

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA PARA PROVISIÓN DE  
AGUA A LA BASE ECUATORIANA PEDRO VICENTE MALDONADO  
DE LA ANTÁRTICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO  
PARA EL CEINCI-ESPE”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**CARLOS EDUARDO SERRANO MOYA**

**RICARDO DAVID VACA VIRACUCHA**

**DIRECTOR: ING ROBERTO GUTIERREZ**

**CODIRECTOR: DR. ALFONSO TIERRA**

**Sangolquí, 2013-06-05**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA PARA PROVISIÓN DE AGUA A LA BASE ECUATORIANA PEDRO VICENTE MALDONADO DE LA ANTÁRTICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CEINCI-ESPE” fue realizado en su totalidad por Carlos Eduardo Serrano Moya y Ricardo David Vaca Viracucha, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

**Ing. Roberto Gutiérrez**

**DIRECTOR**

---

**Dr. Alfonso Tierra**

**COORDIRECTOR**

**Sangolquí, 2013-06-05**

# **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA PARA PROVISIÓN DE AGUA A LA BASE ECUATORIANA PEDRO VICENTE MALDONADO DE LA ANTÁRTICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CEINCI-ESPE”

ELABORADO POR:

---

Carlos Eduardo Serrano Moya

---

Ricardo David Vaca Viracucha

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

**Ing. Ángelo Villavicencio S.**

**DIRECTOR DE LA CARRERA DE ING. MECÁNICA**

**Sangolquí, 2013-06-05**

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIZACIÓN**

**NOSOTROS, CARLOS EDUARDO SERRANO MOYA Y RICARDO  
DAVID VACA VIRACUCHA**

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado “**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA PROVISIÓN DE AGUA A LA BASE ECUATORIANA PEDRO VICENTE MALDONADO DE LA ANTÁRTICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL CEINCI-ESPE.**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 10 de Junio del 2013.

---

Carlos Eduardo Serrano Moya

C.I.: 171664145-9

---

Ricardo David Vaca Viracucha

C.I.: 171947859-4

## **DEDICATORIA**

A mi Abuelita Rebeca que desde el cielo estará alegre de mí, A mis padres, Abuelito Carlos, Hermanos, y Sobrinos que con sus consejos y apoyo me supieron guiar por el camino correcto, quienes me han otorgado la fuerza y sabiduría para seguir adelante.

CARLOS EDUARDO SERRANO MOYA

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la dicha de tener a mis padres que me han dado la vida y junto a ella personas que me han enseñado las bondades de la misma.

A toda mi familia que me ha ayudado a madurar y superar los momentos difíciles que se han presentado.

A mis abuelitos, los cuales siempre estuvieron presentes en mi vida y esperando una gratificante respuesta de mí.

A mis amigos por mostrar un apoyo incondicional en mi felicidad y tristeza.

Y a la vida que cada día me da la oportunidad de enmendar mis errores pasados.

**RICARDO DAVID VACA VIRACUCHA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de culminar el primero de mis sueños por darme la bendición de tener el apoyo incondicional de mis Padres Carmen y Bolívar para lograr el objetivo planteado hace algunos años y a todas y cada una de las personas que intervinieron en la elaboración del proyecto.

Agradezco a Gaby, Juan, Holger, Rubén, Iván que en el día a día supieron darme el apoyo incondicional a lo largo de la culminación del proyecto.

CARLOS EDUARDO SERRANO MOYA

Agradezco en forma total a mis padres, los cuales estuvieron siempre pendientes y me dieron el apoyo para que se llegue a la culminación de este proyecto, el cual será la guía en mi carrera profesional.

RICARDO DAVID VACA VIRACUCHA

# INDICE GENERAL

AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	vi
INDICE GENERAL.....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	xiii
INDICE DE TABLAS.....	xvi
NOMENCLATURA.....	xvii
LISTA DE ANEXOS .....	xxii
INTRODUCCION Y RESUMEN.....	xxiii

## **CAPÍTULO 1**

### GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2.DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3.OBJETIVOS.....	2
1.3.1.GENERAL.....	2
1.3.2.ESPECÍFICOS.....	3
1.4.ALCANCE DEL PROYECTO .....	3
1.5.JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3

## **CAPÍTULO 2**

### MARCO TEÓRICO

2.1. ENERGIAS RENOVABLES .....	5
--------------------------------	---

2.1.1. EL COLECTOR SOLAR.....	6
2.1.2. CÉLULAS SOLARES.....	7
2.1.3. ENERGÍA MAREOMOTRIZ.....	8
2.1.4. ENERGÍA EÓLICA.....	9
2.1.5. BIOMASA.....	11
2.2. COMPORTAMIENTO DEL HIELO EN LA ANTÁRTICA.....	11
2.2.1. LOS HIELOS.....	12
2.2.2. EL HIELO MARINO.....	13
2.2.3. TÉMPANOS.....	13
2.2.4. EL CLIMA ANTÁRTICO.....	14
2.3. ENERGIA PRODUCIDA POR AEROGENERADORES.....	15
2.3.1. LA ENERGÍA DEL VIENTO.....	16
2.3.2. LA FUERZA DEL VIENTO.....	17
2.3.3. MÁXIMA POTENCIA EXTRAÍBLE DEL VIENTO.....	18
2.3.4. EL ROTOR.....	18
2.4. SISTEMA DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.....	19
2.5. GENERADORES ELÉCTRICOS.....	22
2.5.1. FUERZA ELECTROMOTRIZ DE UN GENERADOR.....	23
2.5.2. TIPOS DE GENERADORES.....	23
2.5.2.1. Generadores de corriente continúa.....	25
2.5.2.2. Generadores de corriente alterna.....	27
2.5.3. TIPOS MÁS IMPORTANTES DE CENTRALES GENERADORAS.....	29
2.6. PILAS DE HIDRÓGENO.....	30
2.6.1. FUNCIONAMIENTO.....	31
2.6.2. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	32
2.6.2.1. Ácido fosfórico (PAFC).....	32

2.6.2.2. Polímero sólido (PEM) .....	33
2.6.2.3. Carbonato fundido (MCFC) .....	33
2.6.2.4. Oxido sólido (SOFC) .....	33
2.6.2.5. Alcalinas.....	34
2.6.3. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	34
2.6.3.1. Producción de hidrógeno a partir de energía solar .....	34
2.6.3.2. Producción de hidrógeno a partir de metano (ch4): .....	34

### **CAPÍTULO 3**

#### ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONALIDAD .....	36
3.2. PARÁMETROS PARA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS .....	36
3.3. ALTERNATIVAS A UTILIZAR.....	37
3.3.1. GENERADORES ELÉCTRICOS .....	38
3.3.2. MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	38
3.3.3. ENERGÍAS ALTERNATIVAS.....	38
3.3.3.1. Energía eólica .....	38
3.3.3.2. Energía solar.....	39
3.3.3.3. Biomasa .....	39
3.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	39
3.4.1. MATRIZ DE PONDERACIÓN .....	39
3.4.2. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS .....	41
3.4.3. ESPECIFICACIONES DE LA SOLUCIÓN .....	41

### **CAPÍTULO 4**

#### DISEÑO DEL SISTEMA

4.1 PROPÓSITO.....	42
4.2. DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.....	42
4.2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO .....	42
4.2.2. FACTOR DE SEGURIDAD .....	43
4.2.3 ESQUEMA DE LA MÁQUINA .....	43
4.3. DISEÑO DEL SISTEMA.....	45
4.3.1. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO .....	45
4.3.2. CÁLCULOS DE ENERGÍA REQUERIDA. ....	45
4.3.3. CÁLCULOS SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA .....	50
4.3.3.1. Diseño y cálculos del alternador .....	50
4.3.4. REDISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE.....	54
4.4. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO.....	63

## **CAPÍTULO 5**

### DISEÑO DEL PROTOTIPO

5.1. DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO .....	64
5.1.1. PARÁMETROS DE DISEÑO .....	64
5.1.2. FACTOR DE SEGURIDAD .....	65
5.2. DISEÑO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL.....	66
5.3. DISEÑO ENERGÉTICO.....	66
5.3.1. TEORÍA DE GENERADORES EÓLICOS .....	68
5.3.1.1. Tipos de turbinas eólicas .....	68
5.3.1.1.1. Maquinas eólicas de eje horizontal .....	70
5.3.1.1.2. Maquinas eólicas de eje vertical .....	70
5.3.2. ALTERNATIVA SELECCIONADA.....	71
5.3.3. DISEÑO DEL GENERADOR SAVONIUS .....	72

5.4. DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	75
5.4.1. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE.....	75
5.4.2. DISEÑO Y CALCULO DE ALABES .....	87
5.5. DIAGRAMA DE PROCESOS.....	104
5.6. PLANOS DE COSNTRUCCIÓN .....	110
5.7. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO.....	110

## **CAPÍTULO 6**

### PRUEBAS DE OPERACIÓN

6.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES .....	111
6.2 PLAN DE PRUEBAS DE CAMPO.....	111
6.2.1 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	111
6.2.2 DETALLE DEL PLAN DE PRUEBAS.....	117
6.2.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	118
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	119

## **CAPITULO 7**

### ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

7.1.EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	126
7.1.1.COSTOS DIRECTOS .....	126
7.1.1.1 Costos de materiales directos .....	126
7.1.1.2.Costo de servicios.....	126
7.1.1.3.Costo de mano de obra directa .....	126
7.1.1.4.Costo de diseño .....	127
7.1.2.COSTOS INDIRECTOS .....	127
7.1.2.1.Costos de materiales indirectos .....	127

7.1.2.2.Otros costos indirectos.....	127
7.1.3.COSTOS DE LA MÁQUINA.....	127
7.2.EVALUACIÓN FINANCIERA .....	130
7.2.1.VALOR ACTUAL NETO (VAN).....	131
7.2.1.1.Cálculo de BNt.....	132
7.2.2.TASA INTERNA DE RETORNO (TIR).....	133

## **CAPITULO 8**

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES .....	135
8.2. RECOMENDACIONES .....	136
8.3. BIBLIOGRAFÍA .....	137

