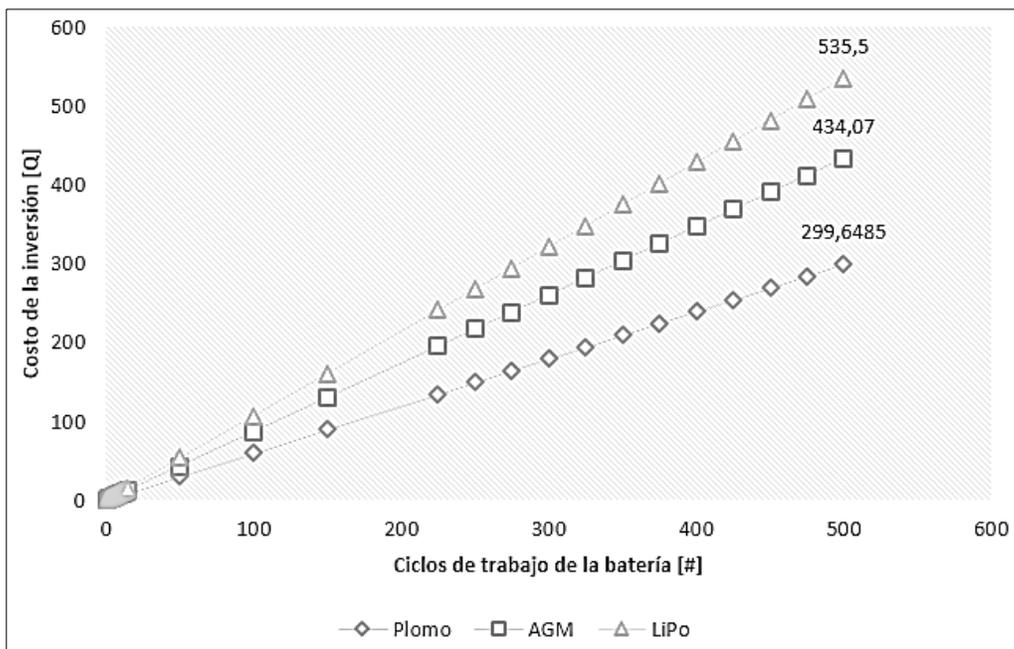
Fuente: elaboración propia.

Para aplicaciones donde la necesidad de bajar el peso en baterías es importante, la tecnología de litio fosfato es adecuada para ese fin, presentando menor magnitud en las comparaciones en peso. Se puede afirmar que baterías como la de litio y fosfato pueden ser acopladas directamente a la estructura a alimentar como en los celulares. Al no ser este el caso, se puede optar por las del tipo AGM, pues el objetivo no se basa en tener un sistema con acople de acumulación interna.

### 6.5.3. Análisis de costo de recuperación de baterías

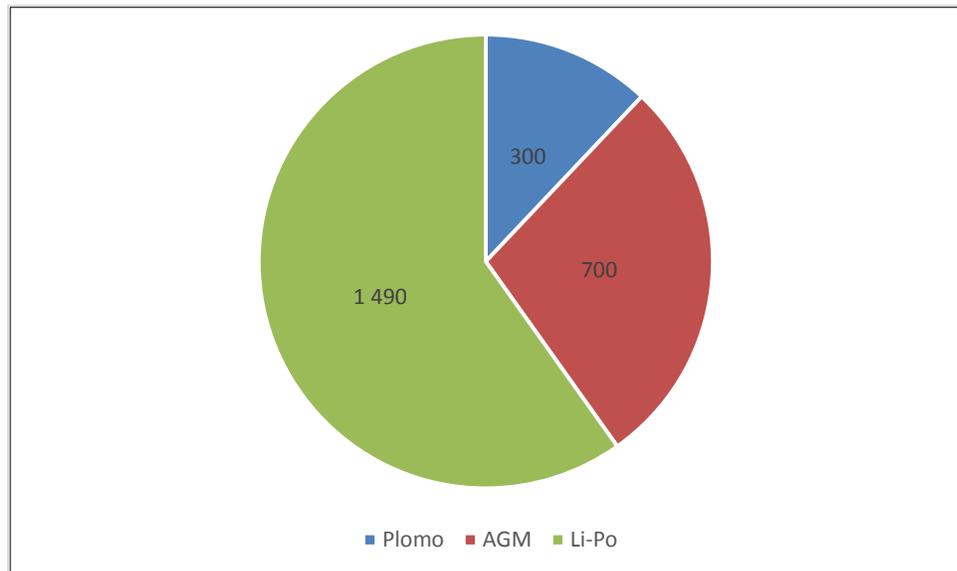
Esta radica en la inversión en el diseño, fabricación de las baterías y su puesta a la venta. Tomando los costos de venta en el mercado indicados en los detalles técnicos del capítulo y según las tablas IV,V y VI de los datos técnicos anteriores, los resultados son:

Figura 26. Recuperación de la inversión



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Costo de adquirir tecnología de almacenaje**



Fuente: elaboración propia.

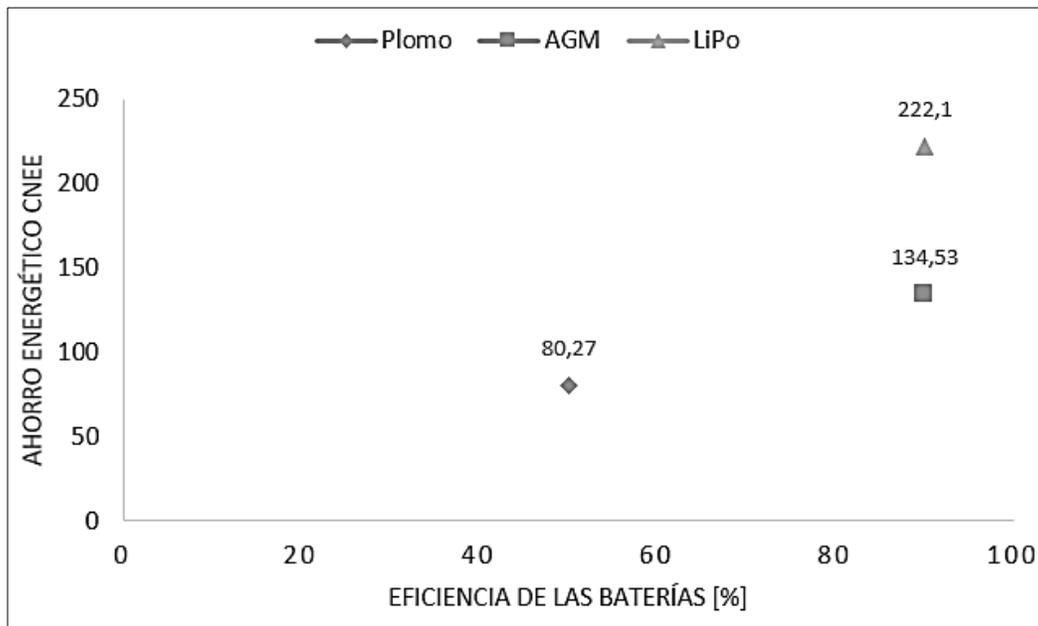
Económicamente, la ventaja de bajar costos es primordial, es decir, tener las mejores características posibles sin tener que pagar más. Al respecto, las baterías AGM están en el rango intermedio de recuperación de la inversión por ciclo de trabajo, pese a que el índice de recuperación de la batería de litio fosfato es más rápido, el precio de adquirir esta tecnología es de mayor magnitud económica.

#### **6.5.4. Análisis por eficiencia**

Esta es la cantidad de energía que puede almacenar sin perderla en la transferencia térmica de carga y el porcentaje de energía transferida en la descargada por ciclo de trabajo. A este valor se le compara con el ahorro que supondría estar desconectado de la red eléctrica local (suministrada por la CNEE). Los valores son tomados de las características de cada tecnología y el

costo que supondría en ahorro, según las tablas IV,V y VI de los datos técnicos anteriores, los resultados son:

Figura 28. Eficiencia en baterías ante ahorro



Fuente: elaboración propia.

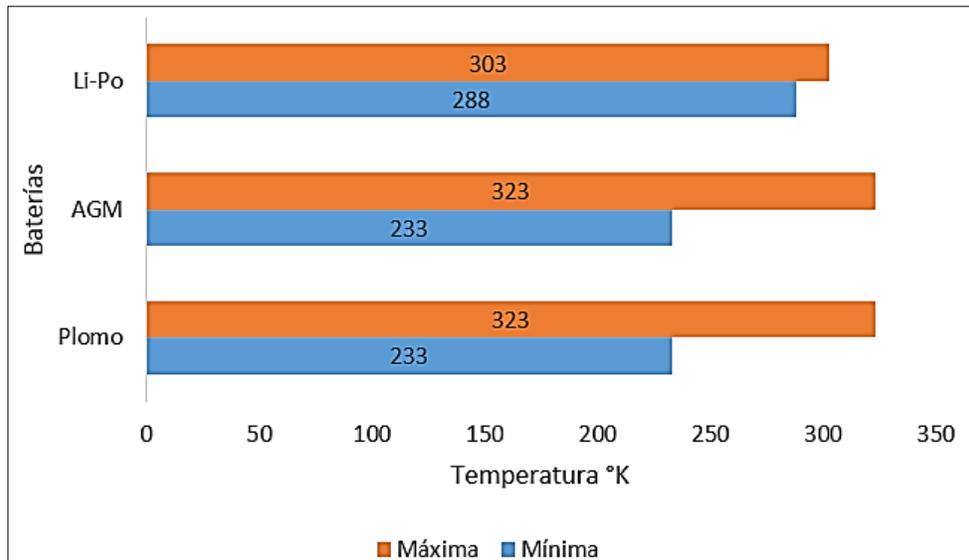
Las baterías de plomo con ácido como único material activo no poseen eficiencia mayor del 50 %, esto se debe a que parte de la carga se pierde térmicamente tanto en carga como descarga y que estas no pueden dar más de este valor sin el riesgo de acortar su vida útil. Mientras las AGM y litio fosfato tiene valores altos al punto de poder dar el 90 % a 98 % de su carga respectivamente. Con valores de eficiencia casi semejantes, es considerable elegir la que presente mayor ahorro energético, es decir, que tecnología puede dar valores económicos más rentables en virtud de no usar el suministro local de energía. En este sentido, según las características técnicas de las tecnologías de

almacenaje, litio fosfato presenta mayores índices de ahorro, debiéndose al factor de ciclos de trabajo mayores de carga y descarga.

### 6.5.5. Análisis de temperatura

Los dispositivos recolectores de energía (baterías) presentan una característica no muy deseable, la temperatura, la cual afecta su desempeño notablemente, al punto de ser un punto crítico para ciertas aplicaciones donde el ambiente puede influir en su mal funcionamiento. El calor que estos dispositivos generan puede llegar a un punto peligroso en el que pueden existir fugas de líquidos tóxicos o la explosión espontánea. Según los análisis del capítulo anterior sobre las distintas tecnologías y según las tablas IV,V y VI de los datos técnicos anteriores, los resultados son:

Figura 29. Temperatura en baterías



Fuente: elaboración propia.

Las baterías a base de plomo presentan características de trabajo bastante interesante, pues pueden trabajar a bajas temperaturas como en altas sin arriesgar sus prestaciones. Al contrario de las creadas con litio fosfato, cuyo rango se limita a temperaturas de operación muy limitada y saliendo de este rango pueden tener fallas o sobre calentamiento.

#### **6.5.6. Conclusiones generales de las baterías**

Las prestaciones de las baterías basadas en litio tienen muchas ventajas físicas, peso y robustez bajas, pero los precios de venta y características térmicas no la hacen factible para ser el sustituto ideal baterías de plomo con tecnología AGM, que pese a tener mayor peso y volumen, tienden a ser más accesibles económicamente y seguras térmicamente.

Queda totalmente descartada la utilización de baterías con base única de ácido, pues es la que presenta menos características de eficiencia, en este sentido, las AGM y litio fosfato tienen niveles altos, pero similares, siendo entonces la única limitante el tema de costo y seguridad térmica.

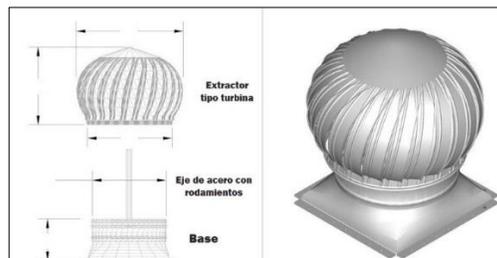
En generadoras de fuentes renovables, se necesita que la batería sea económica y segura pues el ambiente en donde se encuentra la estación es agreste y autónomo, esto último se refiere a que está en lugares donde el acceso de personal técnico para mantenimiento es limitado y la estación tiene que trabajar con normas de seguridad eficientes, donde la temperatura no sea un factor de peligro. Es por ello que las baterías AGM son las más ideales.

## 7. DISEÑO DE UN AEROGENERADOR A BAJA ESCALA EN UN EXTRACTOR EÓLICO ATMOSFÉRICO DE TURBINA

Se presenta el diseño de un sistema de acople tipo aerogenerador a baja escala para extractores atmosféricos de turbina, una estructura híbrida que alberga un generador y una transmisión circular de contacto en conexión a la turbina eólica de extracción de aire. Su funcionamiento, por diferencia de temperatura y viento, crea un movimiento circular continuo en su turbina, que en razón de velocidad hace intercambiar entre dos ambientes magnitudes térmicas diferentes, de tal manera que la temperatura del ambiente más cálido sea sustituido por uno más fresco, con ayuda de ventilación en las partes más bajas del lugar renovando el aire con menor temperatura.

La acción mecánica realizada por el extractor se debe a la estructura aerodinámica hecha por pliegues que juntos forman una esfera aplanada en sus polos levemente.

Figura 30. **Extractor de turbina eólica**

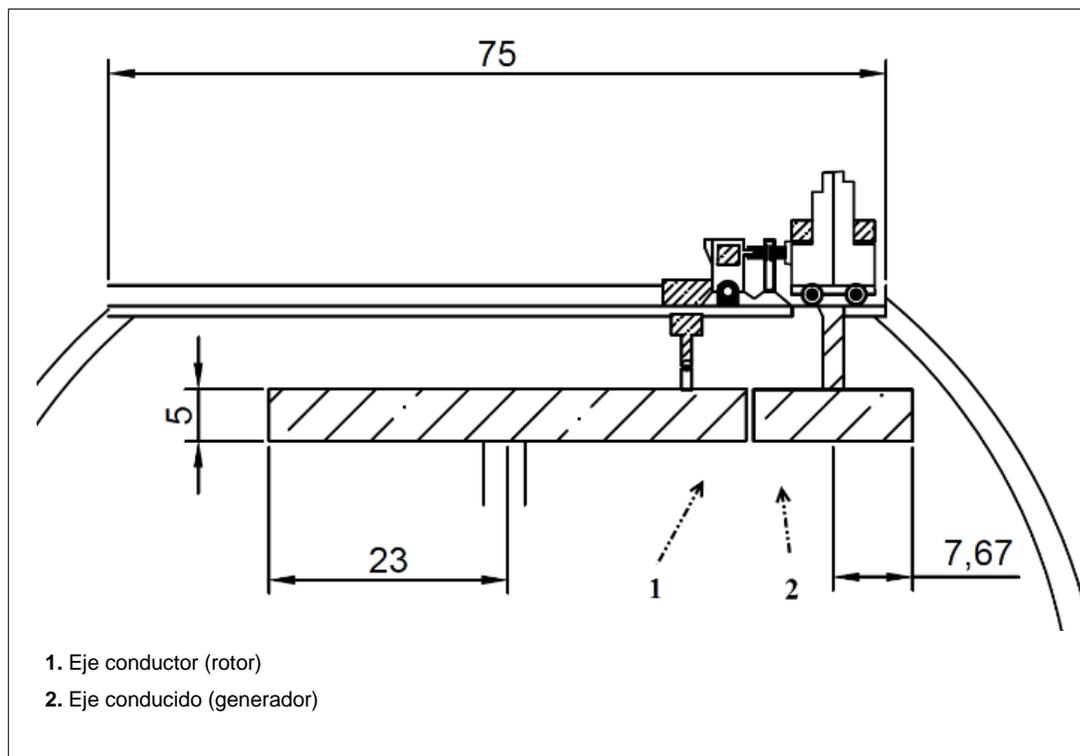


Fuente: *Ventiladores Industriales*. <http://www.ventiladoresindustriales.com.mx/>.

[Consulta: julio de 2015].

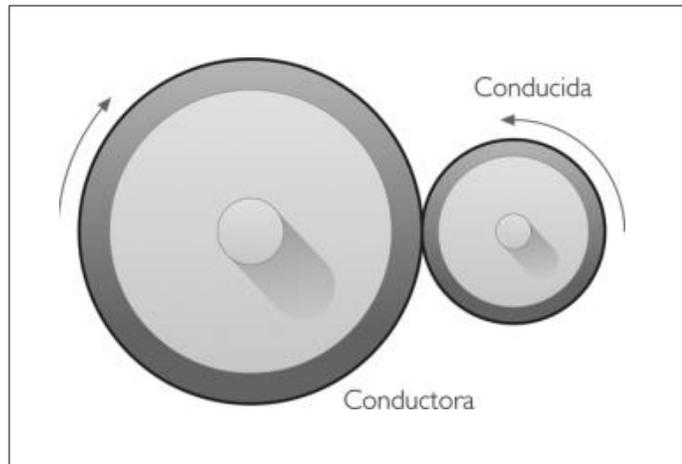
En la parte más alta de la estructura del extractor se posicionó un eje de transmisión conductor circular de rozamiento de 0,46 m de diámetro en relación 1:3 con otro eje de transmisión circular de conducción que en determinado momento entran en contacto. El mecanismo de transmisión proporciona a un generador la potencia mecánica necesaria para que este pueda empezar a suministrar energía eléctrica a una red de circuitos de potencia.

Figura 31. Eje de transmisión rotor–generador



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

Figura 32. **Mecanismos de transmisión circular**

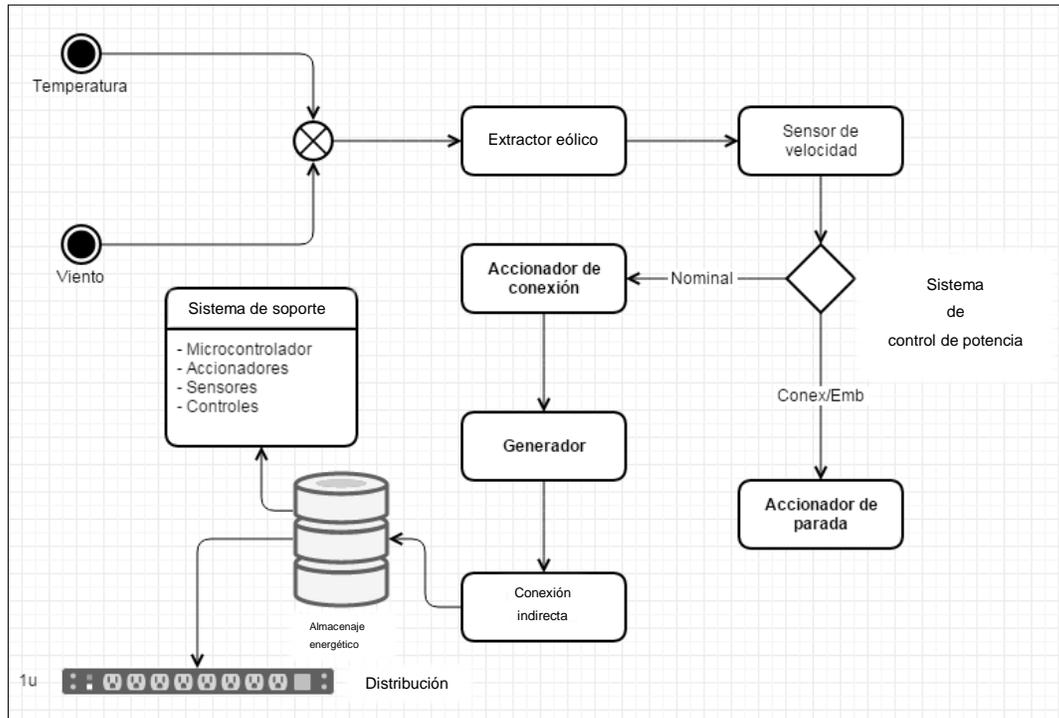


Fuente: *Sara tecnología*.