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Colector Solar .....	7
Figura 2. 2 Panel Solar .....	8
Figura 2. 3 Energía Mareomotriz .....	9
Figura 2. 4 Panel Solar .....	10
Figura 2. 5 Diferencial de velocidad en función del tiempo .....	16
Figura 2. 6 Corriente de Flujo .....	17
Figura 2. 7 Resistencia Eléctrica.....	20
Figura 2. 8 Comportamiento molecular de las resistencias eléctricas .....	20
Figura 2. 8 Generador corriente continua .....	26
Figura 2. 9 Diagrama simplificado del proceso de producción de Energía .....	29
Figura 2. 10 Pilas de Hidrógeno.....	30
Figura 4.1 Esquema del Sistema .....	44
Figura 4.2 Partes de un Alternador .....	52
Figura 4.3. Savonius construido.....	53
Figura 4.4 Fuerzas en discos de revolución.....	61
Figura 5. 1 Prototipo base experimental .....	66
Figura 5. 2 Tabla de la presión del viento en función de la velocidad.....	67
Figura 5. 3 Tipos de Turbinas .....	69
Figura 5. 4 Perfil de vientos .....	73
Figura 5. 5 Generación de Energía Eólica .....	74
Figura 5. 6 Soporte Estructural .....	75

Figura 5. 7 Desplazamiento .....	78
Figura 5. 8 Fuerza en X .....	78
Figura 5. 9 Fuerza en Y .....	79
Figura 5. 10 Fuerza en Z.....	79
Figura 5. 11 Momento en X.....	80
Figura 5. 12 Momento en Y.....	80
Figura 5. 13 Momento en Z.....	81
Figura 5. 14 Tensión normal $S_{max}$ .....	81
Figura 5. 15 Tensión normal $S_{min}$ .....	82
Figura 5. 16 Tensión de plegado $S_{max}(M_x)$ .....	82
Figura 5. 17 Tensión de plegado $S_{min}(M_x)$ .....	83
Figura 5. 18 Tensión de plegado $S_{max}(M_y)$ .....	83
Figura 5. 19 Tensión de plegado $S_{min}(M_y)$ .....	84
Figura 5. 20 Esfuerzo axial $S_{axial}$ .....	84
Figura 5. 21 Tensión de corte $T_x$ .....	85
Figura 5. 22 Tensión de corte $T_y$ .....	85
Figura 5. 23 Tensión de Torsión $T$ .....	86
Figura 5.24 Diagrama de Carga Distribuida al eje .....	95
Figura 5.25 Diagrama de Fuerza Cortante.....	96
Figura 5.26 Diagrama de Momento Flector.....	96
Figura 5.27 Diagrama de Procesos del eje superior .....	104
Figura 5.28 Diagrama de Procesos del eje inferior .....	105

Figura 5.29 Diagrama de Procesos del eje de la chumacera.....	106
Figura 5.30 Diagrama de Procesos Brida superior .....	107
Figura 5.31 Diagrama de Procesos Brida Inferior .....	108
Figura 5.32 Diagrama de Procesos Disco Revolución.....	109
Figura 6.1 Día 1 La Mica Refugio .....	120
Figura 6.2 Día 1 La Mica a 10km del refugio .....	121
Figura 6.3 Día 1 Laguna la Mica .....	121
Figura 6.4 Día 2 Faldas del Volcán.....	122
Figura 6.5 Refugio Ingreso al Volcán.....	122
Figura 6.6 Día 3 Micaloma.....	123
Figura 6.7 Día 4 Micaloma.....	123
Figura 6.8 Día 5 Micaloma.....	124
Figura 6.9 Día 5 Micaloma.....	124
Figura 6.10 Totales de vientos.....	125

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Ponderación .....	40
Tabla 3. 2 Matriz de decisión .....	40
Tabla 4.1 Tabla de Presión Vs Velocidad del Aire .....	56
Tabla 5. 1 Descripción general de los distintos aerogeneradores.....	71
Tabla 6.1 Presentación de Resultados de Velocidad del Viento.....	112
Tabla 6.2 Datos Pruebas de Operación.....	118
Tabla 7.1. Costo de materiales directos.....	127
Tabla 7.2. Costos de servicios .....	128
Tabla 7.3. Costos mano de obra directa .....	129
Tabla 7.4. Costo de materiales indirectos .....	129
Tabla 7.5. Otros costos Indirectos .....	129
Tabla 7.6. Costos de diseño .....	130
Tabla 7.7. Costo total del Prototipo Savonious .....	130
Tabla 7.8. Costo del prototipo Generador Savonious (Inversión inicial) .....	131
Tabla 7.9. Precio de KW/h .....	132
Tabla 7.10. Ventas anuales .....	132
Tabla 7.11. Costos de producción anuales .....	132
Tabla 7.12. Beneficio neto anual.....	133
Tabla 7.13. Cálculo del VAN.....	133
Tabla 7.14. Cálculo del TIR.....	134

## NOMENCLATURA

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
	<b>POTENCIA EN UN SAVONIUS</b>
Pmax	Potencia máxima en el Savonius
H	Altura de la pala del Savonius
D	Diámetro medido de extremo a extremo de las palas del Savonius
V	Velocidad del viento
N	Velocidad de giro del savonius en RPM
$\Lambda$	Factor de velocidad específica eólica
	<b>SOPORTE ESTRUCTURAL</b>
Fx	Reacción de la fuerza en el eje x
Fy	Reacción de la fuerza en el eje y
Fz	Reacción de la fuerza en el eje z
Mx	Par de fuerza en el eje x
My	Par de fuerza en el eje y
Mz	Par de fuerza en el eje z
Smax	Esfuerzo Máximo
Smin	Esfuerzo Mínimo
Smax(Mx)	Esfuerzo máximo debido al momento en x
Smin(Mx)	Esfuerzo mínimo debido al momento en x
Smax(My)	Esfuerzo máximo debido al momento en y
Smin(My)	Esfuerzo mínimo debido al momento en y

Saxial	Esfuerzo axial
Tx	Tensión de corte en el eje x
Ty	Tensión de corte en el eje y
T	Resultante de tensiones de corte
	<b>DISEÑO Y CÁLCULO SAVONIUS</b>
Pot_mot	Potencia del motor a utilizar
n	Revoluciones por minuto de funcionamiento
Tor_req	Torque requerido de funcionamiento
E_entrada	Energía necesaria para realizar el derretimiento del hielo
$\Delta$ Hielo	Energía absorbida por el hielo
$\Delta$ envase	Energía absorbida por el envase
Cp_Hielo	Calor específico de fusión del hielo
Cp_H2O	Calor específico del agua
$\Delta$ T_Hielo	Variación de temperatura del hielo para subirle un grado
$\Delta$ T_H2O	Variación de temperatura del agua a 3 °C para mantenerla en estado líquido
E_Entr_t	Potencia necesaria para derretir el hielo, al subirle 1 °C de temperatura
E_H2O_t	Potencia necesaria para mantener al agua en estado líquido a 3 °C
Pot_req	Potencia total para obtener agua en estado líquido constantemente
$\omega$ _real	Velocidad angular real de giro
RPM_req	Revoluciones por minuto necesarias para que funcione el sistema
V_dis	Velocidad del viento a la cual se va

	a diseñar el prototipo
V_prueba	Velocidad real a la que se van a realizar las pruebas
Area_Real_aprox	Área del generador Savonius a diseñar
H_req	Altura del Savonius Requerida
D_req	Diámetro entre aspas del Savonius
Pv_real	Presión del viento en su diseño
F_real	Fuerza del viento en las aspas
P_real	Potencia real obtenida
Pv_prueba	Presión del viento en campo
F_prueba	Fuerza del viento en las aspas
P_prueba	Potencia que se esperaría obtenida
P	Densidad en función de la altura
P	Presión barométrica
Temp	Temperatura del sitio de pruebas
Hexp	Altura del sitio o lugar de pruebas
T_sa	Torque del Savonius obtenido
Pg	Potencia en el eje conductor
H	Eficiencia del generador
$\mu$	Velocidad adimensional en la periferia de las aspas del Savonius
P_per	Perdidas de potencia en el eje
$\delta_{Acero}$	Densidad del Acero
I_Sol_Rig	Inercia de los discos
$\alpha$	Aceleración Angular de los discos de revolución
a	Aceleración lineal de los discos de Revolución
Vol_eje	Volumen del eje principal conductor

F_aplic_disco	Fuerza que aplican los discos al eje el momento del giro
F_total	Fuerza total aplicada por los 3 discos
q_dist	Carga distribuida en la longitud total del eje principal conductor
	<b>ANÁLISIS SECCIONES CRÍTICAS</b>
M1	Momento generado en la sección crítica
Sy	Esfuerzo de fluencia del material SAE 1018
Su	Esfuerzo último a la rotura del material SAE 1018
$\zeta_1$	Esfuerzo Cortante del eje
$\sigma_1$	Esfuerzo de flexión del eje
$\zeta_{m2}$	Tensión por cortante máximo
$\zeta_{a2}$	Tensión por cortante mínimo
$\sigma_{max2}$	Tensión por flexión máxima
$\sigma_{min2}$	Tensión por flexión mínima
$\sigma_{equi1}$	Esfuerzos equivalentes
$\sigma_{equi2}$	Esfuerzos equivalentes
Ktamaño	Factores a fatiga
Kcarga	Factores a fatiga
Kconfiabilidad	Factores a fatiga
Se	Esfuerzo confiable
Fe	Factor de seguridad a fatiga
i	Relación de transmisión requerida
i1	Relación de transmisión entre polea 1 y polea 2
x	Diámetro de la polea para obtener

	las RPM necesarias
	<b>CÁLCULO DE RODAMIENTOS</b>
Ax	Reacciones en el apoyo A
Ay	Reacciones en el apoyo A
Az	Reacciones en el apoyo A
Ar	Fuerza radial
	Factores de consideración FAG
Yo	Factores de consideración FAG
Po	Factor para escoger el rodamiento
Bx	Reacciones en el apoyo B
By	Reacciones en el apoyo B
bz	Reacciones en el apoyo B
Br	Fuerza radial apoyo B

# **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A: RECOMENDACIONES PARA CÁLCULO DE RODAMIENTOS

ANEXO B: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN

ANEXO C: SIMULACIÓN DEL SISTEMA

ANEXO D: SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO

ANEXO E: FOTOS Y VIDEOS DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

## INTRODUCCION Y RESUMEN

El presente proyecto tiene como base fundamental el área de energías dentro de lo que es la ingeniería mecánica. El conocimiento de lo que es la energía nos lleva a sus manifestaciones dentro de la naturaleza; es decir como movimiento (cinética), dependiendo de su posición (potencial) o como radiación electromagnética. Mirando los diferentes aspectos y comportamientos de la misma se la ha clasificado de la siguiente forma: mecánica, térmica, química, eléctrica, radiante o atómica. Dentro de las propiedades de la energía se puede subrayar una, que es la capacidad de su transformación hacia otro tipo, este proceso puede sufrir pérdidas disipadas a la naturaleza o puede generar ganancias; otra propiedad es la de producir trabajo, el cual está directamente ligado a energía mecánica.

El propósito de realizar transformaciones energéticas depende del uso o servicio que se desea obtener. La energía es una parte primordial en el desarrollo de la sociedad humana.

En la actualidad, la mayor parte de la energía empleada en el mundo proviene de los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas), que originan graves problemas de contaminación. Para solucionar estos problemas se buscan otras fuentes energéticas alternativas, renovables y de menos impacto sobre el medio ambiente. La energía se obtiene de los recursos energéticos o fuentes de energía que brinda la naturaleza. Las fuentes de energía no renovables que el hombre ha empleado hasta la actualidad son: los combustibles fósiles, los minerales radioactivos. Las fuentes de energía renovables que se utilizan

actualmente son: sol, viento, agua, volcanes, géiseres, aguas termales, etc. En la actualidad se están comenzando a utilizar fuentes de energías renovables, no contaminantes, llamadas energías alternativas, que tienen en común las siguientes características: el recurso energético se encuentra en todo el planeta, lo que permite garantizar la utilización continuada (por ejemplo, el viento y el sol); las tecnologías de conversión de estas fuentes de energía, como la solar y la eólica, para producir energía eléctrica requieren construcciones relativamente simples, tienen bajos costos de operación. La relativa sencillez de los procesos tecnológicos asociados permite que sean accesibles a los países pobres y de escaso desarrollo industrial, pueden contribuir al desarrollo regional tanto en zonas agrarias como urbanas, tienen un reducidísimo impacto ambiental. No se encuentran afectadas por problemas de escasez o agotamiento a largo plazo. Sus desventajas principales son en su disponibilidad limitado que siempre está en función del estado o configuración ambiental y natural.

Algunas de las más importantes fuentes de energía alternativa y sistemas implantados en el Ecuador son: **solar**, como su nombre lo indica un sistema que capte la energía radiante producida por las reacciones de fusión continua del sol, se lo aprovecha para producir energía eléctrica o térmica, **eólica**, está basado en un sistema que mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, que produce energía eléctrica, **mareomotriz**, es la que resulta de aprovechar las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición de la Tierra y la Luna, y que resulta de la atracción gravitatoria de esta última y del sol, sobre las masas de agua de los mares.

Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable.

**Geotérmica**, la aplicación principal son las plantas geotérmicas aprovechan el calor generado por la tierra. En lugares especiales como son capas rocosas porosas y capas rocosas impermeables que atrapan agua y vapor de agua a altas temperaturas y presión y que impiden que estos salgan a la superficie. Si se combinan estas condiciones se produce un yacimiento energético. Biomasa, mediante procesos químicos adecuados de los organismos vivos se obtiene la energía de la biomasa (la biomasa se define como el peso seco de los organismos, una vez que se ha extraído todo el contenido de agua).

De todo lo mencionado anteriormente, mediante estudios, datos de valor y análisis, se debe optar por un sistema alternativo; el cual por medio de generación de energía eléctrica, y transformarla para producir suficiente calor para derretir hielo en las condiciones de: temperaturas más bajas y vientos más fuertes dentro del Ecuador, simulando de cierta manera una aproximación a las condiciones de la Antártica; además después de su captación debe permanecer en estado líquido para que dichas personas puedan utilizarla el momento que lo deseen.

# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) con el fin de apoyar las investigaciones que se ejecutan en este gélido sector a través del Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, ejecuta el proyecto denominado: “Implementación del Sistema de Información Geográfico al Instituto Nacional Antártico Ecuatoriano (INAE) y Generación de Geodatabase para el Manejo Integral de Información Espacial del INAE”, añadiendo como campos de investigación la flora, fauna y características físico-químicas del agua. La aspiración es que se integren nuevos proyectos en la parte de biotecnología, estructuras de la atmósfera e investigación del efecto invernadero entre otros.

Actualmente en la Base ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado ubicada en la antártica, se abastecen de agua mediante el deshielo natural producto del calor de verano y genera una laguna. Desde la Base ecuatoriana hacia la laguna existen tuberías las cuales son el camino por el cual es dirigido el fluido mediante la succión de una bomba alimentada con un generador eléctrico,

esta manera de abastecimiento es para 40 personas pero solamente sirve en verano porque en invierno la Base se cierra totalmente.

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En la actualidad analizando la necesidad por parte de los investigadores del gobierno central que la base se ponga en funcionamiento constante; por lo tanto en invierno también se necesita de un sistema de abastecimiento de agua para las personas que aportan con la investigación a la Base Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado ya que por motivos de condiciones ambientales extremas se encuentra cerrada para esta época del año.

Los motivos expuestos anteriormente son el principal propósito que ha llevado a contribuir mediante este proyecto de grado, el diseño y simulación de un sistema para provisión de agua a la base ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado de la antártica para la construcción de un prototipo que sirva para comprobar la veracidad de la investigación realizada.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. GENERAL**

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y simular un sistema para la provisión de agua a la base ecuatoriana de la Antártica capacidad 40 personas para construir un prototipo para en CEINSI-ESPE.

### **1.3.2. ESPECÍFICOS**

- ✓ Realizar un Marco Teórico de los fenómenos involucrados en el proyecto.
- ✓ Analizar y Seleccionar la alternativa de solución del problema.
- ✓ Diseñar el sistema seleccionado.
- ✓ Construir un prototipo que muestre la validación al diseño seleccionado.
- ✓ Realizar la simulación del prototipo en un software adecuado.
- ✓ Realizar Pruebas y recopilación de datos en campo.
- ✓ Realizar un análisis de resultados.
- ✓ Realizar un análisis económico del proyecto

### **1.4. ALCANCE DEL PROYECTO**

Diseño y Simulación de un sistema para la provisión de agua para invierno a la Base Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado de la Antártica para la construcción de un prototipo que valide que el diseño seleccionado fue el adecuado.

### **1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Actualmente la Escuela Politécnica del Ejército aporta con docentes investigadores a la Base ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado ubicado en la Antártica Isla de Greenwich, las investigaciones se realizan de forma conjunta entre la base y el buque Orión. Los estudios van desde la fisiología humana, a la geología y oceanografía. La base ecuatoriana actualmente trabaja solamente en verano, ya que el método de abastecerse de agua solo funciona en esta época.

La importancia de este proyecto es diseñar y simular para la construcción de un prototipo para la obtención de agua bajo condiciones de invierno las cuales

van a estar enfocadas como referencia a las condiciones más adversas en el Ecuador en cuanto a velocidad del viento, temperatura, y altitud las cuales van a ser proporcionadas por el INAMHI, para que la base Pedro Vicente Maldonado pueda funcionar en invierno, ya que la misma solo cuenta con sistemas y diseños apropiados para la provisión de agua en verano. Se propone también a la investigación para el posible cambio en el abastecimiento de energía en la base ya que cuenta con generadores eléctricos los cuales son abastecidos mediante combustible (DIESEL) el cual emana gases contaminantes al medio ambiente, razón por la cual la antártica es un medio ambiente

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. ENERGIAS RENOVABLES

Bajo la denominación de energías renovables, alternativas o blandas, se engloban una serie de fuentes energéticas que a veces no son nuevas, como la leña o las centrales hidroeléctricas, ni renovables en sentido estricto (geotermia<sup>1</sup>), y que no siempre se utilizan de forma blanda o descentralizada, y su impacto ambiental puede llegar a ser importante, como los embalses para usos hidroeléctricos o los monocultivos de biocombustibles. Actualmente suministran un 20% del consumo mundial (las estadísticas no suelen reflejar su peso real), siendo su potencial enorme, aunque dificultades de todo orden han retrasado su desarrollo en el pasado.

Con la excepción de la geotermia, la totalidad de las energías renovables derivan directa o indirectamente de la energía solar. Directamente en el caso de la luz y el calor producidos por la radiación solar, e indirectamente en el caso de las energías eólica, hidráulica, mareas, olas y biomasa<sup>2</sup>, entre otras. Las energías renovables, a lo largo de la historia y hasta bien entrado el siglo XIX, han cubierto la práctica totalidad de las necesidades energéticas del hombre. Sólo en los últimos cien años han sido superadas, primero por el empleo del carbón, y a partir de 1950 por el petróleo y en menor medida por el

---

<sup>1</sup> La energía geotérmica es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra

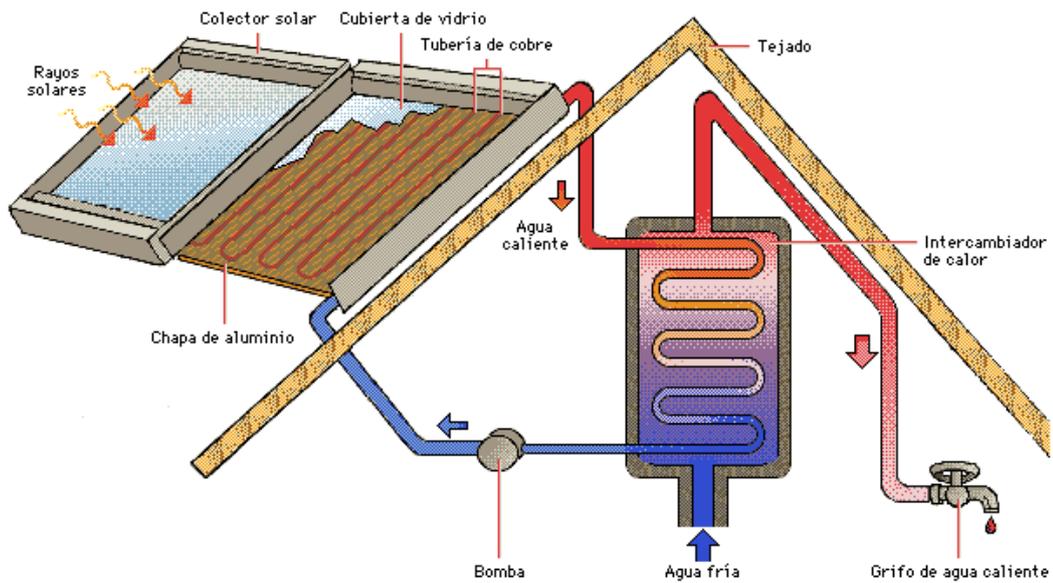
<sup>2</sup> Energía renovable procedente del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico

gas natural. La energía nuclear, con 441 centrales nucleares en 2003, con una potencia instalada de 360 GW, cubre una parte insignificante del consumo mundial, y a pesar de algunas previsiones optimistas, su papel será siempre marginal. Aún hoy, para más de dos mil millones de personas de los países del Sur, la principal fuente energética es la leña, afectada por una auténtica crisis energética, a causa de la deforestación y del rápido crecimiento demográfico. La biomasa, y fundamentalmente la leña, suministra un 14% del consumo mundial, cifra que en los países del Sur se eleva al 35% globalmente, aunque en Tanzania llega al 90% y en India supera el 50%; en el país más rico, Estados Unidos, representa el 4% del consumo global, porcentaje superior al de la energía nuclear, en la Unión Europea el 3,7% y en España el 3%.