[http://saratecnologia.wikispaces.com/file/view/reudas\\_fric.png/223236374/443x274/reudas\\_fric.png](http://saratecnologia.wikispaces.com/file/view/reudas_fric.png/223236374/443x274/reudas_fric.png). [Consulta: junio de 2015].

Al momento de transferir la energía mecánica, un circuito de potencia es el encargado de rectificar, filtrar y estabilizar la energía para que pueda ser almacenada en una batería de ciclo profundo. El proceso de control de la obtención de la energía se encuentra en un diagrama de flujo de proceso en la figura 33, si partiendo del lado superior izquierdo se encuentra con las dos fuerzas que estarán presentes durante todo el proceso, viento y temperatura. La acción mecánica producirá cambios en la velocidad de giro del extractor atmosférico eólico, que será censado por un sistema de velocidad de giro, el cual mide la velocidad del extractor continuamente, mandando información importante al sistema de control de potencia.

Figura 33. **Funcionamiento del aerogenerador en extractores de turbina**

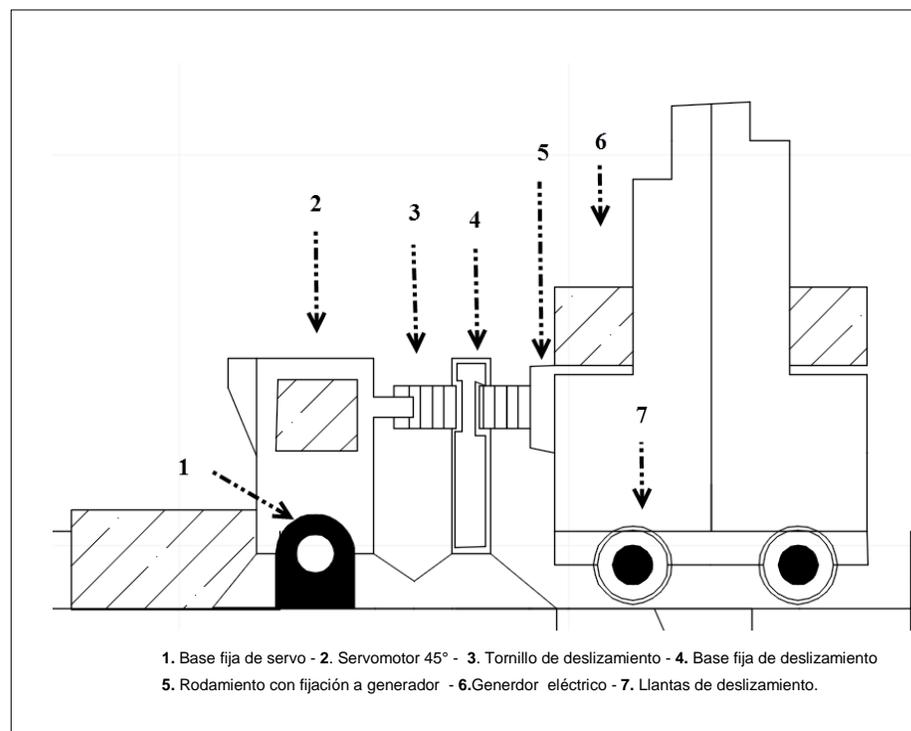


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

La información que el sistema de control de potencia necesita saber para la toma de decisión es regida por las mismas disposiciones de velocidades de un aerogenerador. La velocidad de conexión ( $V_{conex}$ ), aquella velocidad del viento por encima de la cual se genera energía; por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía. Una velocidad nominal ( $V_{nom}$ ), velocidad del viento para la que la máquina eólica alcanza su potencia nominal o estable; por encima de esta velocidad, la potencia extraída del viento se puede mantener constante.

Una velocidad de desconexión ( $V_{emb}$ ), velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala, los sistemas de seguridad comienzan a actuar frenando la máquina o desconectándose de la red a la que alimenta.

Figura 34. Sistema mecánico de potencia



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

Si es factible la obtención de energía, el sistema de potencia controlará un mecanismo motorizado que se encuentra unido al generador por un tornillo de deslizamiento horizontal, el cual es formado por un servomotor de 45° de giro, que, en proporción a su giro, el tornillo de movilidad deslizará horizontalmente al generador (rueda conducida) a la transmisión del extractor (rueda conductora). La conversión mecánica de este proceso se derivará en una conexión indirecta que

no es más que el proceso de rectificación, filtrado y regulado de la señal alterna, producida por el generador, a una señal directa, que será almacenada en una batería de ciclo profundo. De no obtener una velocidad óptima, el sistema no conectará el generador.

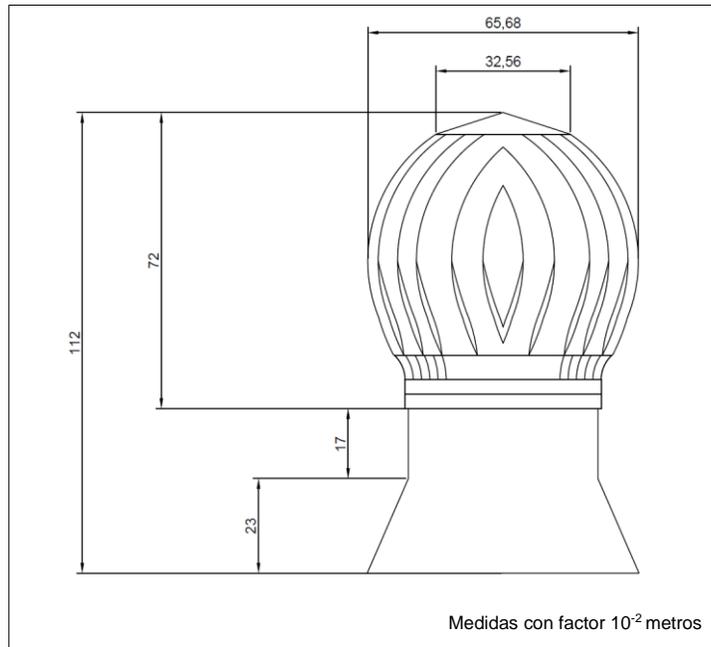
El tiempo de trabajo del generador es variable por razones del viento y la temperatura que pueden estar presentes en lapsos cortos o largos, esto hace necesaria la implementación de un almacenaje que asegure un flujo energético estable durante un periodo más largo que el que representaría tener el sistema generador en directo.

### **7.1. Interacción de los componentes en el diseño**

Se propuso el diseño de un aerogenerador a baja escala para acoplarse a un extractor atmosférico de la turbina de 0,46 metros de diámetro, con base de instalación de 0,53 metros altura y diámetro 0,46 metros, con eje de acero de 0,02 metros, con rodamientos en base y parte alta de la turbina, igualmente un eje de acero de 0,02 metros de diámetro y 0,10 metros de altura.

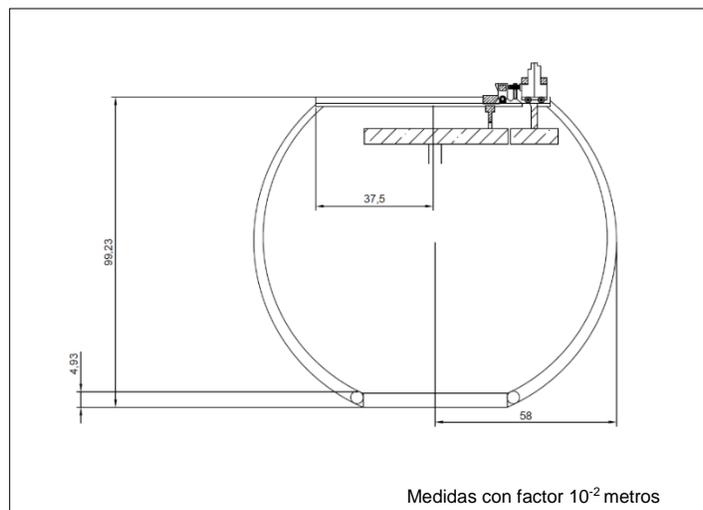
Una estructura de acoplamiento entre el generador y extractor pondrá los dos ejes de transmisión en línea para ser controlados mecánicamente con el mecanismo de posicionamiento lineal. Un anillo de sujeción en la parte baja de la base del extractor mantendrá los brazos extensores de la plataforma superior estables para posicionar los diferentes componentes del diseño (servos, generador, sensor, entre otros).

Figura 35. **Extractor eólico de turbina**



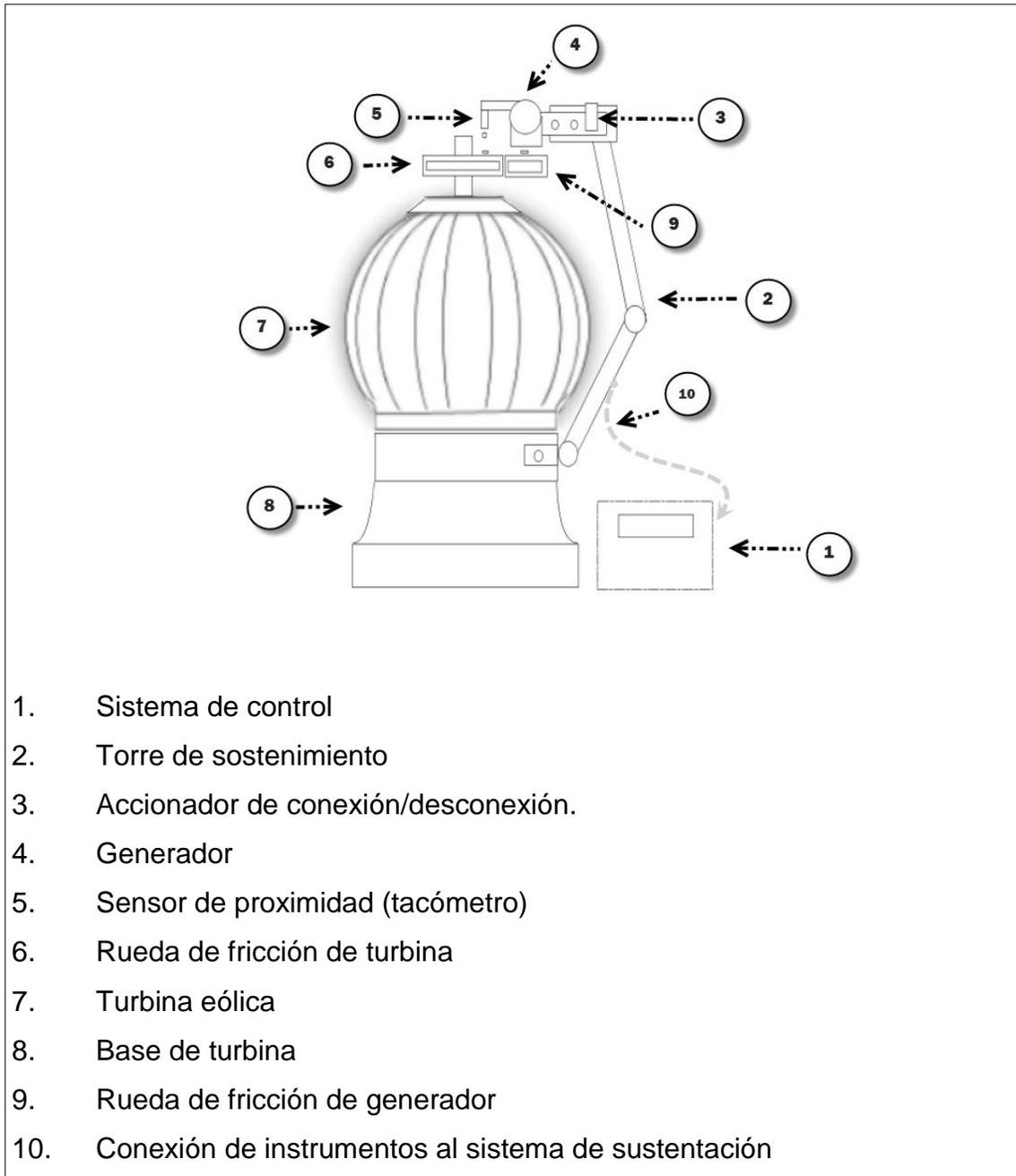
Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

Figura 36. **Estructura de acople del generador**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

Figura 37. **Sistema aerogenerador a baja escala en un extractor de turbina atmosférico**

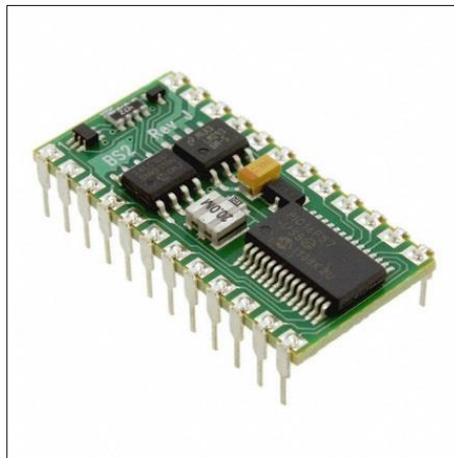


Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk

### 7.1.1. Sistema de control

El cerebro del sistema, formado por BASIC Stamp 2 (BS2), microcontrolador que posee un intérprete especializado de PBASIC (una modificación de BASIC) que se encuentra en su memoria ROM. Su casa matriz es la empresa Parallax, Inc. su encapsulado en forma de chip DIP en la cual comparte en la placa de circuito impreso con los elementos esenciales para un microprocesador: CPU, ROM que posee el intérprete de PBASIC y varios elementos periféricos, memoria de tipo EEPROM, reloj interno, fuente de alimentación, conexiones externas de entrada/salida y algunas aplicaciones del BASIC Stamp 2 internas.

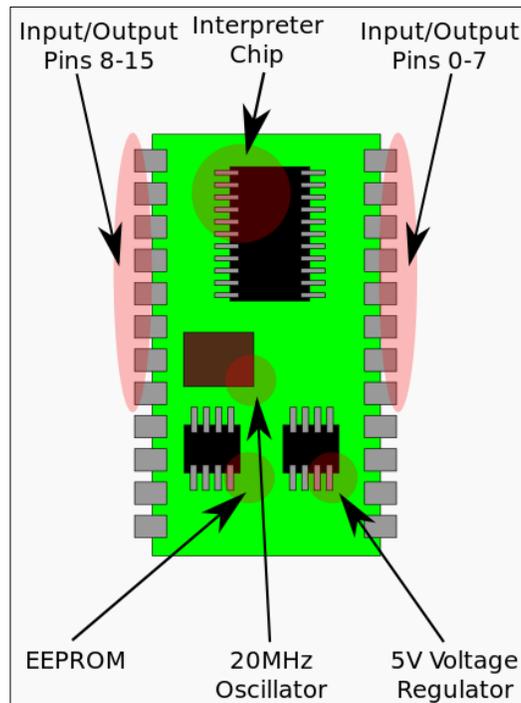
Figura 38. **BASIC Stamp 2**



Fuente: *Digikey*. <http://media.digikey.com/photos/Parallax%20Photos/BS2-IC.jpg>.

[Consulta: octubre de 2015].

Figura 39. **BASIC Stamp 2 partes importantes**



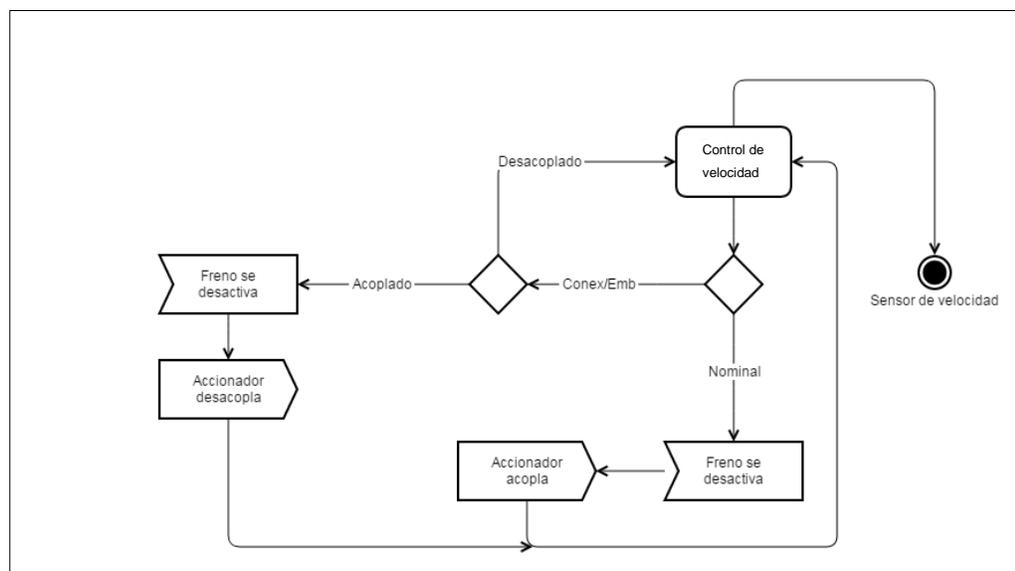
Fuente: *Wikipedia*. [https://es.wikipedia.org/wiki/BASIC\\_Stamp#/media/File:BASIC-Stamp-2\\_eng.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/BASIC_Stamp#/media/File:BASIC-Stamp-2_eng.svg). [Consulta: octubre de 2015].

Su actividad primordial es verificar los datos provenientes del sensor de velocidad en la estructura de acople y crear una variable de comparación entre la velocidad en que la turbina está girando y una conexión óptima, tomando en cuenta las velocidades de conexión, embalaje o bloqueo y nominal, directrices tomadas de aerogeneradores.

El sensor de velocidad, mecanismo infrarrojo de proximidad, envía datos periódicamente al control de velocidad, el cual transforma la señal análoga en datos digitales, los cuales representan la velocidad actual del giro de la turbina. Dependiendo de esta información, tomará 3 decisiones, si la velocidad es

nominal, es decir, el giro es constante y potente por un lapso de 60 segundos, el sistema desbloqueará el freno mecánico y el mecanismo motorizado de acople de transmisión circular del generador se conectará a la transmisión dispuesta en el extractor de turbina para empezar la generación.