### **2.1.1. EL COLECTOR SOLAR**

El colector solar plano, utilizado desde principios de siglo para calentar el agua hasta temperaturas de 80 grados centígrados, es la aplicación más común de la energía térmica del sol. Países como Alemania, Austria, Japón, Israel, Chipre o Grecia han instalado varios millones de unidades.

Los elementos básicos de un colector solar plano son la cubierta transparente de vidrio y una placa absorbente, por la que circula el agua u otro fluido calo-portador. Otros componentes del sistema son el aislamiento, la caja protectora y un depósito acumulador. Cada metro cuadrado de colector puede producir anualmente una cantidad de energía equivalente a unos ochenta kilogramos de petróleo. Las aplicaciones más extendidas son la generación de agua caliente para hogares, piscinas, hospitales, hoteles y procesos industriales, y la calefacción, empleos en los que se requiere calor a bajas temperaturas y que pueden llegar a representar más de una décima parte del consumo. A diferencia de las tecnologías convencionales para calentar el agua, las inversiones iniciales son elevadas y requieren un periodo de amortización comprendido entre 5 y 7 años, si bien, como es fácil deducir, el combustible es gratuito y los gastos de mantenimiento son bajos.



**Figura 2. 1 Colector Solar**

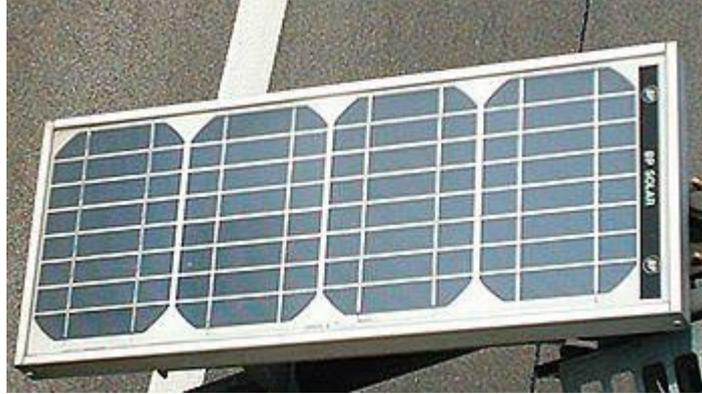
### 2.1.2. CÉLULAS SOLARES

El efecto fotovoltaico, descubierto por Becquerel en 1839, consiste en la generación de una fuerza electromotriz en un dispositivo semiconductor, debido a la absorción de la radiación luminosa. Las células fotovoltaicas convierten la energía luminosa del sol en energía eléctrica, con un único inconveniente: el coste económico todavía muy elevado para la producción centralizada. Sin embargo, las células fotovoltaicas son ya competitivas en todos aquellos lugares alejados de la red y con una demanda reducida, como aldeas y viviendas sin electrificar, repetidores de televisión, balizas, agricultura, faros, calculadoras y otros bienes de consumo. A lo largo de toda la década el mercado fotovoltaico creció a ritmos anuales superiores al 40%, y ya hay más de 2.500 megavatios instalados en todo el mundo. Actualmente la mayoría de las células fotovoltaicas son de silicio monocristalino<sup>3</sup> de gran pureza, material obtenido a partir de la arena, muy abundante en la naturaleza. La purificación

---

<sup>3</sup> Es causada por un proceso químico derivado de la arena de cuarzo y limpieza utilizados en la industria de los semiconductores

del silicio es un proceso muy costoso, debido a la dependencia del mercado de componentes electrónicos, que requiere una pureza superior a la requerida por las células fotovoltaicas.

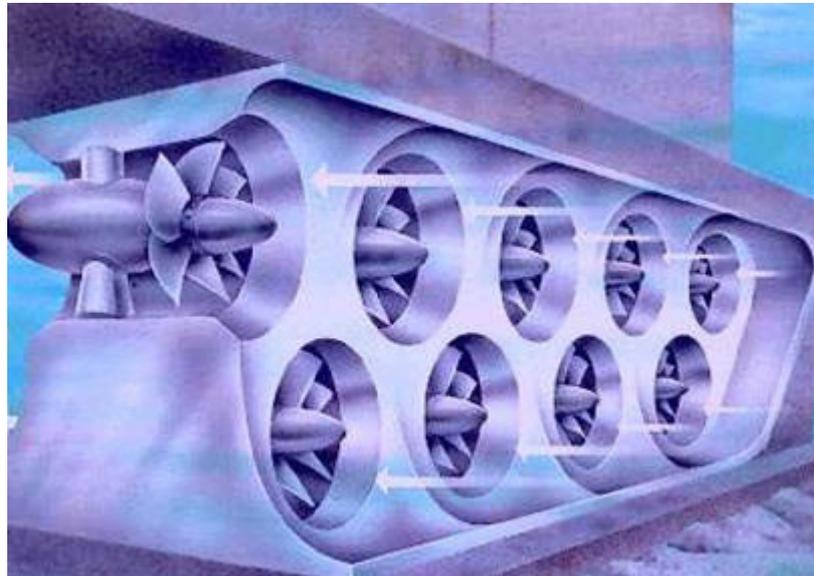


**Figura 2. 2 Panel Solar**

### **2.1.3. ENERGÍA MAREOMOTRIZ**

La energía mareomotriz se debe a las fuerzas de atracción gravitatoria entre la Luna, la Tierra y el Sol. La energía mareomotriz es la que resulta de aprovechar las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa de la Tierra y la Luna, y que resulta de la atracción gravitatoria de esta última y del Sol sobre las masas de agua de los mares. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse interponiendo partes móviles al movimiento natural de ascenso o descenso de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable. Es un tipo de energía renovable limpia. La energía mareomotriz tiene la cualidad de ser renovable, en tanto que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación, y es limpia, ya que en la transformación energética no se producen subproductos contaminantes gaseosos, líquidos o sólidos. Sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios

actuales y el coste económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una proliferación notable de este tipo de energía.



**Figura 2. 3 Energía Mareomotriz**

#### **2.1.4. ENERGÍA EÓLICA**

La energía eólica es una variante de la energía solar, pues se deriva del calentamiento diferencial de la atmósfera y de las irregularidades de relieve de la superficie terrestre. Sólo una pequeña fracción de la energía solar recibida por la Tierra se convierte en energía cinética del viento y sin embargo ésta alcanza cifras enormes, superiores en varias veces a todas las necesidades actuales de electricidad. La energía eólica podría proporcionar cinco veces más electricidad que el total consumido en todo el mundo, sin afectar a las zonas con mayor valor ambiental. La potencia que se puede obtener con un generador eólico es proporcional al cubo de la velocidad del viento; al duplicarse la velocidad del viento la potencia se multiplica por ocho, y de ahí que la velocidad media del viento sea un factor determinante a la hora de analizar la posible viabilidad de un sistema eólico. La energía eólica es un

recurso muy variable, tanto en el tiempo como en el lugar, pudiendo cambiar mucho en distancias muy reducidas. En general, las zonas costeras y las cumbres de las montañas son las más favorables y mejor dotadas para el aprovechamiento del viento con fines energéticos. La conversión de la energía del viento en electricidad se realiza por medio de aerogeneradores<sup>4</sup>, con tamaños que abarcan desde algunos vatios hasta los 5.000 kilovatios (5 MW). Los aerogeneradores se han desarrollado intensamente desde la crisis del petróleo en 1973, habiéndose construido desde entonces más de 150.000 máquinas.

La energía eólica no contamina y su impacto ambiental es muy pequeño comparado con otras fuentes energéticas. De ahí la necesidad de acelerar su implantación en todas las localizaciones favorables, aunque procurando reducir las posibles repercusiones negativas, especialmente en las aves y en el paisaje, en algunas localizaciones.



**Figura 2. 4 Panel Solar**

---

<sup>4</sup> Los aerogeneradores o turbinas de viento como también se les conocen, son máquinas que se encargan de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica.

### **2.1.5. BIOMASA**

La biomasa es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.

En el contexto energético, la biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales. También se considera biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), y otros residuos derivados de las industrias

## **2.2. COMPORTAMIENTO DEL HIELO EN LA ANTÁRTICA**

A diferencia del Ártico, que es un océano rodeado por continentes, la Antártida es el lugar más remoto e inhospitalario de la tierra y consta de una gran masa de tierra y de numerosas islas mar adentro. La mayor parte del territorio continental está cubierta por un vasto casquete polar, el cual se divide en porciones en el sector costero, formando enormes icebergs de hasta 200 km de largo. La Antártida es el único continente que no tiene una población humana permanente, siendo los científicos de visita, que estudian el medio ambiente local, sus únicos habitantes. También es el único que es gobernado por un tratado internacional que prohíbe que los países tomen posesión o exploten de la tierra. La Antártida tiene un territorio más grande que el de EEUU, México y Europa juntos. Cerca de un 95 por ciento de este territorio está cubierto con una capa de hielo que en algunos lugares tiene 4000 m de espesor. A pesar de que la precipitación anual de nieve es muy escasa, esta capa se acumuló a lo largo de miles de años de nevadas y contiene cerca de las 9 décimas partes de todos los hielos glaciares del mundo. El relieve de la Antártida tiene un promedio de más de 2000 m de altura sobre el nivel del mar, siendo ello el continente más alto; pero en muchas áreas, hasta cuatro quintas

partes de esa altura son debidas a la capa de hielo. Durante pleno invierno, entre agosto y septiembre, se forma un banco de hielo de gran espesor en el que el Pacífico sur circundante, lo que duplica el área del continente. Los Montes Transatlánticos cruzan todo el continente, pasan cerca del polo Sur, y lo dividen en dos partes desiguales: Antártida occidental (la menor) y Antártida oriental.

### **2.2.1. LOS HIELOS**

La inmensa capa glacial que cubre a la Antártida es debida a la acumulación de nieve que se deposita sobre ella y se transforma gradualmente en hielo, para deslizarse luego con lentitud hacia la periferia del continente y volcarse por fin en el mar como témpanos, en forma de ventisqueros que llenan los valles de las cordilleras costeras o de un glaciar relativamente llano, que termina en un muro de unos cuarenta metros de alto. En algunos casos en que el hielo llega donde hay una barrera de hielo, pasa a formar parte de ella agregándose al hielo marino y al que resulta de la nieve que precipita sobre tales extensiones; de donde la sustancia de que está compuesta una barrera es de una sustancia muy particular. La altitud media de la superficie del hielo que cubre al continente es de unos 2000 metros sobre el nivel del mar; pero cabe tener presente que el promedio de los espesores de la capa glaciada hasta ahora medidos, en muy pocos lugares, es de 2400 metros aproximadamente.

Si esta capa se descongelase, la superficie de roca sobre la cual está apoyada se elevaría, al mismo tiempo que se elevaría el nivel de todos los océanos en unos 100 metros inundando las más grandes ciudades, estableciendo nuevos puertos en lugares ahora lejanos del mar alternando la distribución de las zonas fértiles y áridas del globo.

De los estudios hasta ahora realizados no ha podido llegarse a la conclusión precisa alguna respecto de si la cubierta glacial de la Antártida se encuentra en aumento o disminución.

### **2.2.2. EL HIELO MARINO**

El hielo marino es el que se produce a raíz de la congelación del agua de mar que empieza a solidificarse cuando se enfría hasta unos 2º C bajo cero aproximadamente. El proceso de la formación del hielo marino es muy complicado en virtud de la complejidad misma del agua de mar y de las condiciones generales ambientales, pero comienza en las aguas tranquilas y poco profundas próximas a la orilla, para extenderse luego mar adentro en una capa de aproximadamente un metro y medio de espesor que permanece adherida a la costa.

Cuando sobreviene la primavera comienza con ella la fusión que debilita al hielo marino permitiendo que las olas y las corrientes rompan dejándolo a merced de éstas y de la acción del viento, que lo hacen derivar en el mar para irse deteriorando paulatinamente hasta desaparecer. No todo el hielo marino llega a fundirse en el verano; sin embargo mucho de él lo sobrevive para espesarse y endurecerse más durante el invierno siguiente. Al romperse y apilarse con los temporales que lo arrojan sobre las costas que le impiden derivar, y sufrir por ello grandes presiones que modifican su estructura y su apariencia. El hielo marino que está adherido a la costa se denomina hielo fijo y constituye la llamada banca de hielo, mientras que el que se ha desprendido de ella se reconoce como hielo a la deriva y forma los campos de hielo compuestos por trozos de diferentes tamaños, según el cual se denominan bandejonas, bandejas o escombros de hielo.

### **2.2.3. TÉMPANOS**

Los trozos de hielo formado sobre la tierra a partir de la nieve y que caen al mar se llaman témpanos. De ellos hay dos tipos principales, por lo que se clasifican como témpanos de glaciar si se han originado de un ventisquero y como témpanos tabulares si se han resultado de desprendimientos de una barrera de hielo. Los primeros tienen formas irregulares, pero los segundos son planos en su cima y muestran en los costados las diversas capas de nieve

superpuestas en virtud de la que ha ido precipitando sobre la barrera de la que formaron parte.

Los tabulares sobresalen del agua aproximadamente  $\frac{1}{5}$  de su espesor total, mientras que los de glaciación sólo  $\frac{1}{8}$  de modo que se mueven bajo la acción de las corrientes sin ser prácticamente afectados por el viento. Al derivar hacia las bajas latitudes, algunos han llegado hasta la altura del río de la Plata.

#### **2.2.4. EL CLIMA ANTÁRTICO**

No puede decirse en verdad que en la Antártica haya verano, pues sólo en muy excepcionales circunstancias la temperatura llega por pocas horas a ser superior a los  $0^{\circ}$  C, por lo que la fusión del hielo y la nieve sobre la tierra es casi inexistente.

El clima se caracteriza por ser intensamente frío, poco húmedo y tempestuoso, siendo la nieve la única forma de precipitación, excepto en las partes próximas a la costa y sobre el mar, donde en raras ocasiones llueve.

Tiene sus temperaturas más bajas en agosto cuando llegan a estar entre  $40^{\circ}$  C y  $70^{\circ}$  C bajo cero en la capa de hielo interior. Las temperaturas más moderadas de los mares vecinos a la península Antártica elevan allí su temperatura a  $15^{\circ}$  C en el verano; pero en el resto del continente se mantiene extremadamente frío durante todo el año. La lluvia es prácticamente inexistente y las nevadas son escasas, excepto en las costas. Las ventiscas son frecuentes en las márgenes de la capa de hielo, cuando la nieve suelta es barrida por el viento.

Las temperaturas mínimas registradas han sido de  $59^{\circ}$  C bajo cero en la barrera de hielo del Ross en 1912 cuando una expedición inglesa de Scott, de  $74^{\circ}$  C bajo cero en el observatorio norteamericano del Polo Sur en 1957, de  $56^{\circ}$ , 4 C bajo cero en la base argentina de General Belgrano sobre la barrera del Filchner en 1957 y de  $88^{\circ},5$  C bajo cero en la estación soviética Vostok en la tierra de Wilkes en 1960

Cuando el viento sopla con fuerza, siendo frecuente que lo haga con velocidades de más de 70 km por hora la nieve, que es por él arrastrada, lo que es en grandes cantidades como para que la visibilidad quede completamente anulada y se diga que sopla un viento blanco o que se esta en una ventisca. La región más ventosa del globo está en la Antártica ya que se registraron vientos de hasta 240 km por hora en la región de Tierra Adelia<sup>5</sup>

### **2.3. ENERGIA PRODUCIDA POR AEROGENERADORES**

Los generadores eólicos tienen diversas aplicaciones específicas, ya sea eléctricas o de bombeo de agua, mediante el aprovechamiento y transformación de energía eólica en energía mecánica. Se entiende por energía eólica a los vientos que existen en el planeta producto de fenómenos que se estudiarán más adelante.

Mecanismo básico de formación del viento:

- En zonas de mayor calor, el aire al calentarse disminuye su densidad y se eleva la masa de dicho aire. Al ascender dicha masa y alejarse del suelo, tendería a dejar un hueco, no quedando más remedio que se hueco sea rápidamente rellenado por el aire más frío proveniente del área circundante a la zona caliente.

- Si a escala planetaria tuviésemos solo dos zonas bien diferenciadas, debido a que el eje de giro fuese perpendicular al plano de la elíptica y la tierra tuviese una rotación de una vuelta por año, una correspondería a la zona caliente sobre el ecuador y la otra a una fría sobre cada uno de los polos, definiéndose solo dos celdas de circulación.

- Además de lo anteriormente expuesto, tenemos también que el aire es un gas que termodinámicamente su densidad depende de la presión y de la

---

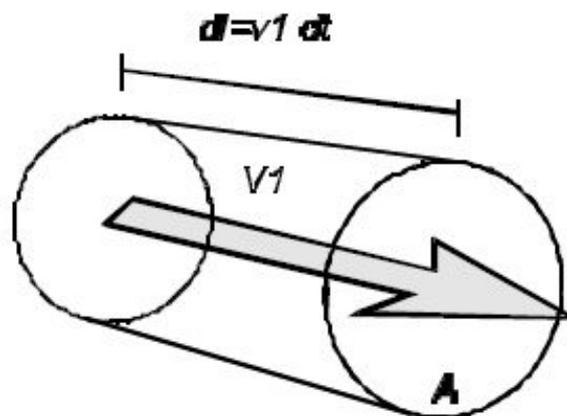
<sup>5</sup> La Tierra Adelia, es un sector estrecho de la Antártida Oriental, delimitado por los meridianos 136° E (cerca de la punta Pourquoi Pas) y 142° E (cerca de la punta Alden).

temperatura, con un contenido determinado de humedad, no siendo esta última constante en todo el planeta. Por otro lado la capacidad calorífica de los océanos y de los continentes es diferente. Sumado a que las condiciones de contorno son distintas a nivel de suelo que en altura, a lo que también se añade la rugosidad propia del terreno, vemos que finalmente el Viento es un movimiento de masas de aire terriblemente complejo y difícil de describir analíticamente de una forma precisa.

### 2.3.1. LA ENERGÍA DEL VIENTO

El viento, consiste en aire en movimiento. Todo elemento de masa en movimiento posee una cierta cantidad de energía cinética ( $E_c$ ), que es proporcional al cuadrado de su velocidad ( $v_1$ ) y a su masa ( $dm$ ) respectivamente.

Considérese un elemento de volumen cilíndrico  $dV$  que es atravesado por aire en movimiento con velocidad  $v_1$ :



**Figura 2. 5 Diferencial de velocidad en función del tiempo**

La energía que atraviesa la superficie  $A$  en la unidad de tiempo es la potencia  $P$  desarrollada por el fluido a través de dicha sección:

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Se tiene así, que la potencia del viento es proporcional a la densidad del aire, al área de sección considerada y al cubo de su velocidad.

### 2.3.2. LA FUERZA DEL VIENTO

Si en el medio fluido se interpone un elemento captador de energía (fig. 4), el viento después de atravesarlo tendrá una velocidad  $v_2$  menor a la  $v_1$  que traía originalmente (disminución de energía cinética). El cambio en velocidad del flujo implica que se realiza una fuerza sobre el elemento interpuesto.