Figura 40. **Flujo de lógica de control del sistema aerogenerador**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

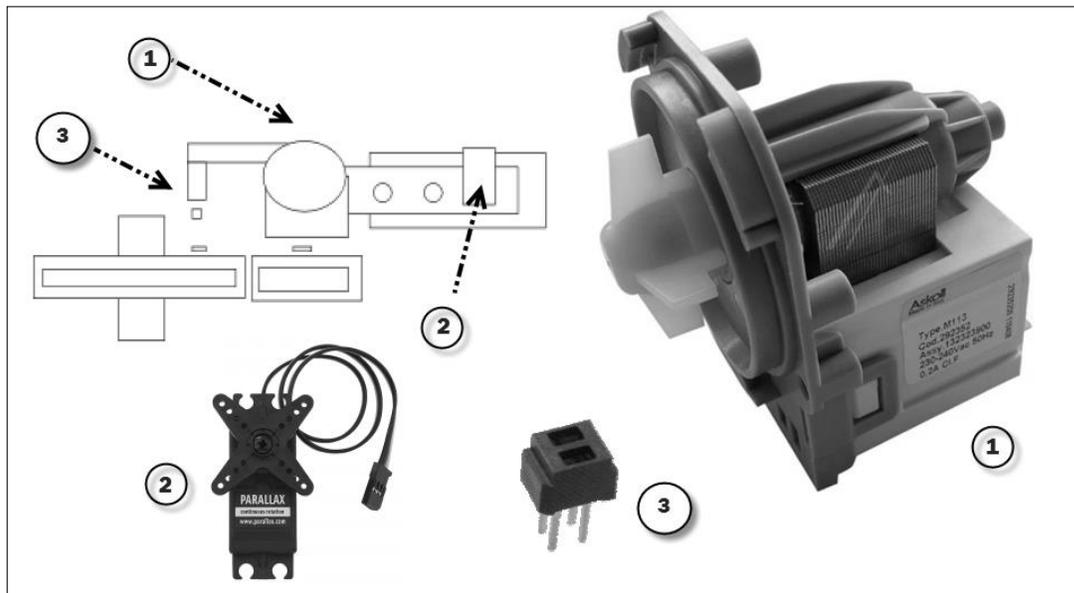
Si, por el contrario, la velocidad es muy alta que pueda dañar el generador o es muy lenta, el sistema tendrá que elegir entre desacoplarlo del sistema o permitir seguir en conexión. Todos los sistemas siempre están informando su estado al sistema de control de velocidad.

### 7.1.2. **Sensores y mecanismos de conexión mecánica**

En la etapa de conexión, dos mecanismos serán activados, un solenoide Jameco SH-T2551L de tiro tubular como freno de movimiento y el servo Parallax

STD de 45 grados como sistema de deslizador de bahía de acople, el cual es controlado por el puerto 3 de la BS2 y un PWM. Para la parte del solenoide se tomara el puerto 1 y el circuito propuesto en la figura 43.

Figura 41. **Generador, sensor y mecanismos**



Fuente: elaboración propia, empleando PaintShop Pro.

Figura 42. **Solenoide de tiro**



Fuente: *Jameco*.

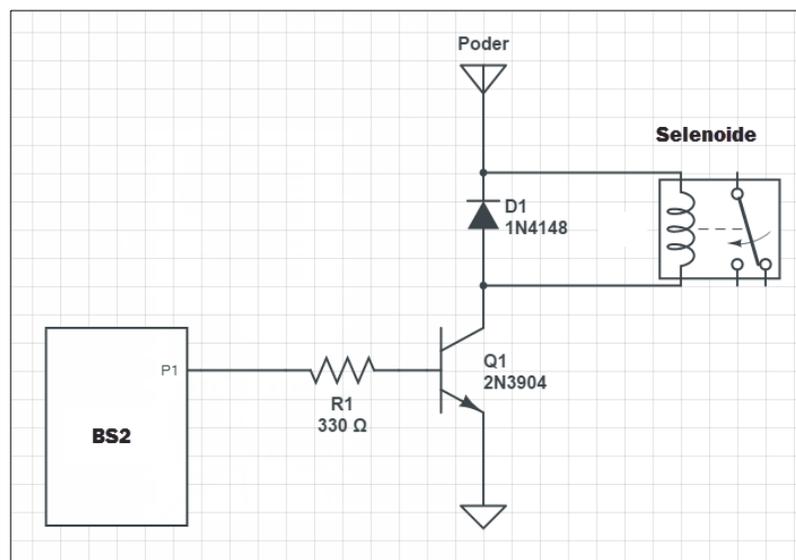
[http://www.jameco.com/webapp/wcs/stores/servlet/Product\\_10001\\_10001\\_2196748\\_-1](http://www.jameco.com/webapp/wcs/stores/servlet/Product_10001_10001_2196748_-1).

[Consulta: junio de 2015].

Un acople de impedancias se hizo necesario entre el microcontrolador y la etapa de frenado que es el solenoide (representado como un relé), para evitar fluctuaciones en el sistema de potencia al activar la bobina. Se usó un transistor 2N3907 de uso general y un diodo de retroalimentación inversa 1N4148.

El sensor de velocidad fue formado por un sensor de proximidad Optek Technology serie OPB606A, el cual posee un led infrarrojo de 935 nm y un fototransistor, que de acuerdo a la distancia brinda una señal análoga proporcional. El BS2 toma el rango de 1,75 voltios (0,0013 metros) en el rango de papel carbón según las especificaciones del fabricante para el sensor infrarrojo, como un 1 lógico y cuenta las veces que este cambia de flanco positivo para hacer el análisis de velocidad.

Figura 43. **Circuito de frenado por solenoide de tiro**

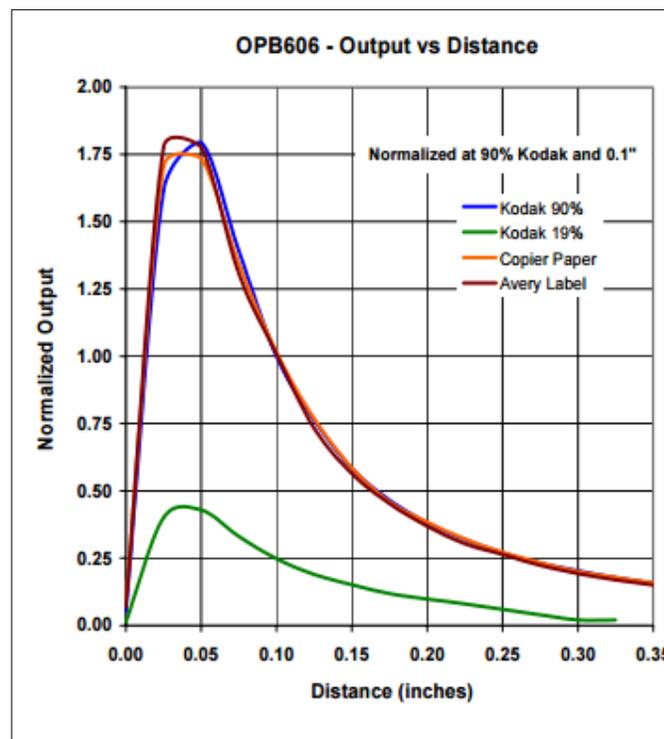


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

El funcionamiento del sensor de velocidad se basa en el paso de una figura oscura y próxima al sensor solamente cuando la transmisión de turbina del extractor realiza una revolución. Al aumentar las revoluciones, el sistema mandará con más frecuencia un pulso al control de velocidad, determinando su velocidad y con el criterio de esperar un máximo de un minuto, se conectará.

La determinación de cuándo se conecta en el tiempo, se determina en razón de la velocidad, pues entre mayores revoluciones existan, el tiempo de espera del control de conexión será más corto y a revoluciones más pequeñas, el control de velocidad esperará un tiempo más lento para enviar el pulso de conexión.

Figura 44. **Rango de salida *versus* distancia**



Fuente: Jameco. <http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1872628.pdf>.

[Consulta: junio de 2015].

### 7.1.3. Etapa de potencia

Se propuso el diseño en conexión indirecta de toma de energía del generador, es decir, la conversión de una señal alterna se rectificará y procesará para luego almacenarla para una distribución óptima de la energía. En la figura 45 se muestra un diagrama del circuito del sistema de conversión, representado el generador como un transformador. Esta señal será rectificada por dos diodos 1N4148, de 100 voltios y 0,15 amperios, con un tiempo de restitución de 4 ns, suficientes para los diferentes tipos de frecuencias que se trataron.

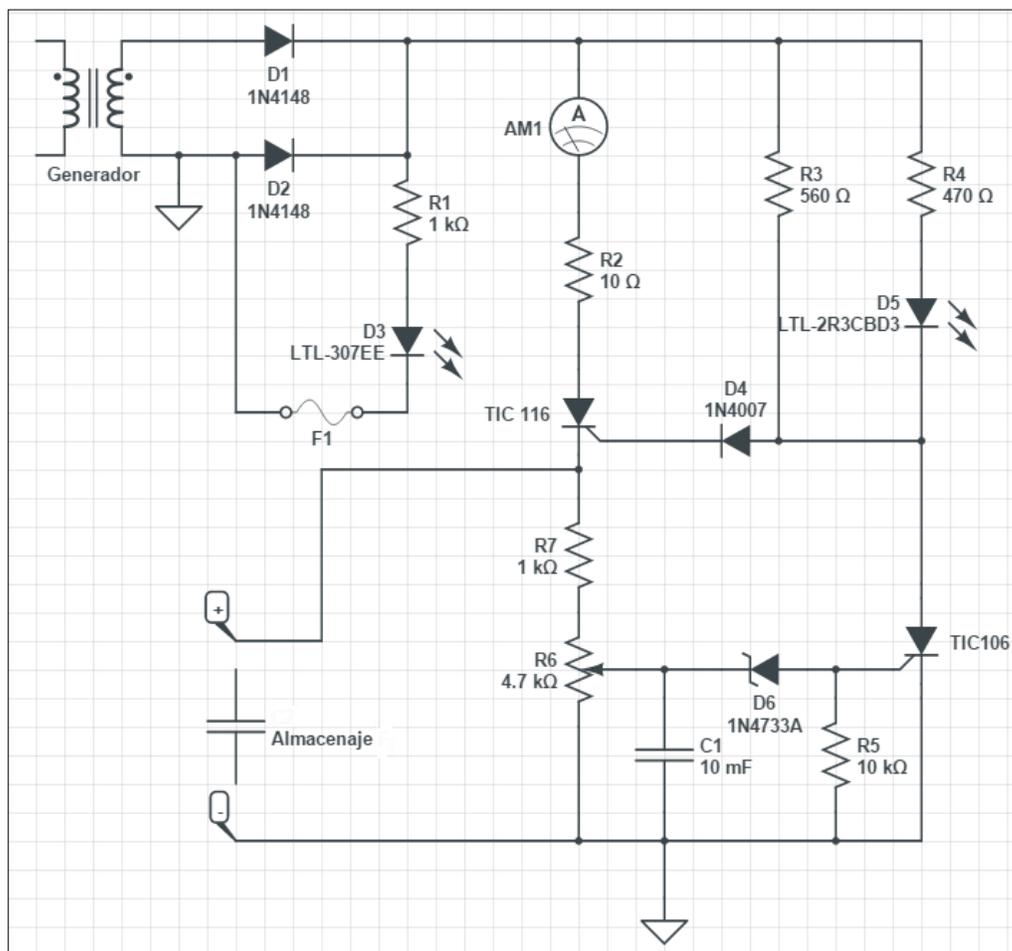
Adicionalmente, se introdujo una indicación de encendido formado por la resistencia R1 y diodo led D3, color rojo (LTL-307EE) con fusible. Se instaló un medidor de corriente para verificar el flujo de la marca Velleman AIM603000 de 0 a 3 amperios en serie con un SCR de 50 voltios y 8 amperios, el cual se encargará de suministrar la energía necesaria de carga a la batería de almacenaje.

El diodo 1N4007 es el encargado de disparar el SCR TIC 116 al momento de conexión del generador por medio de R3. Cuando la batería esté en su máxima carga un flujo de corriente se derivará hacia R6 encendiendo el led azul D5 (LTL-2R3CBD3). Posee también un SCR TIC 106 de 50 voltios y 4 amperios, que sustentará la etapa de regularización de la energía.

El generador puede proporcionar voltaje de 15 a 30 voltios en velocidad nominal, esto es importante para que el regulador, un diodo Zener 1N5352BG de 15 voltios con incerteza de 5 %, potencia de 1 W e impedancia 7 ohms pueda suministrar adecuadamente energía a una carga. La disposición del capacitor C1 es necesaria para el aplanamiento de la señal o rizado. El potenciómetro R6 y el

capacitor C1 forman el filtro RC que da como resultado un rizo de 25,5319 mV o 0,51520 % en promedio.

Figura 45. **Circuito de potencia rectificador, filtrado y almacenaje**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

La conexión indirecta solo entra a funcionar cuando se alcanza la etapa de velocidad nominal, esto hace que el bloqueo de los SCR sea natural y el sistema se desacople de la batería hasta una nueva etapa nominal de trabajo del generador.

#### 7.1.4. Almacenaje

Está constituido por una batería electrolítica líquida de ciclo profundo de 12 voltios de la marca Trojan Battery Company. Las especificaciones de la batería se proporcionan en la tabla VII, detallando el tipo, la capacidad, la capacidad a energía, el tipo de borne / poste, las dimensiones y el peso de las baterías a fin de garantizar la selección del modelo de batería adecuado para el diseño del generador.

Tabla VIII. **Características de la batería del sistema generador**

BCI GROUP SIZE	TYPE	CAPACITY <sup>A</sup> Minutes		CRANKING Performance		CAPACITY <sup>B</sup> Amp-Hours (AH)				ENERGY (kWh) 100-Hr Rate	TERMINAL Type <sup>C</sup>	DIMENSIONS <sup>D</sup> Inches (mm)			WEIGHT lbs. (kg)
		@25 Amps	@75 Amps	C.C.A. <sup>D</sup> @0°F	C.A. <sup>E</sup> @32°F	5-Hr Rate	10-Hr Rate	20-Hr Rate	100-Hr Rate			Length	Width	Height <sup>F</sup>	
<b>12 VOLT MARINE/RV DEEP-CYCLE BATTERIES - with T2 TECHNOLOGY™</b>															
24	SCS150	150	36	530	650	80	92	100	111	1.33	10	11.30 (286)	6.73 (171)	9.80 (248)	50 (23)

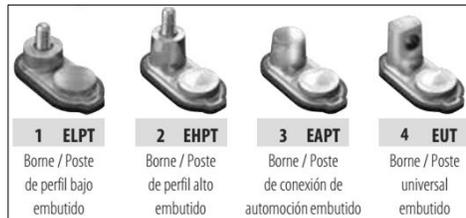
Fuente: *Trojan battery.*

[http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0152\\_ProdSpecGuideSP\\_SPA.pdf](http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0152_ProdSpecGuideSP_SPA.pdf).

[Consulta: julio de 2015].

La elección de esta batería de ciclo profundo se basó en que se necesita alimentar dispositivos como luces de emergencia, cargadores de celular y demás, pero el generador no proporciona un flujo continuo de energía, lo cual hace necesario tener una batería que esté cargándose a periodos discontinuos y también proporcionando un flujo constante hacia la parte de carga, sin que se reduzca su vida media.

Figura 46. **Configuración de bornes y postes**



Fuente: *Trojan battery.*

[http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0152\\_ProdSpecGuideSP\\_SPA.pdf](http://www.trojanbattery.com/pdf/TRJN0152_ProdSpecGuideSP_SPA.pdf).

[Consulta: julio de 2015].

Tabla IX. **Tabla de carga adecuada según temperatura**

<b>CHARGER VOLTAGE SETTINGS (AT 77°F/25°C)</b>					
<b>System Voltage</b>	<b>6V</b>	<b>12V</b>	<b>24V</b>	<b>36V</b>	<b>48V</b>
<b>Daily Charge</b>	<b>7.40</b>	<b>14.8</b>	<b>29.6</b>	<b>44.4</b>	<b>59.2</b>
<b>Float</b>	<b>6.60</b>	<b>13.2</b>	<b>26.4</b>	<b>39.6</b>	<b>52.8</b>
<b>Equalize</b>	<b>7.75</b>	<b>15.5</b>	<b>31.0</b>	<b>46.5</b>	<b>62.0</b>

Fuente: *Trojan battery.*

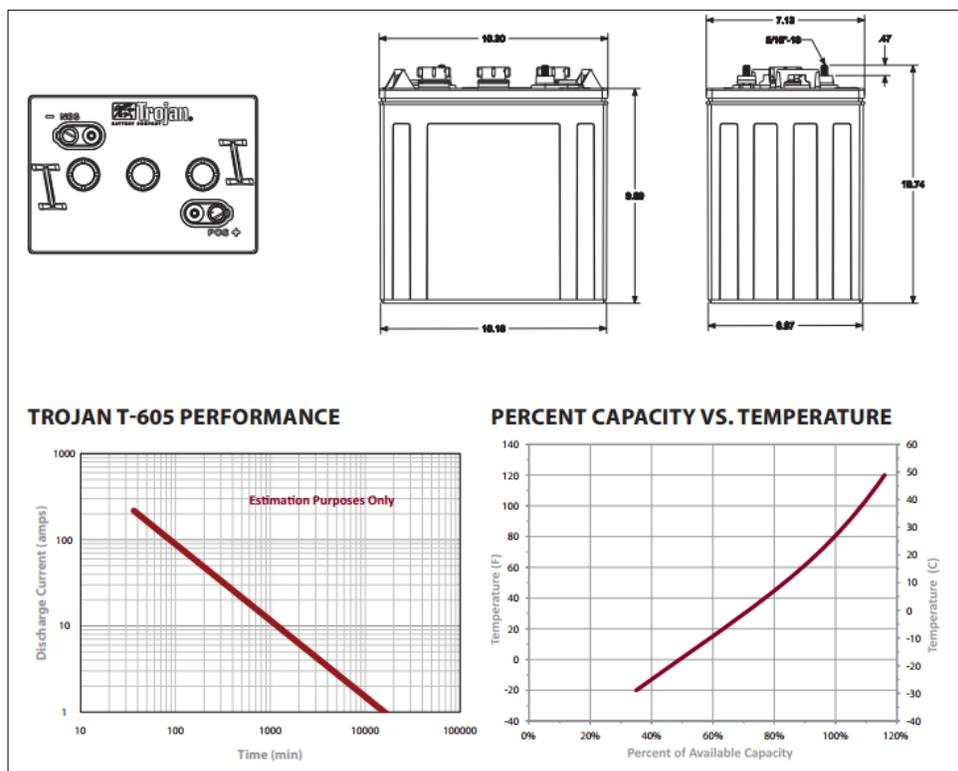
[http://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/T605\\_Trojan\\_Data\\_Sheets.pdf](http://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/T605_Trojan_Data_Sheets.pdf).

[Consulta: junio de 2015].

El generador podrá proporcionar una máxima transferencia en alterna de 12 a 24 voltios con carga, esto pasa a un rectificador y regulador, el cual carga la batería, la que siempre obtendrá una calidad de energía continua, sin temor de sobrecargas y bajas tensiones, siendo 14,40 voltios el voltaje regulado.

Se toma en cuenta los tiempos de carga en promedio de 20 a 30 minutos máximo y mínimos de 8 a 10 en frecuencias de vientos variables y temperaturas de 6 °C de diferencia entre los dos ambientes. Para los tiempos de descarga, el fabricante promedia 383 minutos a 25 amperios, este tiempo es el mínimo posible con conexiones de carga semejantes. El planteamiento del diseño promedia un tiempo similar, pero a 3 amperios, esto porque la generación en tiempo es muy reducida y le podrá llevar más tiempo cargar la batería comparada a la producida por flujo continuo por el generador.

Figura 47. **Batería T-605, 12 voltios ciclo profundo**



Fuente: *Trojan battery*.

[http://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/T605\\_Trojan\\_Data\\_Sheets.pdf](http://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/T605_Trojan_Data_Sheets.pdf).

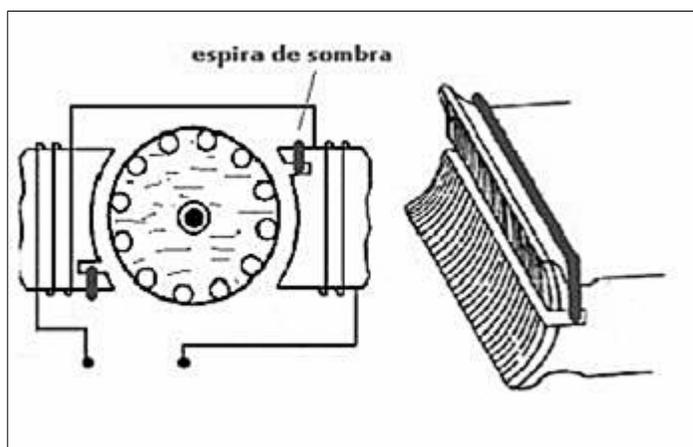
[Consulta: junio de 2015].

### 7.1.5. Generador y mecanismos

Se analizó, ante los datos del extractor, la propuesta de un generador que ofreciera una menor carga gravitacional y de resistencia al giro al conjunto de transmisión extractor atmosférico y generador. Partiendo de allí, se aconsejó mejores propuestas de generadores con características superiores.

Como datos del generador, se describe que es un motor clase M113 tipo genérico, monofásico de inducción, con arranque de espira en sombra, característico en motores de muy pequeña potencia donde la interacción entre el campo magnético pulsante principal y los campos creados por las corrientes inducidas en las espiras de sombra, produce un débil y deformado campo giratorio, capaz de producir el arranque del motor. El inducido es un pequeño rotor de jaula de ardilla, la corriente eléctrica pasa por el único bobinado del motor, el cual está alrededor de la armadura del estator.

Figura 48. Arrancador por espira de sombra



Fuente: *CIFP mantenimiento*. [http://www.cifp-mantenimiento.es/e-learning/contenidos/22/monofasicos\\_archivos/image028.jpg](http://www.cifp-mantenimiento.es/e-learning/contenidos/22/monofasicos_archivos/image028.jpg). [Consulta: junio de 2015].

La corriente alterna (60 Hz) de la red, origina un campo magnético alterno, que obliga al rotor a girar. Para el arranque del motor, es necesario un par de fuerzas de arranque, que se obtiene de dos pequeñas espiras de cobre en cortocircuito en la parte externa del estator.

La velocidad del motor es única y no puede ser regulada, depende de la frecuencia de red. Para 60 Hz, se tiene una velocidad de giro de 3 600 RPM, pero teniendo en cuenta el deslizamiento del motor, esta velocidad suele ser de 2 700 a 2 800 RPM.

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 * 60}{2} = 3\,600 \text{ RMP}$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3\,600 - 2\,800}{3\,600} = 0,22$$

Donde

$n_s$  = velocidad de sincronismo

S = deslizamiento de generador

n = velocidad del rotor

p = polos del estator

El rendimiento de este tipo de motores es bajo y apenas llega al 10 %, por lo tanto están limitados a aplicaciones de poca potencia (como es aquí). La potencia está comprendida entre 35 w. La impedancia (resistencia en corriente alterna) del motor, suele estar comprendida entre 150 y 180 ohmios.

Tabla X. **Características del generador**

Modelo	Clase	Voltaje [V]	Potencia [W]	Deslizamiento [%]	RPM	Resistencia [Ω]
<b>Genérico</b>	Asíncrono	120	35	22	3 600	175

Fuente: elaboración propia.

Se analizó este tipo de generador como propuesta inicial del diseño, como parte de estudiar cuánta carga adicional aporta al sistema de extracción ya existente, en pro de verificar las pérdidas menores al 20 % de su desempeño primordial y con el objetivo de comprobar la hipótesis planteada que es posible acoplar un dispositivo generador a un extractor de turbina y que su acción mecánica puede ser reconvertida en potencia eléctrica. El generador proporcionan un promedio de potencia energética de 24 voltios a vientos de seis metros sobre segundo, esta salida siempre es dependiente del giro de la turbina y su frecuencia de operación. Con un regularizador y rectificador a la salida se mantiene una carga constante en función de alimentar una batería de ciclo profundo de 12 voltios.

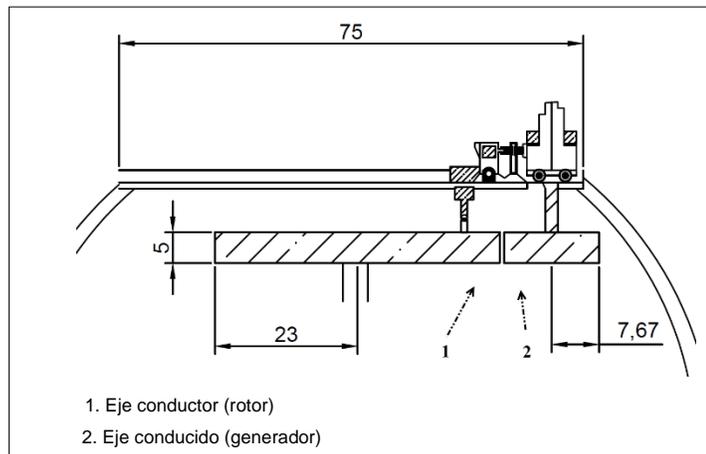
Figura 49. **Generador**



Fuente: *Imgur*. <http://i.imgur.com/N2iDaRp.jpg>. [Consulta: octubre de 2015].

Para obtener la energía mecánica del extractor se hizo uso de transmisión circular, el sistema está formado por dos ruedas solidarias con sus ejes en contacto, considerando el eje conductor unido al extractor eólico, rueda conductora conectada a nuestro eje, la cual recoge la energía mecánica a transmitirse por fricción a otra rueda en contacto.

Figura 50. **Trasmisiones**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

El segundo eje trasmisor es una rueda conducida, la que recoge el giro de la rueda conductora mediante fricción de ambas, esta lleva la potencia al eje conducido transmitiendo al generador energía mecánica. El diseño se planteó en una relación 1:3, es decir por una vuelta de la rueda conductora, la rueda conducida debe dar 3 vueltas, esta fórmula simplificada nos da como resultado:

$$D_c \cdot N_c = D_t \cdot N_t \quad [\text{Ec.7.1.5.1}]$$

Donde

$D_c$  = diámetro de la rueda conductora

$N_c$  = número de vueltas de la rueda conductora

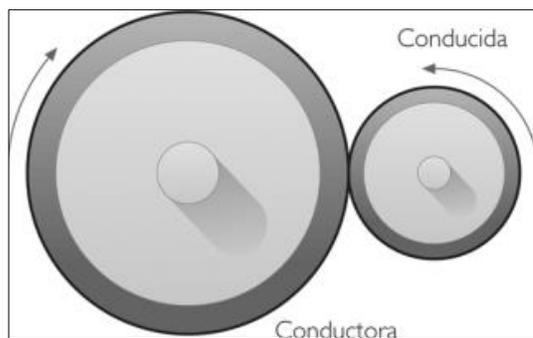
$D_t$  = diámetro de rueda conducida

$N_t$  = número de vueltas de rueda conducida

$$\frac{D_c \cdot N_c}{N_t} = D_t$$
$$\frac{0,46 \cdot 1}{3} = D_t = 0,153 \text{ [m]}$$

El diámetro de la rueda conductora es de 0,46 m y la relación 1:3, esto da una rueda conducida de 0,1534 m. Con esta relación se propuso mejorar la generación en baja velocidad que sucede en el momento en el que hay ráfagas de viento muy cortas y la temperatura entre ambientes no supera los 4 °C, también la relación no pudo ser más grande pues el diseño necesitaría un eje conducido muy pequeño, difícil de implementar en la práctica.

Figura 51. **Mecanismos de transmisión circular**



Fuente: *Sara tecnología*.

[http://saratecnologia.wikispaces.com/file/view/reudas\\_fric.png/223236374/443x274/reudas\\_fric.png](http://saratecnologia.wikispaces.com/file/view/reudas_fric.png/223236374/443x274/reudas_fric.png). [Consulta: octubre de 2015].

## 7.2. Sustentación de la turbina

Los extractores eólicos son dispositivos que están intercambiando temperatura ambiental entre dos entornos, por medio de un desplazamiento de aire circulante. El aire caliente asciende hacia las partes más altas de un recinto, dejando en las partes bajas el aire más frío, pero sin una buena ventilación este se mantendrá estático y a largo plazo todo el entorno tendrá una alta temperatura. La función de los extractores es movilizar este aire fuera y propiciando la inyección de aire renovado proveniente de ventilación a bajo nivel.

La modalidad de turbina de los extractores atmosféricos eólicos hace uso de dos variables físicas, las diferencias de temperaturas de dos entornos diferentes y la del movimiento aerodinámico de una turbina empujada por aire. Su posición o instalación idónea es en las partes más altas de un recinto, pues es ahí donde se acumula el calor que durante el día se crea por maquinaria en funcionamiento o simplemente por acción del sol en las paredes del lugar.

Un entorno industrial podría poseer más de diez extractores atmosféricos de turbina funcionando paralelamente en la parte más alta de su instalación, generando movimiento por diferencia de temperaturas sin la necesidad de vientos de grandes proporciones, pero estando presentes estos vientos, su optimización en la extracción es de mucho deseable. El giro es dependiente entonces de estas dos variables físicas, las cuales estarán presentes en magnitudes diferentes y no periódicas.

Sus rangos de frecuencias de giros están cambiando intempestivamente, lo cual hace que se tengan paros totales de algunos minutos y puestas en marcha con velocidades variantes por horas, mientras exista una diferencia de temperaturas de 276,15 °K o velocidades de 2,2 m/s el extractor se moverá,

teniendo un óptimo desempeño a 289,15 °K de diferencia entre el ambiente externo y su interior así como 3,33 m/s en ráfaga continua. La dirección del viento es casi despreciable, pues su estructura circular puede capturar el empuje casi en cualquier dirección, pero siendo vulnerable a vientos huracanados que podrían dañar la estructura interna de turbina.

### **7.3. Pérdida y resistencia de los mecanismos de transmisión**

El diseño de conexión entre la turbina y el generador, la forma en que la turbina eólica transmite la energía mecánica al generador, es un mecanismo de rozamiento o transmisión circular, el cual tiene dos estados, el primero de ellos, la conexión, es cuando los dos mecanismos se encuentran emparejados y su acción genera movimiento rotativo. La segunda forma, la desconexión, sucede cuando los dos ejes trasmisor o conductor y receptor o conducido se separan y tienden a estar inmóviles.

El viento y la temperatura hacen girar la turbina, si esta llega a una velocidad adecuada según los criterios del sistema de control de velocidad del diseño, este mandará una acción a los motores de conexión para que los dos ejes se acerquen y emparejen. Se prevé una resistencia ocasionada por el emparejamiento, la cual reduce el giro a un 15 % de la velocidad anterior a la conexión, tomando en cuenta esta pérdida por rozamiento, el sistema aún podrá generar energía de transmisión al generador y este empezará a convertir la fuerza en energía.

En el diseño, las partes que afectan al funcionamiento de la turbina, es decir, los componentes de la estructura híbrida formada por los dos ejes rotatorios no deben ocasionar más del 20 % de atenuación en el desempeño del extractor en pleno funcionamiento. Con el análisis de las velocidades del rotor de la turbina

se diseñaron ejes transmisores en relación 1:3 para solventar pérdidas de extracción en bajas velocidades.

#### 7.4. Análisis de velocidades del rotor y potencia máxima

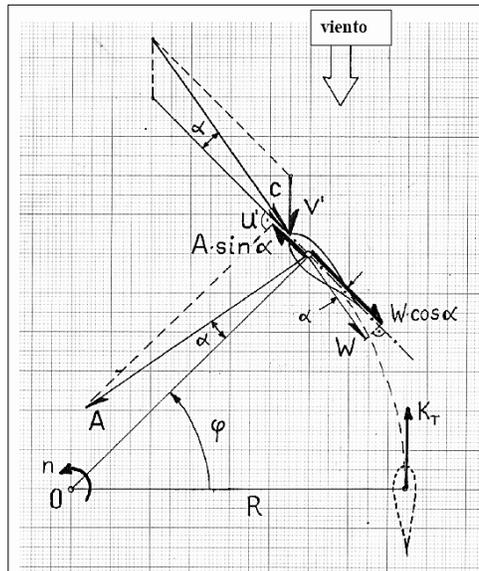
Un extractor a turbina se puede entender como un roto del tipo de eje vertical, convirtiendo el viento en torsión sobre el eje rotatorio. El estudio lleva a la versión del rotor Darrieus, constituido con alas de perfil simétrico de alto rendimiento, en forma de semicírculos o parábolas con requerimientos de potencia externa para empezar a girar. La ecuación que explica el comportamiento de la velocidad absoluta o de la turbina se encuentra descrita en la ecuación 4.3.1, donde  $c$  ejemplifica la velocidad de giro, la velocidad del viento es  $v'$  en metros sobre segundo, el ángulo de rotación  $\varphi$  en radianes y la velocidad del rotor  $\lambda$  en metros sobre segundo:

$$c = v' \cdot \sqrt{[(\lambda + \cos\varphi)^2 + (\sin\varphi)^2]} \quad [\text{Ec. 4.3.1}]$$

Para la figura 52, el ángulo de incidencia  $\alpha$  del viento, el ángulo de rotación  $\varphi$  y la velocidad específica del rotor  $\lambda$  existe la siguiente relación:

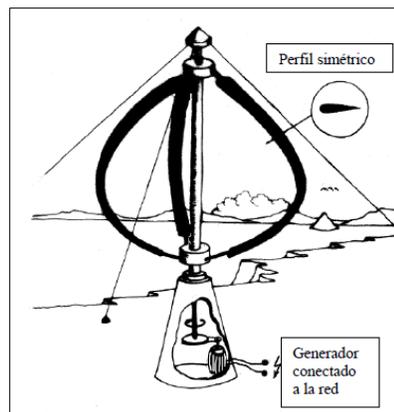
$$\alpha = \arctan \left[ \frac{\sin\varphi}{(\lambda + \cos\varphi)} \right] \quad [\text{Ec. 4.3.2}]$$

Figura 52. **Fuerzas que actúan en la turbina Darrieus**



Fuente: Amics21. [http://www.amics21.com/laveritat/introduccion\\_aerogenerador\\_darrieus.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_aerogenerador_darrieus.pdf).  
[Consulta: junio de 2015].

Figura 53. **Forma básica de una turbina Darrieus**



Fuente: Amic21. [http://www.amics21.com/laveritat/introduccion\\_aerogenerador\\_darrieus.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_aerogenerador_darrieus.pdf).  
[Consulta: junio de 2015].

El ángulo de incidencia del perfil  $\alpha$  varía durante la rotación de las palas, en cada ángulo  $\varphi$  la fuerza tangencial que actúa sobre las palas es la resultante  $K_T$  de las proyecciones sobre la tangente de los vectores de la fuerza de sustentación  $A$  (área) y la fuerza de resistencia  $W$  (viento).

$$K_T = A \cdot \sin\alpha - W \cdot \cos\alpha =$$

$$K_T = [c_a \cdot \sin\alpha - c_w \cdot \cos\alpha] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot v^2 \quad [N] \quad [\text{Ec. 4.3.3}]$$

Donde

$C_a$  = coeficiente de sustentación del perfil simétrico

$C_w$  = coeficiente de resistencia del perfil simétrico

$\rho$  = densidad media del aire, aproximado 1,25 kg/m<sup>3</sup>

$f$  = superficie de la pala

Si se toma la ecuación 4.3.3 y se introduce la ecuación 4.3.1 como el valor  $c$  se tiene:

$$K_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot v^2 \cdot [c_a \cdot \sin\alpha - c_w \cdot \cos\alpha] \cdot [(\lambda + \cos\varphi)^2 + (\sin\varphi)^2] \quad [\text{Ec. 4.3.1.1}]$$

Donde  $f$  es la superficie de la pala, además vamos a suponer que tenemos una determinada velocidad del viento constante, en ese caso, el producto de la ecuación  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot v^2$  será una constante y con la ayuda de las figuras 12, 13 y 14 del capítulo 4 se define el par que representa potencia teórica que define una turbina Darrieus como:

$$f(\lambda, c_a, c_w, \alpha, \varphi) = [c_a \cdot \sin\alpha - c_w \cdot \cos\alpha] \cdot [(\lambda + \cos\varphi)^2 + (\sin\varphi)^2] \quad [\text{Ec. 4.3.1.2}]$$

Con estas se definió tras el estudio de las gráficas de desempeño, el coeficiente de giro de la turbina M en:

$$M = \frac{1}{4} \cdot c_m \cdot \rho \cdot H \cdot D^2 \cdot v^2 [Nm] \quad [\text{Ec.4.3.1.3}]$$

Así como la potencia desarrollada por la misma

$$P = [(2 \cdot \pi \cdot n) / 60] \cdot M \quad [\text{Ec. 4.3.1.4}]$$

Donde

v = velocidad del viento

D = diámetro de la turbina Darrieus (de palas verticales)

H = altura de la turbina Darrieus (longitud de las palas)

n = número de revoluciones de la turbina Darrieus

La potencia máxima en watts [W] que se obtiene del roto puede calcularse y tiene relación con la velocidad del viento, la altura y diámetro la estructura, así como una constante de proporcionalidad el índice para el extractor se aproxima a  $C_m = 0,7$ .

$$M = \frac{1}{4} \cdot c_m \cdot \rho \cdot H \cdot D^2 \cdot v^2 [Nm] \quad [\text{Ec. 7.4.1}]$$

$$P_{Max} = [(2 \cdot \pi \cdot n) / 60] \cdot M \quad [\text{Ec. 7.4.2}]$$

Donde

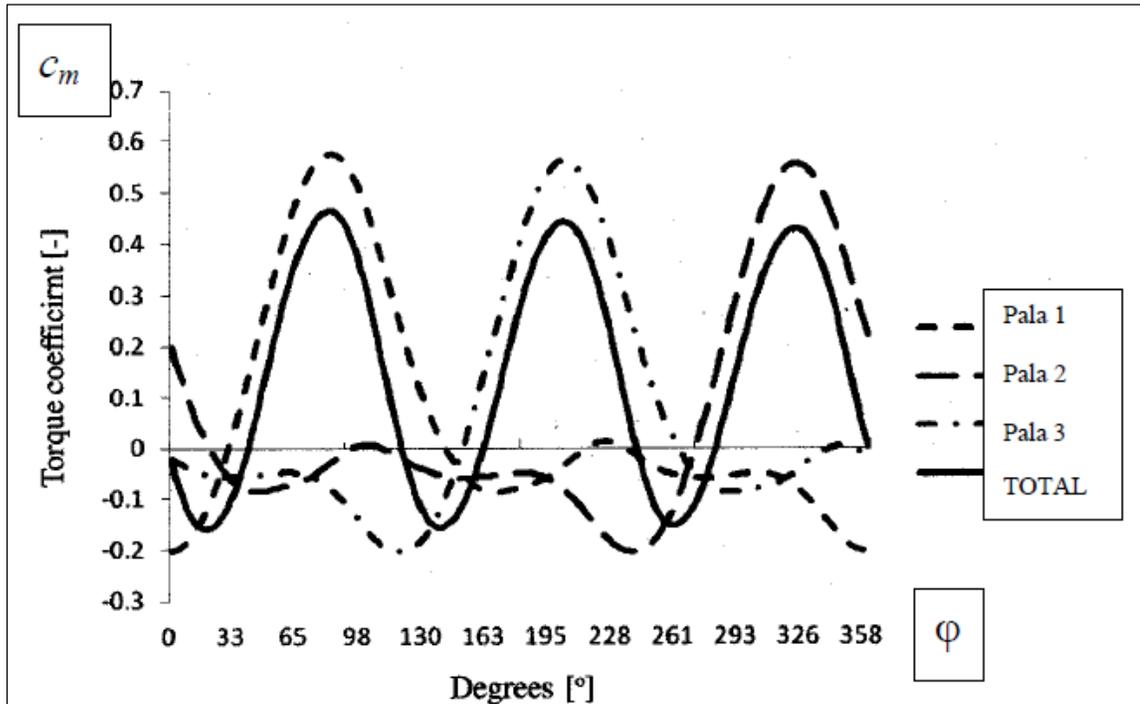
v = velocidad del viento

D = diámetro de la turbina Darrieus (de palas verticales)

H = altura de la turbina Darrieus (longitud de las palas)

n = número de revoluciones de la turbina Darrieus

Figura 54. Coeficiente de par de giro  $c_m$  con 3 palas



Fuente: *Amics 21*.