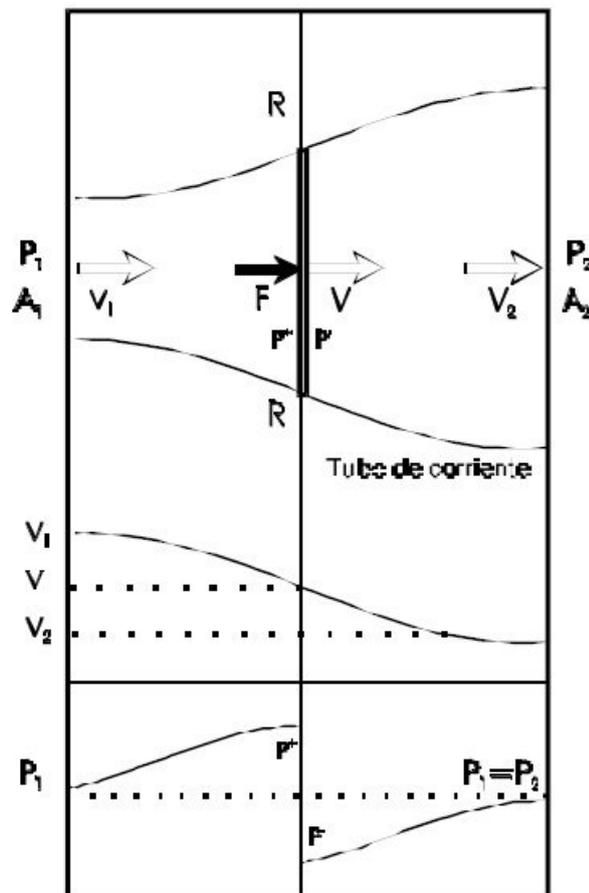


Figura 2. 6 Corriente de Flujo

En la figura 2.3.2 se representa gráficamente el comportamiento de las variables que caracterizan el flujo. El disco del rotor (línea R-R) se sitúa perpendicularmente a la dirección del viento incidente que tiene una velocidad  $v_1$  a una distancia infinita aguas arriba. El aire que se desplaza por el tubo de corriente atraviesa el rotor, cediéndole parte de su energía y estableciendo la correspondiente diferencia de presiones a ambos lados.

### 2.3.3. MÁXIMA POTENCIA EXTRAÍBLE DEL VIENTO

La potencia captada por un aerogenerador suele expresarse como:

$$P = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \right) \cdot C_p \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde  $C_p$  es el coeficiente de potencia que determina el rendimiento aerodinámico del rotor.

### 2.3.4. EL ROTOR

En los sistemas eólicos el elemento captador consiste en una hélice que transforma la energía cinética del viento en energía rotacional que es comunicada a un generador eléctrico (aerogeneradores), a un sistema de bombeo (aerobombas) o a un sistema para moler grano (molino de viento tradicional). El principal elemento de estas hélices es la pala. El dimensionamiento de un rotor es una tarea complicada y que requiere integrar los conocimientos de diferentes disciplinas: además de aerodinámica, hay que tener en cuenta aspectos estructurales (estáticos y dinámicos), de generación de ruido, de fabricación, etc.

Como primera aproximación se necesita saber cuánta potencia debe generar el rotor, a qué velocidad debe generarla, y a qué velocidad de giro (este último

---

<sup>6</sup>  $C_p$ , es la capacidad calorífica que posee un material en su estructura molecular.

parámetro está limitado por la maquinaria que va acoplada al rotor, por ejemplo).

De forma preliminar, se puede calcular el área del rotor deseado partiendo de la relación:

$$P = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \right) \cdot C_p \quad (\text{Ec. 2.3})$$

dónde se debe tomar un valor aproximado de  $C_p$  ( normalmente entre 0.3 y 0.35). Pero también hay que tener en cuenta las pérdidas en la maquinaria que va conectada al rotor (multiplicador, generador, eje con cojinetes, bomba de agua,...) Cada componente tiene su propia eficiencia, por lo que se debe multiplicar  $C_p$  por cada una de estas eficiencias para conocer la potencia útil que se va a generar.

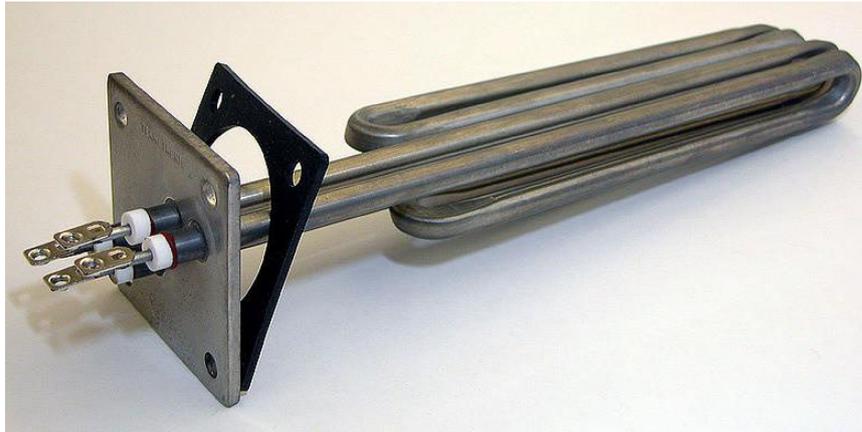
Los materiales a emplear en la fabricación de rotores son muy variados. En principio, una pala puede ser fabricada en madera, metal, telas y materiales compuestos, entre otros. Los valores que determinan cuál de estos materiales es el adecuado varían para cada caso específico.

Con diferencia, casi todos los nuevos diseños prefieren las ventajas de los materiales compuestos: fibras de vidrio, carbono y kevlar, resinas de poliéster, viniléster y epoxi. La ventaja de utilizar los tejidos de fibra es que se puede optimizar la estructura para resistir las cargas en las direcciones apropiadas, aligerando además el peso total. Además, el coste de estos materiales está descendiendo considerablemente, por lo que su empleo se generalizará en el futuro.

## **2.4. SISTEMA DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS**

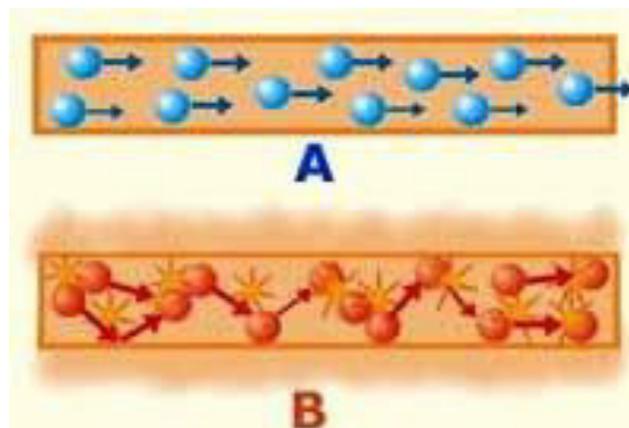
Las resistencias calentadoras convierten energía eléctrica en calor. Procedimiento descubierto por James Prescott Joule cuando en 1841 al hacer circular corriente eléctrica a través de un conductor se liberó calor por encontrar

resistencia. En la actualidad las resistencias calentadoras se utilizan para infinidad de aplicaciones. La gran mayoría de ellas son fabricadas con un alambre de una aleación de níquel (80%) y cromo (20%). Esta aleación soporta temperaturas muy altas ( $1000^{\circ}\text{C}$ ), es resistivo (condición necesaria para generar calor), es muy resistente a los impactos y es inoxidable.



**Figura 2. 7 Resistencia Eléctrica**

Resistencia eléctrica es toda oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones. Cualquier dispositivo o consumidor conectado a un circuito eléctrico representa en sí una carga, resistencia u obstáculo para la circulación de la corriente eléctrica.



**Figura 2. 8 Comportamiento molecular de las resistencias eléctricas**

**A.-** Electrones fluyendo por un buen conductor eléctrico, que ofrece baja resistencia.

**B.-** Electrones fluyendo por un mal conductor. Eléctrico, que ofrece alta resistencia a su paso. En ese caso los electrones chocan unos contra otros al no poder circular libremente y, como consecuencia, generan calor.

Normalmente los electrones tratan de circular por el circuito eléctrico de una forma más o menos organizada, de acuerdo con la resistencia que encuentren a su paso. Mientras menor sea esa resistencia, mayor será el orden existente en el micro mundo de los electrones; pero cuando la resistencia es elevada, comienzan a chocar unos con otros y a liberar energía en forma de calor. Esa situación hace que siempre se eleve algo la temperatura del conductor y que, además, adquiera valores más altos en el punto donde los electrones encuentren una mayor resistencia a su paso.

Un importante número de equipos utilizados en laboratorios químicos, recurren a la resistencia eléctrica como fuente de energía para la generación de calor en los mismos; este es el caso de, por ejemplo, estufas eléctricas para secado y ensayo de materiales, para cultivos, para germinación, baños termostáticos, planchas calefactoras (hot plates), hornos eléctricos muflas, hornos eléctricos tubulares, etc.

Antes que nada, para entender cómo se produce dicha energía es necesario comprender el concepto de energía, este es "la capacidad que tiene un mecanismo o dispositivo eléctrico cualquiera para realizar un trabajo", y de acuerdo al postulado base de la física, "la energía ni se crea ni se destruye, se transforma", en el caso de la energía eléctrica esa transformación se manifiesta en la obtención de luz, calor, frío, movimiento (en un motor), o en otro trabajo útil que realice cualquier dispositivo conectado a un circuito eléctrico cerrado, dicha energía se mide en Joule (que se representa con la letra J).

Ya podemos comprender entonces que los equipos para laboratorios químicos previamente mencionados, poseen elementos, normalmente llamados

calefactores, que ante el paso de la electricidad generan una resistencia al paso de la misma, que la transforma en calor, ahora bien, la pregunta que surge inmediatamente es, como lo hace y cuanto calor puede generar dicho elemento?; esto estará directamente relacionado con la potencia del elemento, que no es más que la velocidad a la que se consume la energía (en nuestro caso, eléctrica), pudiéndose también definir la potencia como energía desarrollada o consumida en una unidad de tiempo.

Entonces, podemos decir que la potencia se mide en julio (joule) dividido por segundo (J/seg) y se representa con la letra "P".