[http://www.amics21.com/laveritat/introduction\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf/laveritat/introduction\\_darrieus\\_wind\\_turbines.pdf](http://www.amics21.com/laveritat/introduction_darrieus_wind_turbines.pdf/laveritat/introduction_darrieus_wind_turbines.pdf). [Consulta: octubre de 2015].

La velocidad de giro  $V_{rpm}$  en revoluciones por minuto del rotor se calcula con la ecuación 7.4.3, donde  $\lambda$  es un factor llamado velocidad específica de la eólica,  $v$  la velocidad del viento en metros sobre segundo y  $D$  el diámetro del rotor en metros. La velocidad específica  $\lambda$  es un factor característico de cada eólica. Su valor oscila entre 0,7 y 14. Se obtiene dividiendo la velocidad de las puntas de las palas por la velocidad del viento, en rotores de eje vertical el cálculo de  $\lambda$  es la unidad.

$$V_{rpm} = \frac{60 \cdot \lambda \cdot v}{\pi \cdot D} \quad [rpm] \quad [\text{Ec. 7.4.3}]$$

Donde

$V_{rpm}$  = revoluciones por minuto del rotor

$\lambda$  = factor velocidad específica eólica

$v$  = velocidad del viento

$D$  = Diámetro del rotor

Ahora bien, los datos para la potencia que entrega nuestra turbina (una variante del rotor Darrieus) de 0,46 metros con una altura de 0,8 metros a velocidades de viento de 10 m/s en promedio es de 160 watts aproximadamente, y el giro a esta velocidad está en el rango de 415 RPM

$$V_{rpm} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 10}{\pi \cdot 0,46} = 415 \quad [rpm]$$

$$M = \frac{1}{4} \cdot 0,7 \cdot 1,25 \cdot 0,8 \cdot 0,46^2 \cdot 10^2 = 3,70 \quad [Nm]$$

$$P_{Max} = \left[ \frac{(2 \cdot \pi \cdot 290)}{60} \right] \cdot 3,70 = 160,86 \quad W$$

Tabla XI. **Potencia y revoluciones por minuto de turbina**

Velocidad del viento	$M$	Potencia [W]	RPM	$\lambda$
2 m/s	0,7	32,17	83	1
10 m/s	0,7	160,86	415	1
12 m/s	0,7	193,04	498	1

Fuente: elaboración propia.

## 7.5. Control de potencia

El control de potencia se basa en la obtención de la máxima transferencia de energía mecánica en el extractor de turbina eólica, la naturaleza errática de giro, en la cual pueden existir lapsos de intensidad variable o paro general del giro, hace necesario tener un sistema que esté censando a periodos continuos la velocidad del viento.

La forma más interesante de medir la presión del viento en el extractor es revisando la turbina y su eje de giro, el cual se moverá según el viento o la cantidad de temperatura que esté presente dentro del mismo. El sensor de velocidad, una unidad presente el diseño, está midiendo las vueltas que la turbina da por minuto, mandando en intervalos frecuentes un pulso que será contabilizado, analizando su tiempo de llegada y la duración del siguiente pulso entrante.

Entre más cortos estén los espaciamientos entre pulsos, a mayor velocidad el extractor girará y, por ende, el rotor tendrá una velocidad afectada por el viento o la temperatura. Esta información es importante para determinar la velocidad óptima de conexión y es cuando el generador transformará la máxima energía mecánica en eléctrica, presentando la menor pérdida por contacto de la transmisión, formada por dos ejes circulares en relación 1:3.

Potencias que presenten pérdidas por velocidades inferiores a dos metros sobre segundo o 41 RPM, tendrán que ser descartadas por el sistema de control de potencia, haciendo que la conexión entre generador y turbina se detenga. Se tiene 2 casos para este apartado, uno de ellos es cuando no se ha producido la conexión y la velocidad es baja. Naturalmente, el sistema no mandará ningún

mandato para conexión y el otro caso será que estando en conexión y empieza a recibir velocidades inferiores se desconectara para evitar pérdidas.

Cuando se habla de pérdidas se describen dos tipos de ellas, la primera se basa en la de desempeño del extractor, el cual no puede disminuir de un 20% como máximo su caudal de extracción de aire por metro cúbico por hora. Para un extractor normal de 0,46 metros, a una velocidad igual a 2 m/s, el caudal normal de extracción es de 1 300 m<sup>3</sup> por hora, una pérdida del 20 % representaría 260 m<sup>3</sup>, el cual por inercia podría parar el extractor y tener pérdida máxima.

Al presentar velocidades mayores a 5 m/s el caudal estaría en 2 400m<sup>3</sup> por hora, su pérdida sería menor a los 480 m<sup>3</sup>, esto se debe a que la inercia de rotación es lo suficientemente fuerte para soportar la conexión. Se presentarán pérdidas mínimas y no frenará la extracción. La segunda forma de pérdida es la de generación, pues se necesita un flujo de corriente que pueda levantar los sistemas de control y carga de batería. Tomando en cuenta esto, el diseño pretende optimizar la generación sin descuidar la extracción.

## **7.6. Seguridad de turbina y trabajo**

Cuando se describe un diseño, se deben tomar en cuenta lineamientos por los cuales el sistema a proponer tenga límites de alcance, estos radican en niveles estructurales de los mecanismos utilizados, como sus inherentes estados constructivos en los materiales en los que fueron creados. El diseño del sistema contempla ciertas normas de seguridad, tanto a nivel estructural como de desempeño.

### **7.6.1. Nivel estructural**

El extractor eólico de turbina no debe presentar obstrucciones en el perímetro que puedan interferir en el flujo de aire que sale de su estructura, aire caliente que será intercambiado por otro de temperatura más fresca de las partes bajas del lugar y un viento de empuje del exterior para optimizar la extracción. El diseño plantea una estructura lo suficientemente sólida pero que no interfiera con este flujo, el cual debe ser posicionado en la parte negativa del extractor, es decir, en favor del viento que circula para la recombinación de temperaturas. Aunque esto no es una limitante del desempeño de los dos sistemas crea una optimización en el modelo para la seguridad y trabajo.

El aislamiento de las partes esenciales del sistema es fundamental para un óptimo desempeño, estando en lugares de calor, humo, viento, humedad y demás efectos naturales. Para las conexiones entre partes electrónicas se ha utilizado un nivel de cable UTP Cat 5e para exteriores con doble chaqueta PE + PVC. El revestimiento exterior está hecho de polietileno negro de alta densidad (PE), que es extremadamente duradero y ofrece una vida útil del producto muy larga (20 años de vida). Resiste contra la penetración de agua, humedad, radiación UV, grasas, aceites, temperaturas extremas. Esta chaqueta exterior ofrece una protección positiva contra la corrosión, la erosión y la fricción y hay una protección opcional contra ataques de roedores PE que a las plagas, como las ratas, no les gusta morder.

La parte de carga de batería de ciclo profundo, se calculó la sección de cable con la herramienta web <http://adf.ly/1PxSSj>, la cual es una página dedicada a ofrecer soluciones energéticas renovables. Las especificaciones del modelo están con una longitud de 5 metros desde el generador a la batería, proporcionando un máximo de 3 amperios con 24 voltios y una caída del 1 %, la

caída de tensión son pérdidas de voltaje que se producen en el cableado. Es importante que estas pérdidas sean mínimas y no superen las siguientes recomendaciones: caída máxima recomendada entre placa y regulador, 3 %, caída máxima recomendada entre regulador y batería, 1 % y caída máxima recomendada entre batería e inversor, 1 %. Esto da 0,24 voltios de caída de tensión y una sección del cable de 2,23 mm<sup>2</sup>

Tabla XII. **Calidad del cable**

<b>Nivel de conexión</b>	<b>Cable</b>	<b>Cantidad [m]</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Corriente [A]</b>	<b>Caída de tensión [%]</b>
<b>Electrónica</b>	UTP Cat5e	1	7	1	1
<b>Potencia</b>	AWG #13	5	24	3	1

Fuente: elaboración propia.

### **7.6.2. Nivel de desempeño**

Como medidas de seguridad en el desempeño, se utilizó el mecanismo de conexión y desconexión, el cual asegura que no se obtendrá energía si no existe suficiente movimiento en el extractor para obtenerla, los mecanismos circulares de transmisión ejercen niveles nominales de transmisión energética, pero la forma de inserción en el sistema de generador y turbina son los adecuados.

En el diseño fue necesario un sistema que presente unas características nominales en la recolección de la energía, para asegurar un desempeño natural en el extractor, pero esto no interfiere en la premisa de que puede producir un nivel considerable de energía en conjunto a otros extractores eólicos de turbina instalados en el complejo, cosa habitual en instalaciones industriales.

## **8. ANÁLISIS DE COSTES DEL ESTUDIO**

El diseño de un aerogenerador eólico en extractores de turbina eólicas presenta un gran interés en lo referente a cuanta energía podrá suministrar sin afectar las cualidades principales de extracción del sistema. Si ocurre un equilibrio entre extracción y generación, se podrían investigar mejores técnicas para generar energía a partir de ellos, además de un ahorro de energía proveniente de generadoras tradicionales. Un análisis de costos es necesario para ubicar el diseño a mediano plazo, el cual dará un panorama más amplio de la rentabilidad de estudiar este diseño y su posterior implementación.

Los análisis se basarán en varios rubros que afectarán de manera directa la puesta en marcha del estudio del diseño de un aerogenerador en extractores de turbinas eólicas.

### **8.1. Costos por permisos municipales, estatales y federales en Guatemala**

Por el momento no existen gravámenes por generar energía por medio eólico, ni presentar permisos por implementación y diseño, más bien, existen varios incentivos que el Ministerio de Energía y Minas propone para fortalecer la explotación de estos recursos por medio del Decreto número 52-2003, Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable y el Acuerdo Gubernativo número 211-2005, Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable.

Estos lineamientos sí contemplan en grandes proyectos compromisos de seguridad en el trabajo, datos técnicos del proyecto, legalizaciones de personas jurídicas o personales, periodos de ejecución, planos y diseños. Enfocados a la implementación de plantas generadores eólicas a gran escala, las cuales superan el diseño planteado en este trabajo de graduación. Al respecto, el MEM no obliga por el momento a presentar ningún documento, siempre y cuando la generación no sea mayor de 10 KW y la planta no supere 100 m<sup>2</sup>. Las reglamentaciones son válidas para cualquier parte del país y al no ser un diseño que use áreas nuevas, no hay restricción municipal. El costo por parte legal es nulo para el estudio de este diseño.

## 8.2. Costos en la implementación del estudio piloto

En el proceso de diseño, se presentó un apartado de costos para el estudio, la factibilidad económica de crear un prototipo que pueda resolver la interrogante de generación máxima del dispositivo frente a factores de costes de la adquisición de dispositivos físicos para el prototipo inicial. A continuación se lista los componentes fundamentales para el prototipo inicial, que según su disponibilidad y coste se describen.

Tabla XIII. Costos de implementación del diseño

Dispositivo	Descripción	Costo unidad[Q]	Cantidad	Subtotal [Q]
<b>Turbina</b>	Extractor 0,46 metros	1 800	1	1 800
<b>Generador</b>	Generador asíncrono de 35W	150	1	150
<b>Microcontrolador</b>	BASIC Stamp 2	274	1	274

Continuación de la tabla XIII

<b>Dispositivo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo unidad [Q]</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Subtotal [Q]</b>
<b>Control de velocidad</b>	Sensor refractivo	10	1	10
<b>Kit de potencia y electrónica</b>	Resistencias, capacitancia, cables, placas, entre otros.	200	1	200
<b>Freno mecánico</b>	Seleniodes 12V	90	1	90
<b>Bahía de acople</b>	Servo 45 grados	90	1	90
<b>Censado de corriente</b>	Amperímetro	50	1	50
<b>Acumulación</b>	Batería ciclo profundo de 12V	750	1	750
<b>Estructura</b>	Soportes metálicos para fijación y montaje	250	1	250
<b>Trasmisión</b>	Ejes de trasmisión circular de 0,46 m y 0,15m	50	2	100
			<b>TOTAL</b>	<b>3 764</b>

Fuente: elaboración propia.

En el costo se ha agregado el extractor de turbina eólica, que para el estudio inicial ha de poseerse como parte del prototipo a estudiar. Ahora bien, este costo se reducirá del listado al momento de ser producido como parte de un accesorio del ya existente sistema de extracción en las industrias y solo será agregado si es una nueva instalación en el lugar final.

### 8.3. Análisis de retribución de capital por generación

Aunque el diseño está pensado en el análisis de factibilidad de poder generar energía por medio de un extractor eólico de turbina, este puede, dada las variables presentadas, mostrar una retribución a largo plazo en el costo de la implementación.

Se prevé que el generador suministre 6 horas útiles en el día, con un mecanismo multiplicador turbina-generador, relación 1:3, con un rotor de 0,457m de diámetro en el extractor de turbina y según las velocidades de control, los datos serían los siguientes.

Tabla XIV. Escenarios de recaudación y entrega de energía

Etapa	Viento [m/s]	Velocidad lineal de la turbina [m/s]	RPM X3 generador	Voltaje producido AC [V]	Voltaje regulado DC [V]	Corriente [A]	Potencia [Wh]
<b>Conex</b>	2	3	249	10	10,5	2	126
<b>Nominal</b>	8	6	1 245	24	12,3	3	221,4
<b>Embalar</b>	12	8	1 494	28	12,6	3,8	287,28

Donde

Etapa: indica los tres posibles escenarios de conexión y recaudación de energía: conex, la mínima velocidad para producir; nominal, producción sin pérdidas y embalar, velocidad máxima antes de perder el control de producción de energía. Viento: velocidad promedio de los vientos circundantes en el extractor en los escenarios de conexión propuestos.

Velocidad lineal de la turbina: es la relación entre el radio y la velocidad angular que está afectando a la turbina por acción del viento y la diferencia de temperatura.

RPM X3 generador: son las revoluciones por minuto que el extractor genera a diferentes etapas del proceso de recaudación de energía.

Voltaje producido AC: es la magnitud del generador produce en un determinado escenario en alterna.

Voltaje Regulado DC: es la magnitud constante que se propone como resultado de la rectificación y filtraje.

Corriente: magnitud de la corriente por hora entregada.

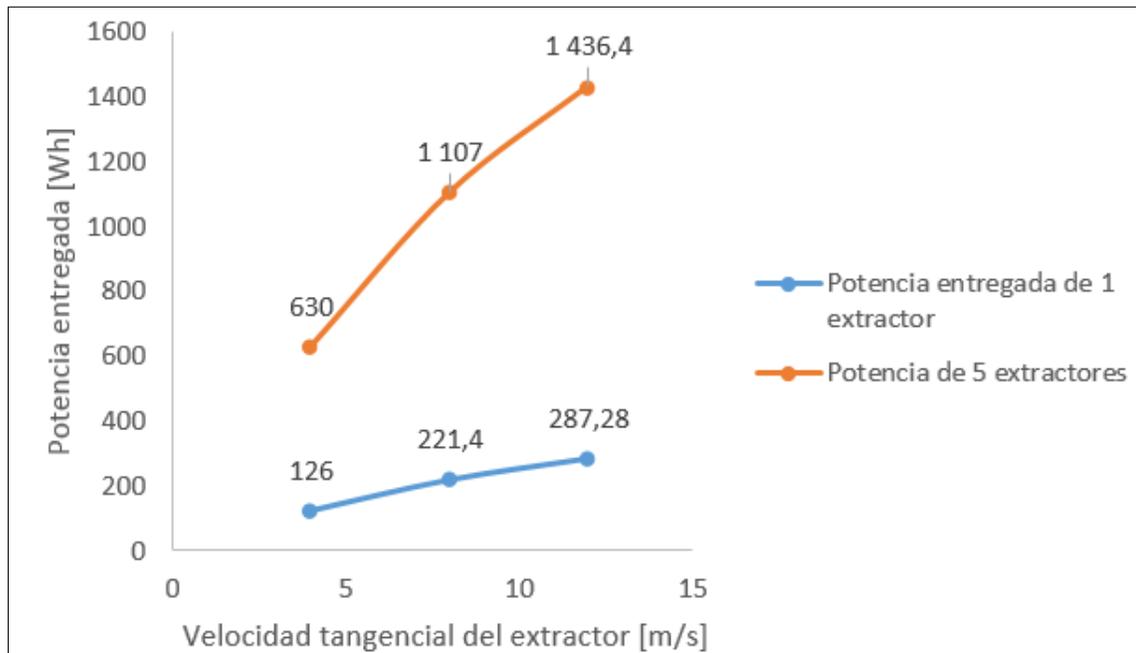
Potencia: magnitud de watts entregados por hora producida.

Fuente: elaboración propia.

La velocidad de conexión ( $V_{conex.}$ ) aquella velocidad del viento por encima de la cual se genera energía; por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía. Una velocidad nominal ( $V_{nom}$ ), velocidad del viento para la que la máquina eólica alcanza su potencia nominal o estable; por encima de esta velocidad la potencia extraída del viento se puede mantener constante. Una velocidad de desconexión ( $V_{emb}$ ), velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala, los sistemas de seguridad comienzan a actuar frenando la máquina, desconectándose de la red a la que alimenta.

Según los criterios del diseño presentado, se prevé un tiempo promedio de trabajo del extractor de 5 a 6 horas diarias en lapsos de 15 y 20 minutos en tiempo de conexión.