Además, diremos que la unidad de medida de la potencia eléctrica "P" es el "watt", y se representa con la letra "W".

Como un J/seg equivale a 1 watt (W), por tanto, cuando se consume 1 julio (joule) de potencia en un segundo, estamos gastando o consumiendo 1 watt de energía eléctrica.

Para entenderlo, hagamos un símil: Si la energía fuese un líquido, la potencia sería los litros por segundo que vierte el depósito que lo contiene.

## **2.5. GENERADORES ELÉCTRICOS**

El movimiento de los electrones por un conductor metálico como consecuencia de una diferencia de potencial entre sus extremos puede compararse con el flujo de agua entre depósitos situados a diferente altura y conectados mediante una tubería. Cuando se llena el depósito superior el agua desciende, pero dicho movimiento dura sólo en tanto se mantiene una diferencia entre los niveles de agua en ambos depósitos. Para mantener el agua en continua circulación es necesario intercalar una bomba que eleve de nuevo el agua desde el depósito inferior al superior. El papel de la bomba en dicho circuito hidráulico es el de comunicar a la masa de agua que lo atraviesa la energía suficiente como para salvar la diferencia de altura entre los dos depósitos, lo que equivale de hecho a mantener constante la diferencia de niveles del agua entre ambos depósitos aun a pesar del flujo continuo que los atraviese.

Para mantener una corriente eléctrica en un conductor es preciso que exista una diferencia de potencial constante entre sus extremos; hace falta, pues, un dispositivo que juegue un papel análogo al de la bomba en el circuito hidráulico. Dicho dispositivo recibe el nombre de generador. Una asociación de conductores con un generador constituye un circuito eléctrico en donde puede tener lugar un movimiento continuado de cargas. El generador mantiene constante la diferencia de potencial entre dos puntos del circuito, o dicho en otros términos, genera un campo eléctrico en el conductor que es el responsable de la corriente.

### **2.5.1. FUERZA ELECTROMOTRIZ DE UN GENERADOR**

La fuerza electromotriz es la magnitud que caracteriza el comportamiento del generador en un circuito eléctrico. En el caso de una bomba hidráulica la potencia mecánica representa la energía que suministra al circuito por unidad de tiempo. En los circuitos eléctricos se define la fuerza electromotriz de un generador como la energía que cede el generador al circuito por cada unidad de carga que lo atraviesa y que se invierte en incrementar su energía potencial eléctrica. Cada carga al pasar por el generador recibe una dosis de energía que podrá gastar después en su recorrido a lo largo del circuito. Con frecuencia, se emplean las iniciales Fem. para designar esta magnitud, que siendo una energía se la denomina impropia fuerza. Según su definición la Fem. se expresará en unidades de energía partido por unidades de carga. Este es también el caso de las magnitudes potencial y diferencia de potencial. Por tal motivo su unidad en el SI es el volt.

### **2.5.2. TIPOS DE GENERADORES**

El tipo de generadores más conocido es el generador químico, al cual pertenece la pila eléctrica o pila seca. Transforma energía producida en ciertas reacciones químicas en energía eléctrica capaz de mantener una diferencia de potencial constante entre sus polos o bornes. Una pila cinc-carbón, como las que se emplean para alimentar un aparato de radio portátil, está formada por dos elementos o electrodos de diferentes sustancias. Uno es de cinc y tiene

forma de envoltura cilíndrica, el otro es una barrita de carbón. Entre ambos existe una pasta intermedia o electrolito que contribuye al proceso de generación de tensión. La reacción química que se produce en el electrodo de cinc libera electrones, con lo que éste se convierte en un polo negativo (cátodo); la que se produce en el electrodo de carbón da lugar a una disminución de electrones, resultando de signo positivo (ánodo). La tensión producida por una pila es constante y al aplicarla sobre un circuito eléctrico produce una corriente continua. Este tipo de corriente se caracteriza porque el sentido del movimiento de los portadores de carga se mantiene constante.

La pila de combustible es otro tipo de generador químico de uso frecuente en el suministro de energía eléctrica a naves espaciales. Recibe este nombre porque las sustancias que participan en las correspondientes reacciones químicas son, en parte, introducidas desde el exterior como si de un combustible se tratara. Una pila de combustible típica es la que se basa en las reacciones hidrógeno-oxígeno que se producen con pérdida de electrones en un electrodo y ganancia en el otro, dando lugar a una diferencia de potencial capaz de producir una corriente eléctrica exterior.

Un termopar es un generador termoeléctrico que transforma calor en electricidad. Se produce cuando dos hilos conductores unidos entre sí por sus extremos respectivos se someten a una diferencia de temperatura, sumergiendo una de las soldaduras en hielo fundente y aplicando a la otra la llama de un mechero. Entre ambos puntos se genera una diferencia de potencial que aumenta con la temperatura y puede detectarse con un aparato de medidas eléctricas. Dicho efecto generador de electricidad conocido como efecto Seebeck se emplea principalmente en la medida de temperaturas.

La célula fotovoltaica es un generador que transforma la energía luminosa en energía eléctrica. Se basa en la, capacidad de los semiconductores para conducir la electricidad en un sentido dado, pero no en el opuesto. Al incidir la luz sobre la célula, arranca algunos electrones de sus átomos, electrones que se acumulan en una región determinada a expensas de la pérdida de electrones en la región opuesta. Estas dos regiones constituyen los polos

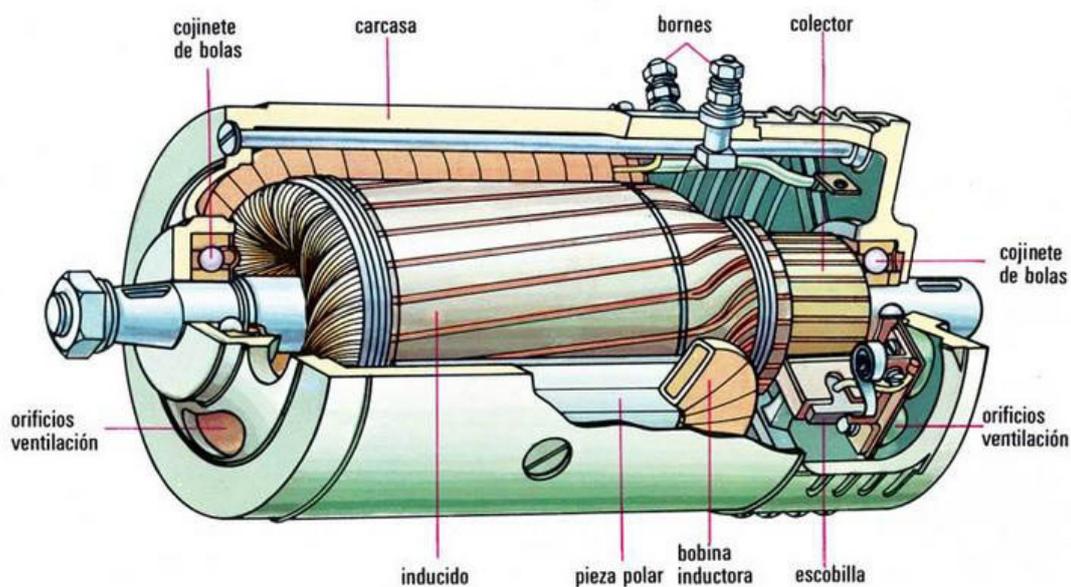
negativo y positivo, respectivamente, de la célula cuya diferencia de potencial se mantendrá constante en tanto no varíe la intensidad luminosa que alcanza su superficie.

El generador electromagnético se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. Cuando un conductor cerrado se hace girar en el seno del campo magnético producido por un imán se genera en su interior una diferencia de potencial capaz de producir una corriente eléctrica. Es el tipo de generador denominado alternador que se emplea en las grandes plantas de producción de energía eléctrica. En ellas, diferentes formas de energía, cuya naturaleza depende del tipo de central, se invierten en mover grandes bobinas de conductores, haciéndolas girar en el seno de campos magnéticos. De este modo se producen tensiones eléctricas entre sus bornes cuya polaridad positiva/negativa, se invierte alternativamente con el tiempo a razón de cincuenta veces en cada segundo. Cuando esta tensión se aplica a un circuito eléctrico, produce en él una corriente alterna que se caracteriza por una inversión alternativa, con idéntica frecuencia, del sentido del movimiento de los portadores de carga.

#### **2.5.2.1. Generadores de corriente continúa**

Si una armadura gira entre dos polos de campo fijos, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en una dirección, o continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. En las máquinas antiguas esta inversión se llevaba a cabo mediante un conmutador, un anillo de metal partido montado sobre el eje de una armadura. Las dos mitades del anillo se aislaban entre sí y servían como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantenían en contra del conmutador, que al girar conectaba eléctricamente la bobina a los cables externos. Cuando la armadura giraba, cada escobilla estaba en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente

invertía su dirección dentro de la bobina de la armadura. Así se producía un flujo de corriente de una dirección en el circuito exterior al que el generador estaba conectado. Los generadores de corriente continua funcionan normalmente a voltajes bastante bajos para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. El potencial más alto desarrollado para este tipo de generadores suele ser de 1.500 V. En algunas máquinas más modernas esta inversión se realiza usando aparatos de potencia electrónica, como por ejemplo rectificadores de diodo.



**Figura 2. 8 Generador corriente continua**

Los generadores modernos de corriente continua utilizan armaduras de tambor, que suelen estar formadas por un gran número de bobinas agrupadas en hendiduras longitudinales dentro del núcleo de la armadura y conectadas a los segmentos adecuados de un conmutador múltiple. Si una armadura tiene un solo circuito de cable, la corriente que se produce aumentará y disminuirá dependiendo de la parte del campo magnético a través del cual se esté moviendo el circuito. Un conmutador de varios segmentos usado con una

armadura de tambor conecta siempre el circuito externo a uno de cable que se mueve a través de un área de alta intensidad del campo, y como resultado la corriente que suministran las bobinas de la armadura es prácticamente constante. Los campos de los generadores modernos se equipan con cuatro o más polos electromagnéticos que aumentan el tamaño y la resistencia del campo magnético. En algunos casos, se añaden interpolos más pequeños para compensar las distorsiones que causa el efecto magnético de la armadura en el flujo eléctrico del campo.