Figura 55. **Potencia entregada por el sistema 6 horas diarias**

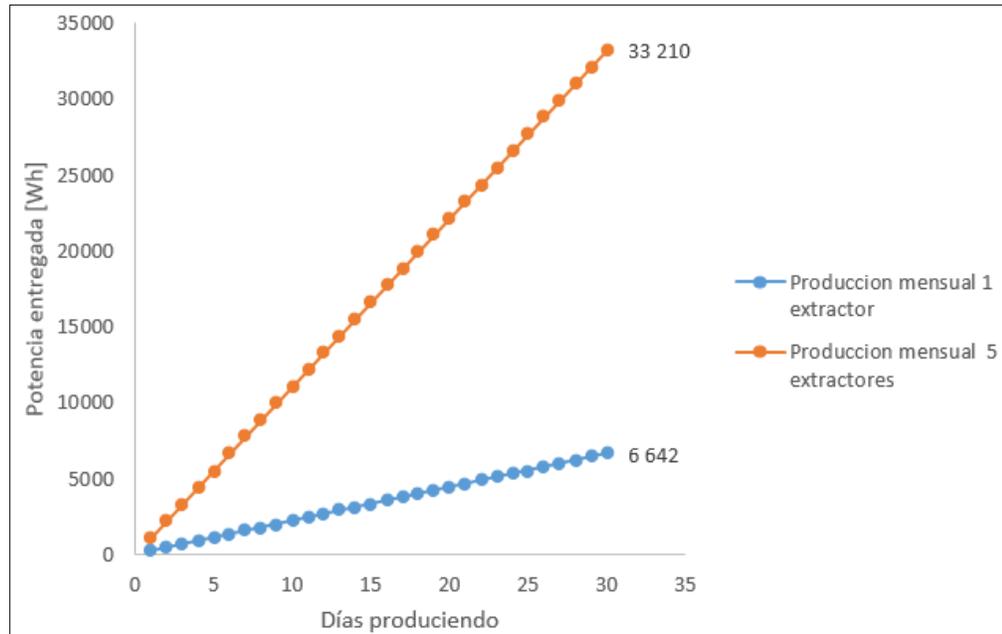


Fuente: elaboración propia.

Idealmente, el sistema entregará 221,4 Wh en circunstancias de conexión nominal y en etapa conex la cantidad de 126 Wh. Una versión mejorada, con extractores en paralelo, el valor funcional promedio en cinco extractores, dando 1 107 Wh en conexión nominal. Un análisis a través de un mes de trabajo ideal en etapa nominal (30 días) proporciona potencia de 6 642 watts o 6,64 kW por unidad y por trabajo en paralelo (5 extractores) de 33,20 kW.

La tarifa plana y sin recortes por parte de la CNEE es de 1,25 Q/KWh y el costo de producción por generación a gasolina por parte de generadores portátiles es de 5,25 Q/KWh (dependiendo del precio del combustible, calculado con un precio de Q 20 el galón), lo cual da un ahorro en el consumo según tabla XV.

Figura 56. Producción mensual de potencia



Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Ahorro mensual de generar por este sistema

Costo por parte de CNEE [Q/KWh]	Costo de generar por gasolina o gas [Q/kWh]	Potencia producida diaria [wh]	Días producidos	Extractores	Total potencia [KW]	Ahorro mensual ante CNEE [Q]	Ahorro mensual ante gas/gasolina [Q]
1,25	5,20	110,7	30	1	6,64	8,3	34,86
1,25	5,20	110,7	30	5	33,20	41,5	174,3

Fuente: elaboración propia.

El costo de generar de esta forma supondría un aporte de Q 8,3 mensual en generación eólica, limpia y libre de la utilización de energía generada localmente, por razón de un solo extractor de turbina y algo más interesante si en paralelo se trabaja con un compendio de 5 extractores, los cuales darían idealmente Q 41,50 en generación limpia y de ahorro.

Si se introduce el diseño como sustituto de una planta genérica portátil a base de gasolina de 1,5KW, comúnmente con costo de Q 1 800 en el mercado, el promedio de generación de estos sistemas es de Q 5,25 por KWh, 4 veces más caro en comparación a la red de CNEE. El ahorro energético entonces del diseño es de Q 34,86 por un aerogenerador y en paralelo con 5 extractores es de Q 174,3, tal ahorro dependerá de la subida o bajada de los precios de la gasolina o el gas.

## 9. UBICACIONES PILOTO DEL DISEÑO

Se evaluaron dos lugares piloto ubicados en el municipio de Villa Nueva, zona 6, las características y disposiciones son estudiadas en su parte térmica y vientos circundantes durante periodos de meses, así como los objetivos primordiales de utilización de los dos complejos. El primero de ellos será una instalación para fiestas infantiles, en donde se instalará una cocina industrial a la que se le colocará un extractor eólico de turbina para eliminar gases y calor, además de la instalación de luces de emergencia y de ayuda visual. El segundo complejo es una habitación de cómputo que presenta un excesivo confinamiento de calor y la necesidad de renovar el aire, así como tomas para carga de baterías de cámaras y *flashes* de fotografía.

La inclusión del sistema de restitución energética es un agregado interesante para los complejos, pues presenta una doble función, la extracción de aire caliente y la optimización de alguno de sus sistemas eléctricos de segunda categoría, como luces led y cargadores de aparatos electrónicos de bajo consumo.

### 9.1. Ubicación piloto: El Refugio

Siguiendo parámetros de sostenibilidad en edificios, se presentó la alternativa de instalación de extractores eólicos tipo turbina con restitución energética que permita utilizar al máximo la ventilación natural y reducir la carga energética en un sistema de soporte secundario, como cargadores eléctricos de bajo consumo y luces de emergencia, con el aporte de incluir un aerogenerador eólico de turbina a baja escala en el extractor.

De esta manera se esperan los siguientes resultados:

- Disminuir el consumo energético del complejo
- Aumento de la calidad ambiental de los espacios.
- Contribución a la educación ambiental al incentivar hábitos de ahorro energético dentro del lugar.

#### **9.1.1. Proyecto: El Refugio**

Instalar un extractor de turbina con aerogenerador a baja escala sobre un ventanal próximo a la cocina industrial del complejo recreativo El Refugio, ubicado en la 9 avenida 6-13, zona 6, Villa Nueva, Guatemala.

Sustentar el sistema de emergencia de luces y ayuda visual de salida de potencia 1 Watt (8 leds x 0,125 watts) por cabeza, interruptor de transferencia de estado sólido y una batería de respaldo de 90 minutos.

Figura 57. **Sistema de luces de emergencia y ayuda visual**



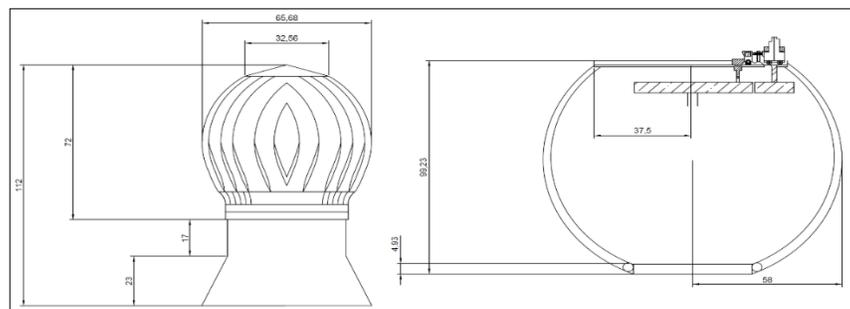
Fuente: *Amazon*. Amazon.com. [Consulta: octubre de 2015].

Figura 58. **El Refugio, Villa Nueva**



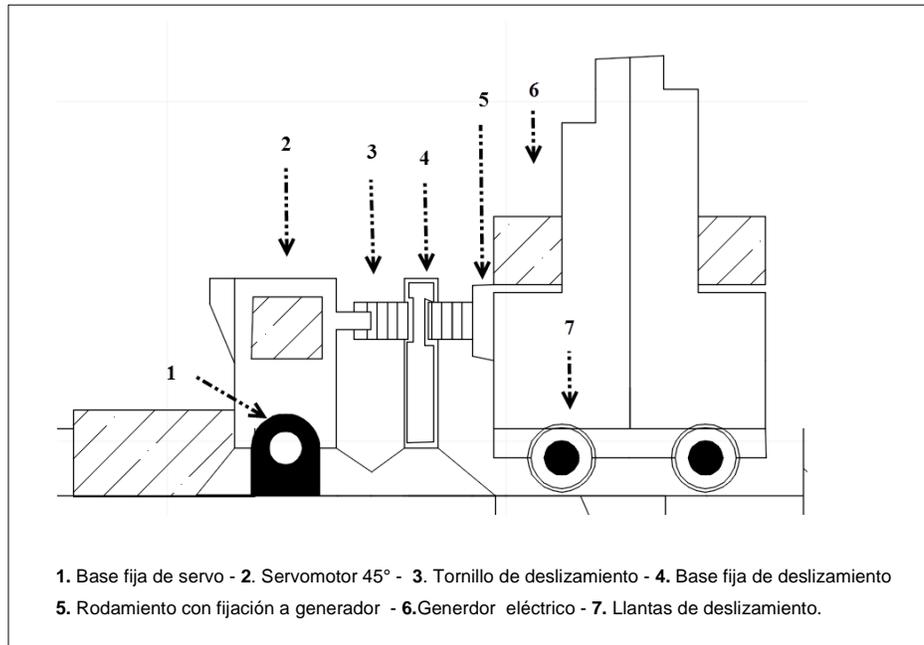
Fuente: elaboración propia, empleando PaintShop Pro.

Figura 59. **Extractor y estructura de acople**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

Figura 60. Sistema de control de potencia



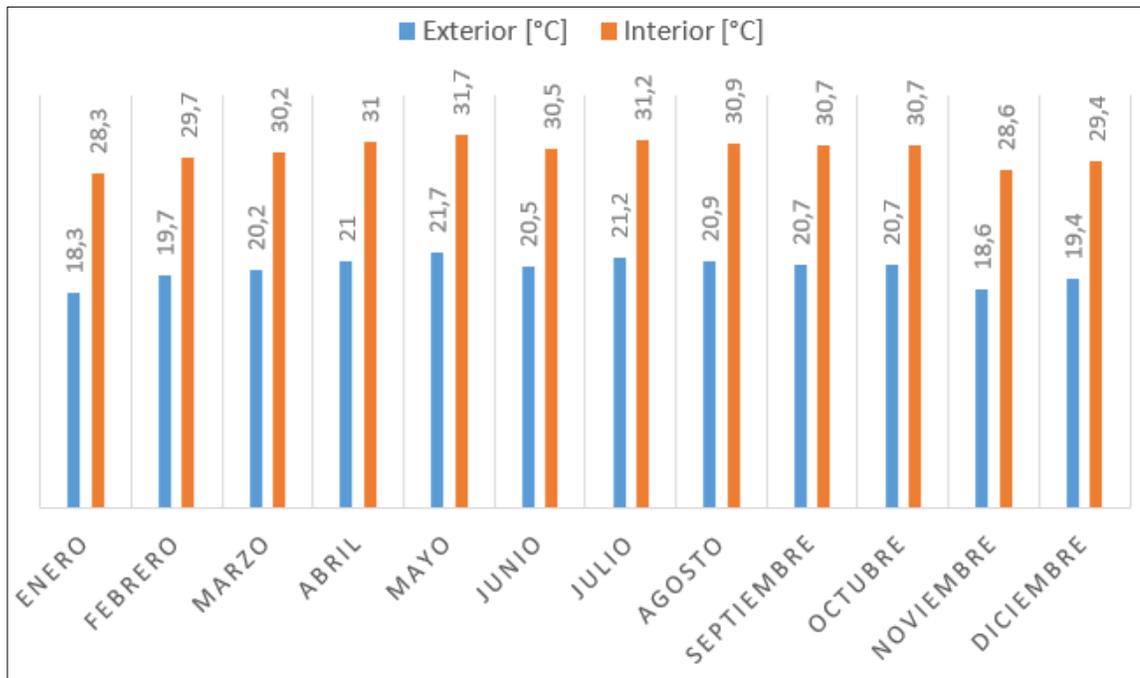
Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

### 9.1.2. Datos meteorológicos de la ubicación

Los datos climáticos de Villa Nueva obtenidos de la Municipalidad de Villa Nueva y el Insivumeh son: elevación de 1 330,24 metros sobre el nivel del mar, clima templado, con temperaturas máximas de 28 °C y mínimas de 12 °C, ubicado en la longitud 14°31'58,5"N 90°34'53,9"W.

Se tuvieron en cuenta para el estudio la temperatura ambiental, la temperatura generada por los equipos a instalarse y el viento. La temperatura media anual en Villa Nueva es de 23 °C, en los meses de febrero, marzo, julio y agosto se registran las temperaturas más altas durante el día alcanzando 27 °C y las más bajas en los mismos meses de 18 °C.

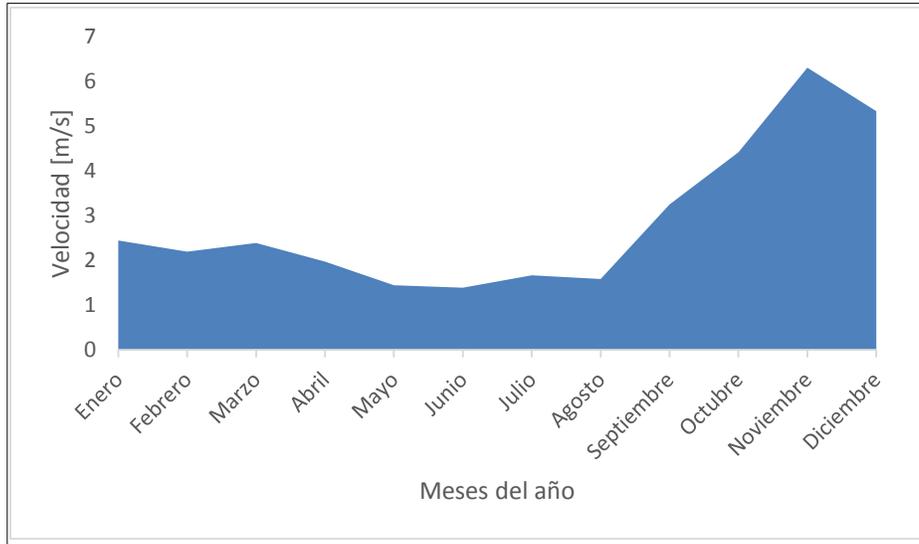
Figura 61. Temperatura máxima ambiente y en operación de la cocina



Fuente: elaboración propia.

El viento es un parámetro climático importante a la hora de cuantificar el consumo energético del edificio, debido a la posibilidad de infiltrarse al interior por las aperturas o ventanas y recombinar el aire fresco con el aire caliente interior, absorbiendo este último el extractor eólico de turbina y generando más movimientos.

Figura 62. **Velocidad promedio del viento en el año**



Fuente: elaboración propia.

### 9.1.3. **Sistema de extracción y ventilación en cocinas**

Sin importar el tipo de habitación a ocupar, es elemental que en todo momento se ofrezca una estancia agradable. Para alcanzar esta meta, la correcta aplicación de sistemas que garanticen una buena ventilación al interior del inmueble es fundamental. Uno de sus principales componentes es la campana, ya que ahí es donde comienza la extracción; después le siguen los ductos de extracción, los cuales, en caso de trabajar con grasa, deben ser de lámina negra soldada para evitar riesgos de incendios y fugas de grasa.

Otro elemento importante es el extractor, el cual debe evacuar todo el aire contaminado para que lo desfogue hacia el exterior. Aquí hay que considerar que para que el desfogue sea limpio y no ocasione charcos de grasa en las azoteas o fachadas, es elemental contar con los filtros adecuados. En las cocinas, los

sistemas de extracción tienen que estar totalmente balanceados, ya que toda la cantidad de aire que se extrae tiene que ser la misma de aire que se repone.

Componentes del sistema son:

- Campanas: donde comienza la extracción de vapores contaminados.
  - Ventiladores: máquinas que hacen mover el aire, al generar una presión.
  - Conducciones: donde circula el aire de una estancia a otra.
  - Extractores: evacuación del aire contaminado (vapores, malos olores y humo), genera presión en el interior del conducto.
  - Filtros: para detener las grasas.
  - Elementos de difusión: rejillas o bocas de entrada y salida de aire
- Accesorios: compuertas, mandos y reguladores.

La instalación del sistema de ventilación se hará con personal especializado, y solamente se instalará la parte del aerogenerador en el final del extractor.

#### **9.1.4. Principios de la ventilación natural**

Para estudiar el problema de movimiento del aire al interior de un local en términos aerodinámicos, es necesario poner en evidencia un principio físico del movimiento. La diferencia de presiones entre dos puntos determina un potencial de circulación de aire entre estos dos puntos, en el sentido de la presión más alta hacia la presión más baja. Las causas de estas variaciones de presión son de dos tipos: térmicas y dinámicas; las cuales actúan solas o combinadas. Por otra parte, pueden ser amplificadas o modificadas por algunos factores modificantes.

- Las causas térmicas: la diferencia de temperatura entre dos puntos ocasiona una variación de densidades del aire, con un gradiente de presión que es el origen de la circulación; entre más grande sea la diferencia de temperaturas, más velocidad tendrá la circulación.
- Las causas dinámicas: el viento que sopla sobre un volumen modifica el valor y la repartición de las presiones sobre las caras del mismo. Como regla general, la paredes situadas en frente al viento se encuentran en sobrepresión y las de la cara opuesta se encuentra en depresión. Es raro encontrar una distribución uniforme de valores en donde hayan diferencias de presión en las diferentes caras del volumen.
- Los factores modificantes: los movimientos de aire pueden ser modificados al interior de un volumen, por la orientación y la dimensión y la forma de las ventanas o entradas de aire. Para ventilar un espacio debe haber una entrada de aire y una salida. Este es el comportamiento del viento de acuerdo con el tamaño y ubicación de las ventanas o entradas de aire.

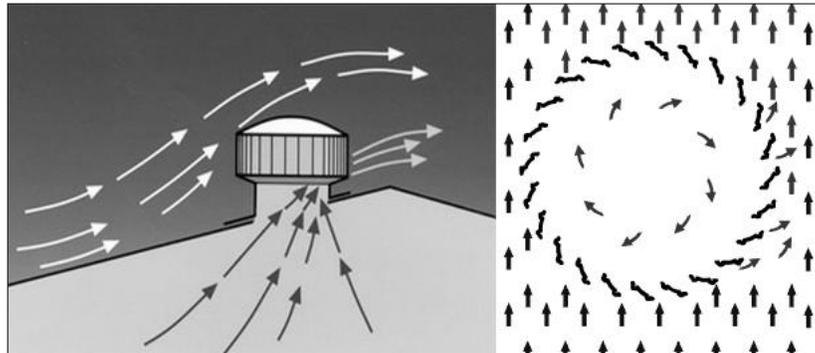
#### **9.1.5. Principio de generación de energía por medio eólico**

Los factores de temperatura y viento que ocasionan que el extractor de turbina genere movimiento rotatorio se basan en el principio de que un aire más caliente tenderá a subir a la superficie al extremo más alto del lugar y uno más frío permanecerá por debajo de este, produciendo un movimiento en el extractor por causa de la movilidad del aire caliente hacia afuera y por recombinación.

Este movimiento se reutiliza para instalar un aerogenerador, constituido por un generador que producirá energía por acción del movimiento giratorio y una

circuitería de control, la cual cargará una batería especial para su distribución posterior a una red eléctrica del complejo.

Figura 63. **Funcionamiento del extractor en condiciones de viento**



Fuente: *Atmospheric fan system.*

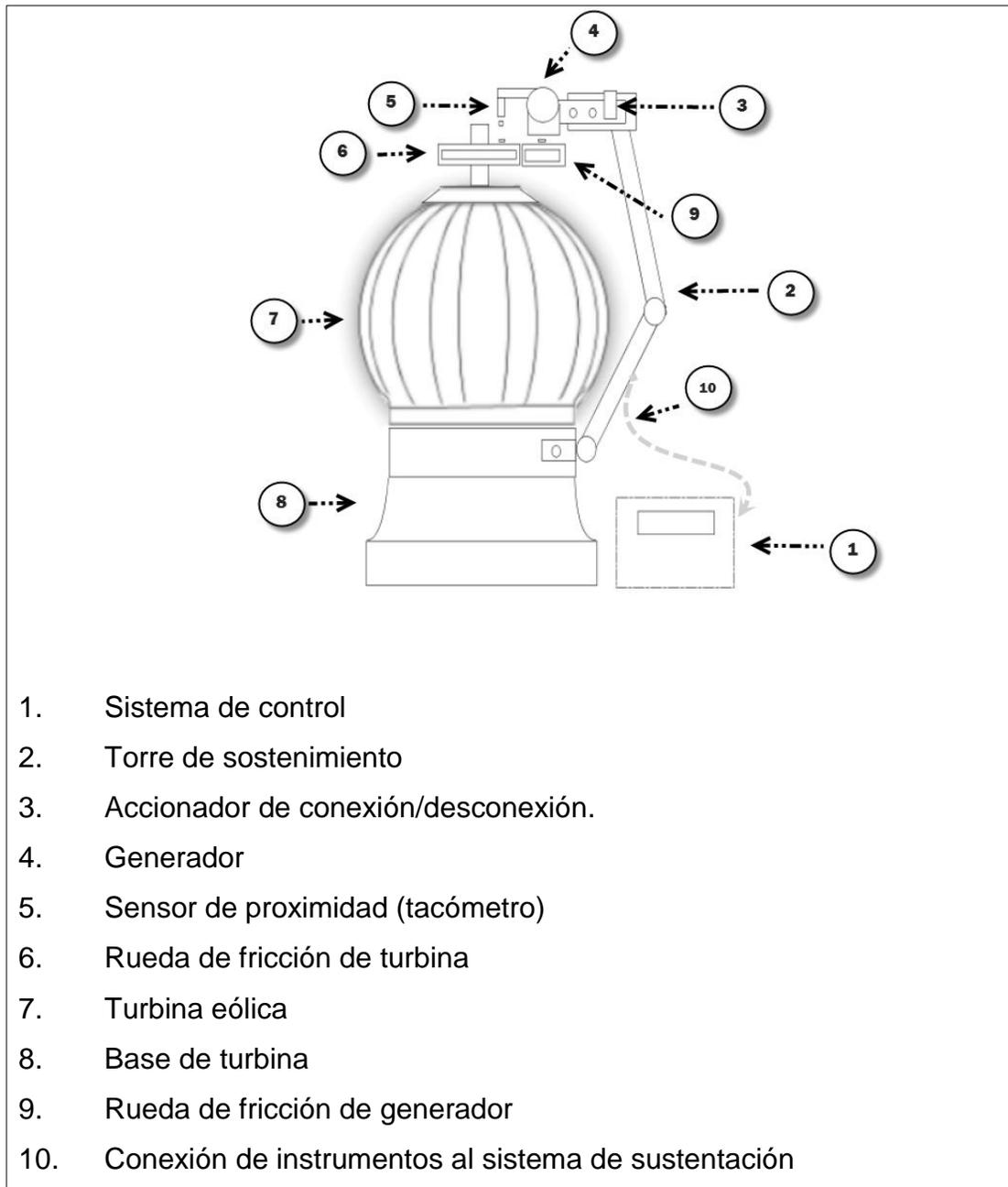
<http://galeon.hispavista.com/extractordecorreos/img/dynamics.jpg>. [Consulta: junio de 2015].

#### **9.1.6. Propuesta del aerogenerador de turbina**

Se propuso el diseño de un aerogenerador partiendo de un extractor atmosférico de la turbina de 0,46 m de diámetro en su parte baja, con base de instalación de 0,42 m de diámetro y 0,23 m de alto, con eje de acero de 0,019 m con rodamientos en base y parte alta de la turbina en el interior, igualmente un eje de acero de 0,019 m externo de 0,10 m de altura.

La instalación de los diferentes ductos y filtros la realizó personal especializado en ventilación, acoplado en su última fase el aerogenerador a la parte del extractor eólico de turbina, los componentes del diseño de aerogenerador a baja escala se describen en la figura 64.

Figura 64. **Sistema aerogenerador a baja escala en un extractor de turbina atmosférico**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk

Dicho diseño instalado en un extractor de 0,46 m de diámetro con una altura de 0,8 m a velocidades de viento de 10 m/s en promedio, proporcionará 75 watts de potencia, girando a 207 RPM. El análisis se hace con valores mínimos de aire y temperatura, pudiendo tener que analizar otros factores que contribuirán a la optimización (número de equipos, aislamiento termocerámico de la cubierta para lograr que la carga calórica producida por la cubierta no incida en el comportamiento de los equipos, entre otros).

Tabla XVI. **Potencia y revoluciones por minuto de turbina I**

Velocidad del viento	$M$	Potencia [W]	RPM	$\lambda$
2 m/s	0,7	32,17	83	1
10 m/s	0,7	160,86	415	1
12 m/s	0,7	193,04	498	1

Fuente: elaboración propia.

## 9.2. Ubicación piloto: oficina de cómputo

Siguiendo parámetros de sostenibilidad en edificios, se presentó la alternativa de instalación de extractores eólicos tipo turbina con restitución energética que permita utilizar al máximo la ventilación natural y reducir la carga energética en sistema de soporte secundario, como cargadores eléctricos de bajo consumo y luces de emergencia, con el aporte de incluir un aerogenerador eólico de turbina a baja escala en el extractor.

De esta manera se espera los siguientes resultados:

- Disminuir el consumo energético del complejo.
- Aumento de la calidad ambiental de los espacios.

- Contribución a la educación ambiental al incentivar hábitos de ahorro energético dentro del lugar.

### 9.2.1. Proyecto: oficina fresca

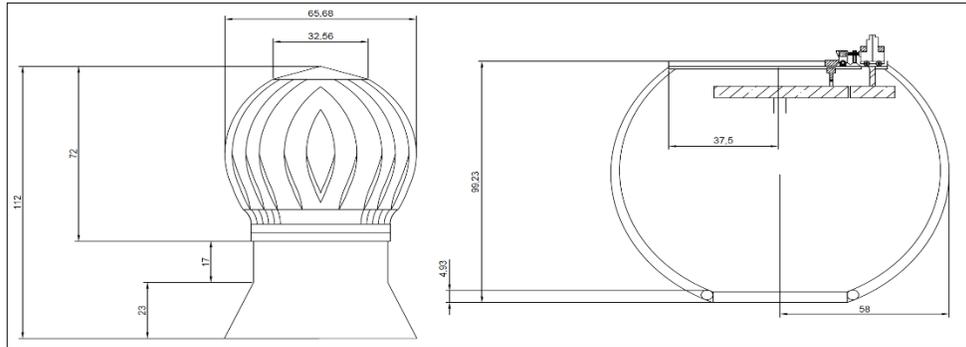
Instalar un extractor de turbina con aerogenerador a baja escala sobre ventanal próximo a la oficina de cómputo del complejo recreativo El Refugio, ubicado en la 9 avenida 6-13, zona 6, Villa Nueva, Guatemala.

Figura 65. Oficina de cómputo de El Refugio



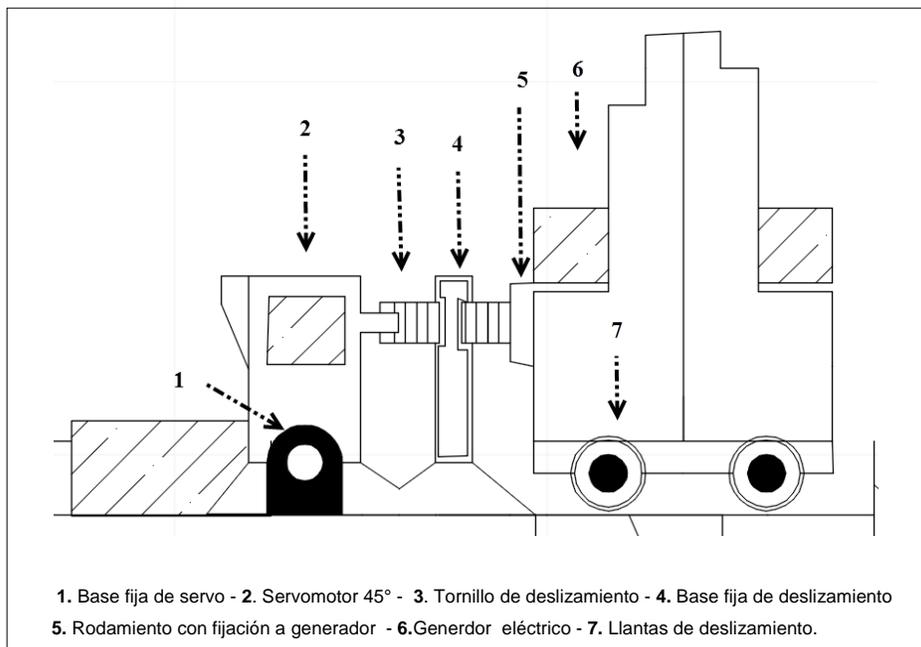
Fuente: elaboración propia, empleando PaintShop Pro.

Figura 66. **Extractor y estructura de acople**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

Figura 67. **Sistema de control de potencia**



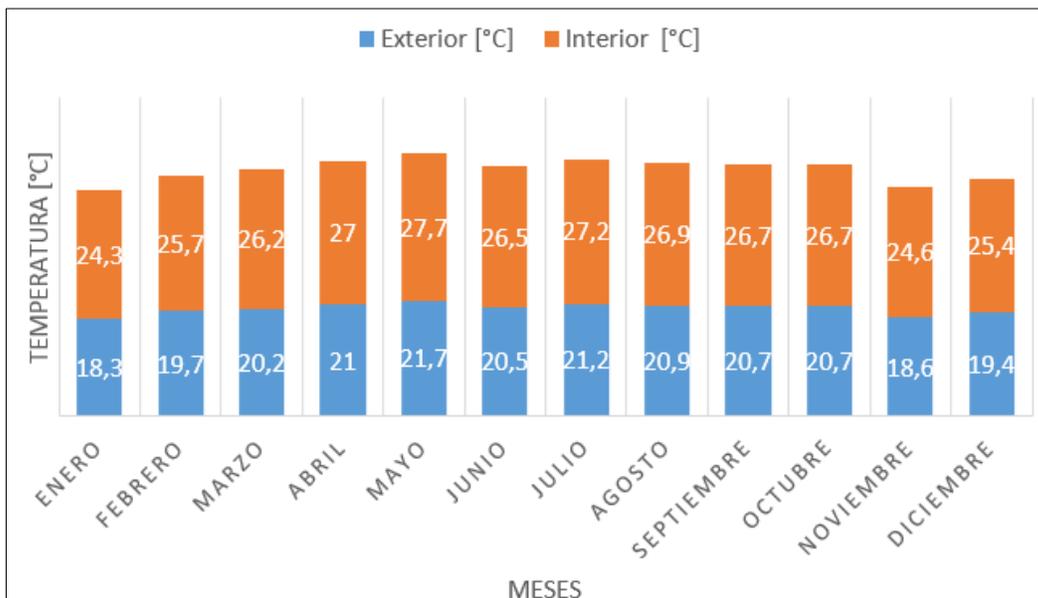
Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

### 9.2.2. Datos meteorológicos de la ubicación

Los datos climáticos de Villa Nueva obtenidos de la Municipalidad de Villa Nueva y el Insivumeh son: elevación de 1 330,24 metros sobre el nivel del mar, clima templado, alcanzando temperaturas máximas de 28 °C y mínimas de 12°C, con ubicación en la longitud 14°31'58,5"N 90°34'53,9"W.

Se tuvieron en cuenta, para el estudio la temperatura ambiental, la temperatura generada por los equipos a instalarse y el viento. La temperatura media anual en Villa Nueva es de 23 °C, donde los meses de febrero, marzo, julio y agosto cuando se registran las temperaturas más altas durante el día, alcanzando 27 °C, y las más bajas en los mismos meses de 18 °C.

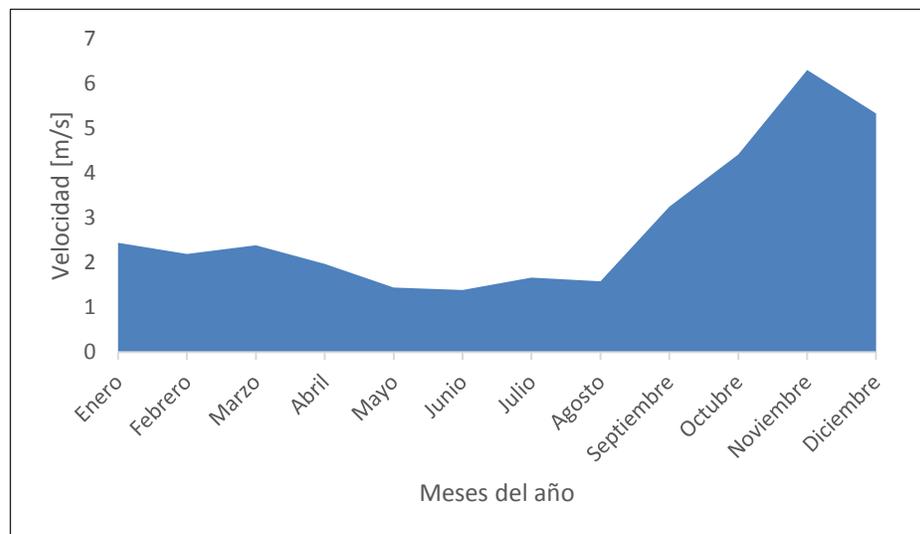
Figura 68. Temperatura promedio de la oficina



Fuente: elaboración propia.

El viento es un parámetro climático importante a la hora de cuantificar el consumo energético del edificio, debido a la posibilidad de infiltrarse al interior por las aperturas o ventanas y recombinar el aire fresco con el aire caliente interior, absorbiendo este último el extractor eólico de turbina y generando más movimientos.

Figura 69. **Velocidad promedio del viento en el año**



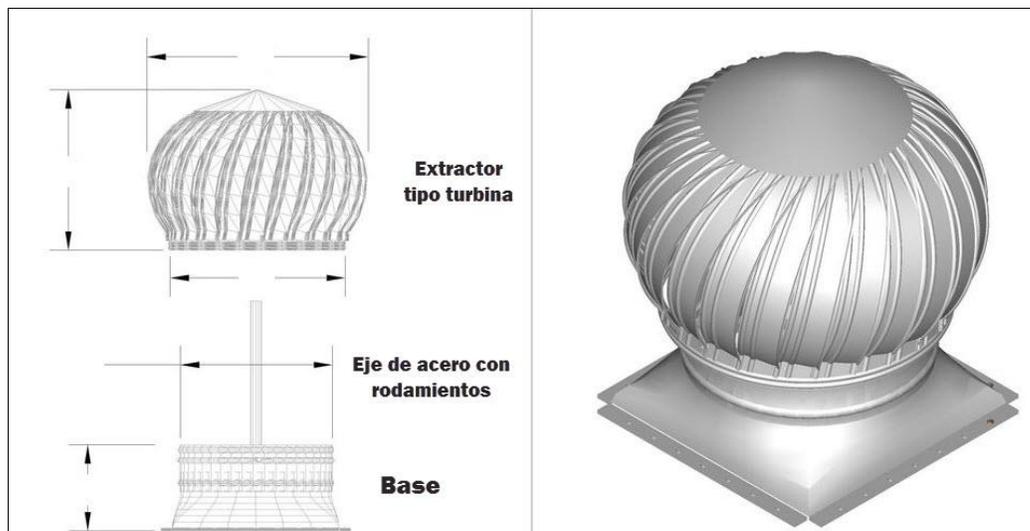
Fuente: elaboración propia.

### 9.2.3. Sistema de extracción y ventilación en oficina

Sin importar el tipo de habitación a ocupar es elemental que en todo momento se ofrezca una estancia agradable. Para alcanzar esta meta, la correcta aplicación de sistemas que garanticen una buena ventilación al interior del inmueble, es fundamental.

La correcta optimización del flujo de aire y temperatura se hace posible con extractores que en función a la optimización doble, generar ambiente fresco y una alternativa eléctrica adicional, se realiza con el denominado extractor de turbina eólico. Las medidas de la oficina son 2,2 m X 3 m, recomendando el fabricante una turbina eólica de 18" con conducto cuadrado.

Figura 70. **Extractor de turbina eólica**



Fuente: *Ventiladores industriales*. <http://www.ventiladoresindustriales.com.mx/>.

[Consulta: julio de 2015].

Se instaló el ducto en la parte superior de la ventana, donde, por la entrada de aire inferior y la puerta se creará el sistema de recombinación térmica y por aire. El extractor de turbina es un sistema mecánico que funciona haciendo rotar la turbina por el fenómeno físico de chimenea de evacuación de fluidos, generado por los gradientes de presión y las diferencias de temperatura entre una y otra zona de la edificación y entre el exterior y el interior del mismo.

En la parte exterior, la acción del viento le pega a las aletas de la turbina en forma permanente 360 grados, no importando la dirección del viento, esa acción la hace rotar aún más, aumentando la presión negativa que succiona los gases interiores de la edificación, expulsándolos al exterior. El volumen de aire a extraer está condicionado a la velocidad del viento, la orientación del edificio, el diseño, y la existencia de obstáculos en las proximidades del mismo.

El extractor de turbina permanentemente succiona hacia fuera el aire caliente acumulado debajo de la cubierta, el cual es compensado de manera natural mediante la entrada de aire fresco a través de las ventanas ubicadas estratégicamente en los estratos más bajos de la edificación. Este proceso, técnicamente dirigido, genera un nivel de circulación de aire dentro del recinto que garantiza la correcta ventilación del mismo.

Esta es la forma en que trabaja un sistema de ventilación apropiado, permitiéndole deshacerse del calor, la humedad, vapores, polución y olores acumulados al interior de su edificio. La capacidad máxima de extracción de todo sistema de ventilación está dada en función del equilibrio entre los caudales de entrada y salida de aire al edificio. Es decir, la capacidad de extracción del sistema deber poder ser compensada.

#### **9.2.4. Principios de la ventilación natural**

Para estudiar el problema de movimiento del aire al interior de un local en términos aerodinámicos, es necesario poner en evidencia un principio físico del movimiento. La diferencia de presiones entre dos puntos determina un potencial de circulación de aire entre estos dos puntos, en el sentido de la presión más alta hacia la presión más baja. Las causas de estas variaciones de presión son de

dos tipos: térmicas y dinámicas; las cuales actúan solas o combinadas. Por otra parte, pueden ser amplificadas o modificadas por algunos factores modificantes.

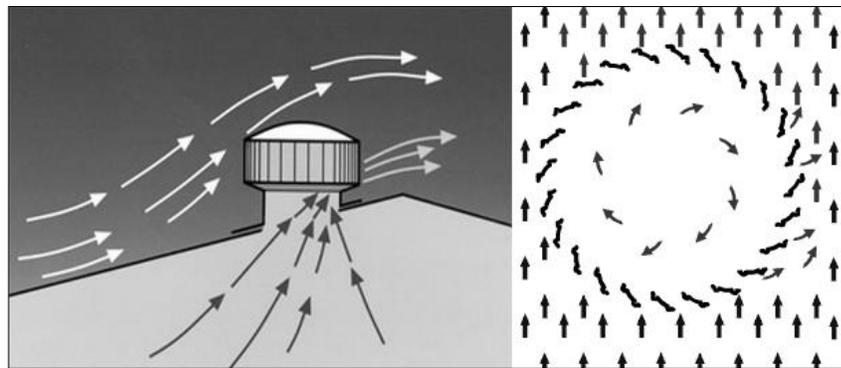
- Las causas térmicas: la diferencia de temperatura entre dos puntos ocasiona una variación de densidades del aire, con un gradiente de presión que es el origen de la circulación; entre más grande sea la diferencia de temperaturas, más velocidad tendrá la circulación.
- Las causas dinámicas: el viento que sopla sobre un volumen modifica el valor y la repartición de las presiones sobre las caras del mismo. Como regla general, la paredes situadas en frente al viento se encuentran en sobrepresión y las de la cara opuesta se encuentra en depresión. Es raro encontrar una distribución uniforme de valores en donde hayan diferencias de presión en las diferentes caras del volumen.
- Los factores modificantes: los movimientos de aire pueden ser modificados al interior de un volumen, por la orientación y la dimensión y la forma de las ventanas o entradas de aire. Para ventilar un espacio debe haber una entrada de aire y una salida. Este es el comportamiento del viento de acuerdo con el tamaño y ubicación de las ventanas o entradas de aire.

#### **9.2.5. Principio de generación de energía por medio eólico**

Los factores de temperatura y viento que ocasionan que el extractor de turbina genere movimiento rotatorio se basan en el principio de que un aire más caliente tenderá a subir a la superficie al extremo más alto del lugar y uno más frío permanecerá por debajo de este, produciendo un movimiento en el extractor por causa de la movilidad del aire caliente hacia afuera y por recombinación.

Este movimiento se reutiliza para instalar un aerogenerador, constituido por un generador que producirá energía por acción del movimiento giratorio y una circuitería de control, la cual cargará una batería especial para su distribución posterior a una red eléctrica del complejo.

Figura 71. **Funcionamiento del extractor en condiciones de viento**



Fuente: *Atmospheric fan system.*

<http://galeon.hispavista.com/extractordecorreos/img/dynamics.jpg>. [Consulta: junio de 2015].

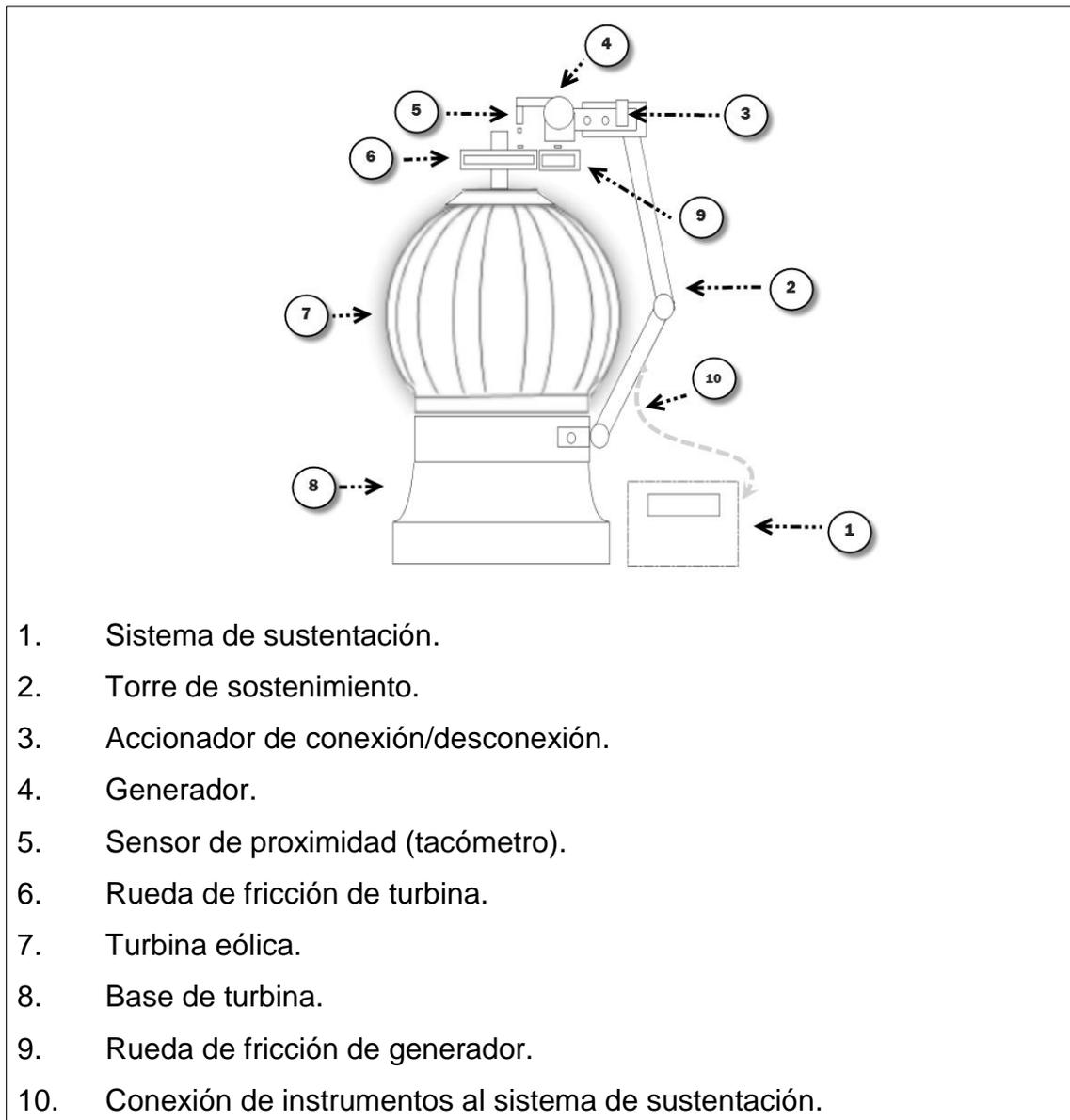
### **9.2.6. Propuesta del aerogenerador de turbina**

Se propuso el diseño de un aerogenerador partiendo de un extractor atmosférico de la turbina de 0,46 m de diámetro en su parte baja, con base de instalación de 0,42 m de diámetro y 0,23 m de alto, con eje de acero de 0,019 m con rodamientos en base y parte alta de la turbina en el interior, igualmente un eje de acero de 0,019 m externo de 0,10 m de altura.

La instalación de los diferentes ductos y filtros la realizó personal especializado en ventilación, acoplado en su última fase el aerogenerador a la

parte del extractor eólico de turbina, los componentes del diseño de aerogenerador a baja escala se describen en la figura 72.

Figura 72. **Sistema aerogenerador a baja escala en un extractor de turbina atmosférico**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

Dicho diseño instalado en un extractor de 0,46 m de diametro con una altura de 0,8 m a velocidades de viento de 10 m/s en promedio, proporcionará 75 watts de potencia, girando a 207 RPM. El análisis se hace con valores mínimos de aire y temperatura, pudiendo tener que analizar otros factores que contribuirán a la optimización (número de equipos, aislamiento termocerámico de la cubierta para lograr que la carga calórica producida por la cubierta no incida en el comportamiento de los equipos, entre otros).

Tabla XVII. **Potencia y revoluciones por minuto de turbina II**

<b>Velocidad del viento</b>	<b><i>M</i></b>	<b>Potencia [W]</b>	<b>RPM</b>	<b><math>\lambda</math></b>
<b>2 m/s</b>	0,7	32,17	83	1
<b>10 m/s</b>	0,7	160,86	415	1
<b>12 m/s</b>	0,7	193,04	498	1

Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. El diseño del sistema aerogenerador por acoplamiento a un extractor atmosférico eólico se mantuvo a menos del 20 % de pérdidas de extracción. Con velocidades mayores a 5 m/s (mínimo para conexión), el caudal de un extractor de 0,46 m. de diámetro estaría intercambiando aire a razón de 2 400 m<sup>3</sup>/h. El aerogenerador en conexión representó una carga adicional mecánica de giro con pérdidas menores a los 480 m<sup>3</sup> (20 %).
2. El generador transformó en el máximo desempeño de la turbina, el 70 % de la energía mecánica producida por extracción en potencia eléctrica útil para distribución, tomando en cuenta la inclusión de una transmisión 1:3 que contribuyó a la optimización de las revoluciones presentes en el sistema.

Tabla XVIII. **Potencia y revoluciones por minuto de turbina III**

Velocidad del viento	<i>M</i>	Potencia [W]	RPM	$\lambda$
2 m/s	0,7	32,17	83	1
10 m/s	0,7	160,86	415	1
12 m/s	0,7	193,04	498	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Características del generador**

<b>Modelo</b>	<b>Clase</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Potencia [W]</b>	<b>Deslizamiento [%]</b>	<b>RPM</b>	<b>Resistencia [Ω]</b>
<b>Genérico</b>	Asíncrono	120	35	22	3 600	175

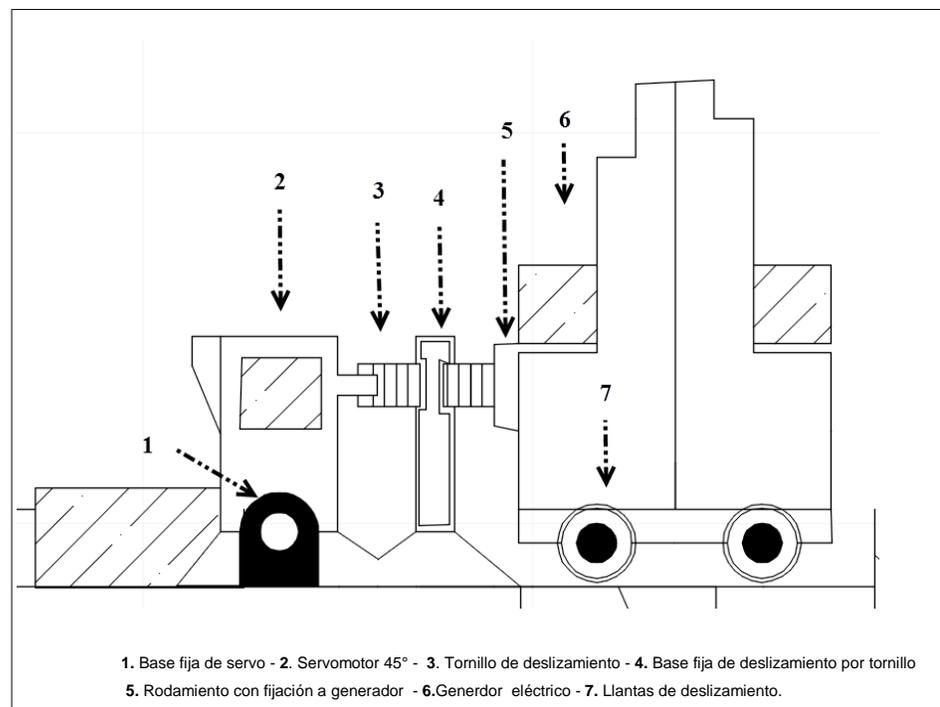
Fuente: elaboración propia.

Las RPM máximas del extractor a 12 m/s es de 498, por lo cual en la trasmisión 1:3 existió una subida de 1 494 RPM pero partiendo del dato técnico del generador con RPM 3 600, el generador no realizó más que el 34 % de su trabajo de conversión.

3. La conexión indirecta en la salida del generador aseguró la linealidad de la potencia entregada a la carga, minimizando las fluctuaciones en frecuencia del generador, por causa de las diferentes velocidades entre trasmisiones en el proceso mecánico de extracción.
  
4. La generación de energía es posible, dando resultados significativos de potencia entregada mayor a 6,64 kilowatt mensual por turbina, significando una fuente renovable de conversión de energía.

5. El sistema de control de conexión, el cual era el encargado de censar la velocidad de la turbina y desconectar el sistema mecánico de potencia del generador al extractor, funcionó de manera adecuada. El freno por solenoide y su etapa de control fueron un sistema redundante para el diseño, debido a que, al poseer un eje móvil controlado por un mecanismo de sujeción por tornillo (parte 4 del sistema mecánico de potencia), la estabilidad hace que no se despeguen los ejes transmisores, contribuyendo a tener un respaldo de estabilidad al sistema de conexión.

Figura 73. **Sistema mecánico de potencia**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk.

6. Potencias mayores a 200 Wh diarios no son posibles por factores estructurales del extractor, que limitan en gran medida el incremento de velocidades mayores a los 15 m/s, repercutiendo en la eficiencia del generador.
7. El factor 1:3 entre transmisiones aseguró al sistema velocidades de conexión más largas en momentos de bajo flujo de extracción y mayores índices de generación en el rango nominal (>8 m/s).
8. La naturaleza errática del extractor eólico de no presentar energía mecánica utilizable ante la ausencia de viento o diferencia de temperaturas menores a los 280 °K generó muchos lapsos, durante los cuales el aerogenerador no obtuvo energía y por consiguiente pérdidas por desconexión del 67 %.
9. Los costos de producir energía, por el sistema diseñado, presenta un bajo índice de desempeño si las condiciones del extractor no son en entornos con temperaturas altas (fábricas, sala de máquinas, entre otros) o con diferencias mayores del 280 °K.
10. El ahorro energético por parte del diseño ante el costo por kilowatt hora que distribuye la CNEE es relativamente bajo (Q 8 mensual) pero 4 veces más ahorrativo en sistemas generadores a base de gasolina o gas (Q 32 mensual). La fuerza disponible del extractor no posee suficiente capacidad para competir con el mercado actual de explotación energética, únicamente puede calificarse como una fuente ecológica de generación.

11. Es posible la implementación del diseño, siempre que cumpla con que sea instalado en sectores donde la distribución local de energía eléctrica no sea de fácil acceso y donde exista mal flujo de intercambio térmico por ventilación (fábricas, casas, entre otros).



## RECOMENDACIONES

1. Extender los estudios expuestos para incluir un generador trifásico en beneficio de elevar el sistema para obtener más energía por vuelta del extractor, evitando incluir cargas que comprometan el desempeño de extracción de aire.
2. Trabajar en mejorar el modelo de transmisión entre extractor y generador determinando una razón menor de variación de fuerza de contacto y no superar la pérdida de extracción ya propuesta.
3. Estudiar la posibilidad de apoyar el sistema de generación en la etapa de desconexión con células fotovoltaicas en la misma estructura de soporte del sistema aerogenerador, asegurando el flujo continuo de potencia entregada al acumulador.
4. Analizar con mayor detenimiento el diseño de un nuevo generador híbrido que utiliza la parte baja de la base del extractor como rotor magnético y un estator fijo inducido o embobinado rodeando la estructura para tener generador con área más grande y con menos fricciones.



## BIBLIOGRAFÍA

1. *Baterías para sistemas solares y eólicos*. [en línea]. <<http://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>>. [Consulta: octubre de 2015].
2. BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. *Electrónica teoría de circuitos*. 5a ed. México: Prentice Hall, 1994. 916 p. ISBN: 968-880-347-2
3. EDMINISTER, Joseph A. *Circuitos electrónicos*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1988. 305 p. ISBN: 968-422-885-6
4. *Energía atmosférica*. [en línea]. <<http://www.extractores.com.mx/energia%20atmosferica.htm>>. [Consulta: junio de 2015].
5. *Extractor de turbina*. [en línea]. <[http://igm.mex.tl/659428\\_TURBINA-30.html](http://igm.mex.tl/659428_TURBINA-30.html)>. [Consulta: marzo de 2015].
6. *Extractor eólico – extractor wind*. [en línea]. <<http://energyplusecogreen.webnode.es/products/producto-2/>>. [Consulta: junio de 2015].
7. FERNANDEZ, Adrián; DUNG, Dang. *Getting started with the MSP430 launchpad*. Inglaterra: Elsevier Science Technology, 2013. 185 p. ISBN: 978-0-12-411588-0

8. *Generadores de turbinas eólicas*. [en línea]. < [http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/electric.htm](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/electric.htm) >. [Consulta: febrero de 2015].
9. GOLNARAGHI, Farid; KUO, Benjamín. *Automatic control systems*. 9a ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 944 p. ISBN: 978-0470-04896-2
10. KUO, Benjamín. *Sistemas de control automático*. 7a ed. México: Prentice Hall, 1996. 897 p. ISBN: 968-880-723-0
11. *Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable*. [en línea]. <<http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Decreto-y-Acuerdo-Gubernativo.pdf>>. [Consulta. agosto de 2015].
12. LITOVSKY, Gustavo. *Beginning microcontrollers with the MSP430*. Versión 0.2. [en línea]. <[http://www.essp.utdallas.edu/uploads/CE4370/Fall10/Tutorialv0\\_2.pdf](http://www.essp.utdallas.edu/uploads/CE4370/Fall10/Tutorialv0_2.pdf) >. [Consulta: junio de 2015].
13. *Manual de referencia sobre la energía eólica*. [en línea]. <[http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/units.htm](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/stat/units.htm) >. [Consulta: junio de 2015].
14. *Mapa de densidad de viento a 50 m de altura y centrales generadoras eólicas*. [en línea]. < <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Mapa-e%C3%B3lico1.pdf> >. [Consulta: agosto de 2015].

15. *Mecanismos*. [en línea]. < <http://www.aulatecnologia.com/ESO/SEGUNDO/teoria/mecanismos/mecanismos.htm> >. [Consulta: julio de 2015].
16. *MSP-EXP430G2 LaunchPad Evaluation Kit*. [en línea]. < <http://www.ti.com/lit/ug/slau318f/slau318f.pdf> >. [Consulta: enero de 2015].
17. *OPB606A reflective object sensor data sheet*. [en línea]. <<http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1872628.pdf>>[Consulta: junio de 2015].
18. *¿Qué es el extractor atmosférico?*. [en línea]. < <http://www.extractores.com.mx/atmosfericos.htm#sthash.lje6wb4n.43a0XoUn.dpbs> >. [Consulta: marzo de 2015].
19. *Resumen mediciones del viento en Guatemala hasta el 2014*. [en línea]. <<http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Resumen-de-Mediciones-de-viento-en-Guatemala-hasta-el-2014.pdf> >. [Consulta: agosto de 2015].
20. SÁNCHEZ, Myriam. *Sistemas de extracción y ventilación en restaurantes*. [en línea]. <<http://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2013/05/sistemas-de-extraccion-y-ventilacion-en-restaurantes/> >. [Consulta: agosto de 2015].
21. *SH-T2551L, 12V pull type solenoid 10 watts*. [en línea]. <<http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2196748.pdf> >. [Consulta: agosto de 2015].

22. *Ubicación geográfica de Villa Nueva.* [en línea].  
<<http://www.villanueva.gob.gt/ubicacion-geografica-villanueva-guatemala>>. [Consulta: octubre de 2015].
  
23. VELASQUEZ, Fernando. *Aprovechamiento de la energía eólica combinada con otras fuentes de energía renovable en san José Pinula municipio de Guatemala.* [en línea].  
<[www.biblioteca.usac.edu.gt/graduación/08/08\\_0778\\_EA.pdf](http://www.biblioteca.usac.edu.gt/graduación/08/08_0778_EA.pdf)>. [Consulta: julio de 2015].