Los generadores de corriente continua se clasifican según el método que usan para proporcionar corriente de campo que excite los imanes del mismo. Un generador de excitado en serie tiene su campo en serie respecto a la armadura. Un generador de excitado en derivación, tiene su campo conectado en paralelo a la armadura. Un generador de excitado combinado tiene parte de sus campos conectados en serie y parte en paralelo. Los dos últimos tipos de generadores tienen la ventaja de suministrar un voltaje relativamente constante, bajo cargas eléctricas variables. El de excitado en serie se usa sobre todo para suministrar una corriente constante a voltaje variable. Un magneto es un generador pequeño de corriente continua con un campo magnético permanente.

#### **2.5.2.2. Generadores de corriente alterna**

Como se decía antes, un generador simple sin conmutador producirá una corriente eléctrica que cambia de dirección a medida que gira la armadura. Este tipo de corriente alterna es ventajosa para la transmisión de potencia eléctrica, por lo que la mayoría de los generadores eléctricos son de este tipo. En su forma más simple, un generador de corriente alterna se diferencia de uno de corriente continua en sólo dos aspectos: los extremos de la bobina de su armadura están sacados a los anillos colectores sólidos sin segmentos del árbol del generador en lugar de los conmutadores, y las bobinas de campo se excitan mediante una fuente externa de corriente continua más que con el generador en sí. Los generadores de corriente alterna de baja velocidad se

fabrican con hasta 100 polos, para mejorar su eficiencia y para lograr con más facilidad la frecuencia deseada. Los alternadores accionados por turbinas de alta velocidad, sin embargo, son a menudo máquinas de dos polos. La frecuencia de la corriente que suministra un generador de corriente alterna es igual a la mitad del producto del número de polos y el número de revoluciones por segundo de la armadura.

A veces, es preferible generar un voltaje tan alto como sea posible. Las armaduras rotatorias no son prácticas en este tipo de aplicaciones, debido a que pueden producirse chispas entre las escobillas y los anillos colectores, y a que pueden producirse fallos mecánicos que podrían causar cortocircuitos. Por tanto, los alternadores se construyen con una armadura fija en la que gira un rotor compuesto de un número de imanes de campo. El principio de funcionamiento es el mismo que el del generador de corriente alterna descrito con anterioridad, excepto en que el campo magnético (en lugar de los conductores de la armadura) está en movimiento.

La corriente que se genera mediante los alternadores descritos más arriba, aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero varias veces por segundo, dependiendo de la frecuencia para la que esté diseñada la máquina. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas, montadas a  $90^\circ$  una de otra, y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente, una de las cuales estará en su máximo cuando la otra sea cero. Este tipo de corriente se denomina corriente alterna bifásica. Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de  $120^\circ$ , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica. Se puede obtener un número mayor de fases incrementando el número de bobinas en la armadura, pero en la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo la corriente alterna trifásica, con el alternador trifásico, que es la máquina dinamoeléctrica que se emplea normalmente para generar potencia eléctrica.

### 2.5.3. TIPOS MÁS IMPORTANTES DE CENTRALES GENERADORAS

- Termoeléctricas
- Carboeléctricas
- Geotermoeléctricas
- Nucleoeléctricas
- Hidroeléctricas

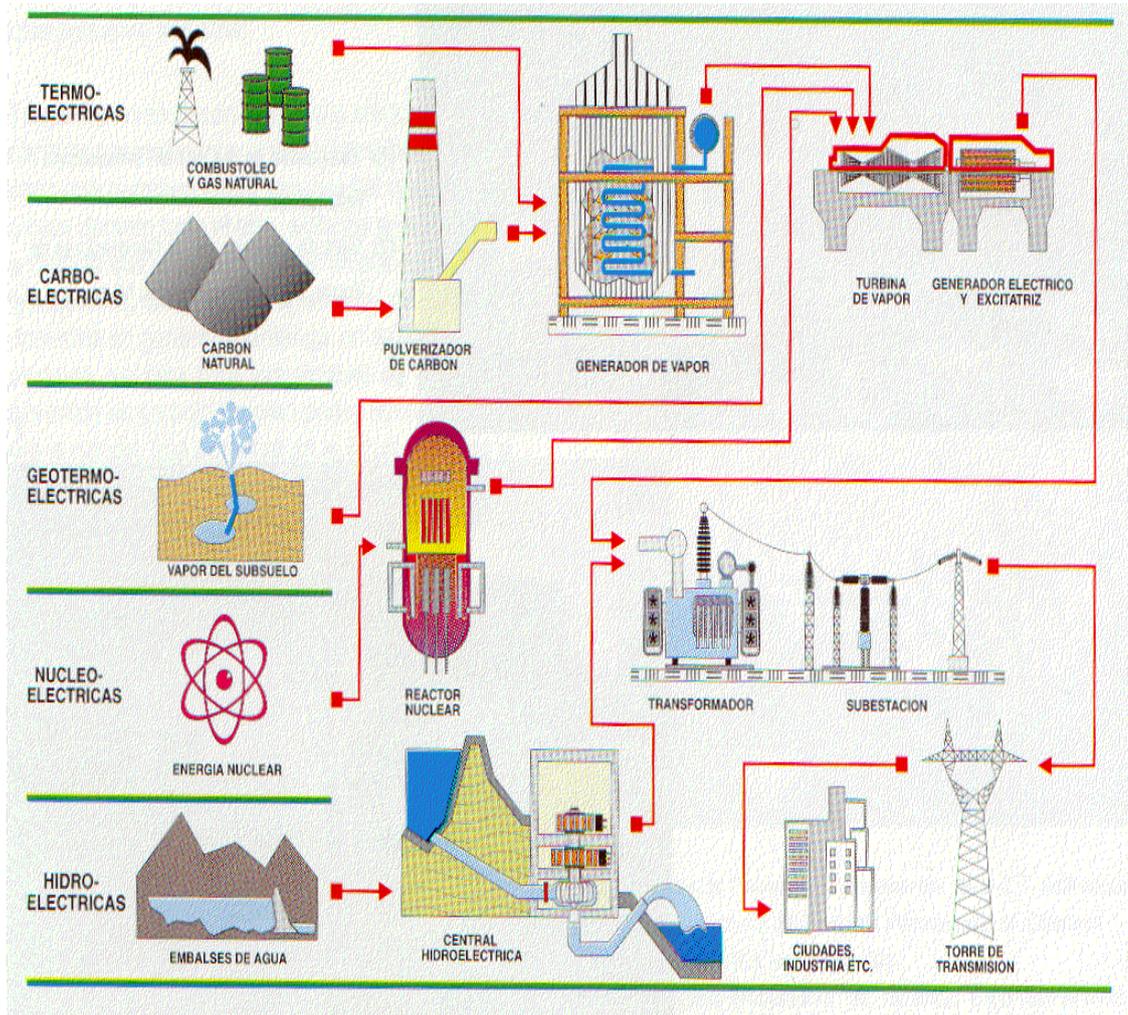


Figura 2. 9 Diagrama simplificado del proceso de producción de Energía

## 2.6. PILAS DE HIDRÓGENO

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno es obtenido directamente del aire.

También pueden ser usados otros tipos de combustibles que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diesel entre otros



**Figura 2. 10 Pilas de Hidrógeno**

Debido a que la generación de energía eléctrica es directa, la eficiencia que alcanza una celda de combustible puede ser muy elevada, además al no tener partes en movimiento son muy silenciosas. Sumado a todo esto hay que agregar que la celda de combustible no usa la combustión como mecanismo de generación de energía, lo que la hace prácticamente libre de contaminación. Las celdas de combustible individuales pueden combinarse para producir motores más potentes impulsados por ejemplo a hidrógeno. Pueden ser

fabricadas de distintos tamaños y para distintas aplicaciones que van desde su uso en telefonía celular, hasta el uso de éstas para impulsar automóviles.

### **2.6.1. FUNCIONAMIENTO**

El funcionamiento de una celda de combustible consiste básicamente en la oxidación del hidrógeno en agua, generando energía eléctrica y calor directamente, sin pasar por generadores u otros artefactos. Toda celda de combustible está compuesta por un ánodo, un cátodo y electrolitos. Sin embargo, siendo la oxidación del hidrógeno igual para todos los tipos de celdas de combustible, los materiales usados en éstas son muy variados. La reacción producida da lugar a la formación de electricidad, calor y agua.

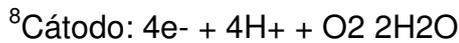
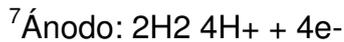
Esto se logra alimentando el hidrógeno en el ánodo de la celda y el oxígeno en el cátodo, los cuales están separados por una membrana electrolítica. La reacción se produce dentro de la celda misma. La producción de agua toma lugar en distintas partes de la celda dependiendo del electrolito utilizado.

El hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, donde una cubierta de platino ayuda a quitar los electrones a los átomos de hidrógeno dejándolo ionizado, o sea, en forma de protones ( $H^+$ ). La membrana electrolítica permite el paso solo de los protones hacia el cátodo.

Debido a que los electrones no pueden pasar a través de la membrana, se ven forzados a salir del ánodo por un circuito externo como forma de corriente eléctrica, ésta es la corriente eléctrica que se utiliza para hacer funcionar los artefactos. Luego, a medida que el cátodo deja fluir a través de él al oxígeno, éste se combina con los protones y los electrones anteriormente citados para formar agua. Como esta reacción naturalmente está desplazada hacia la formación de agua, cuando se produce, se libera energía en forma de calor.

Esta una reacción positiva y por lo tanto exotérmica.

El proceso químico que se lleva a cabo es el siguiente:



Esta operación se puede hacer de manera continua si los suministros de componentes se hacen en forma constante y a un régimen de flujo estable.

En este tipo de operación, al hacerse en forma isotérmica, las limitaciones termodinámica para el rendimiento no existen (Ciclo de Carnot)

## **2.6.2. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE**

### **2.6.2.1. Ácido fosfórico (PAFC)**

Temperatura de operación: ~ 220 °C Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas, hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia - y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración - comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna.

Este tipo de celdas puede ser usado en vehículos grandes como autobuses y locomotoras. Existen en producción comercial unidades de alrededor de 200kw.

---

<sup>7</sup> Ánodo, El ánodo es un electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual un material, al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.

<sup>8</sup> Cátodo, Un cátodo es un electrodo en el que se genera una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al aportarle electrones.

### **2.6.2.2. Polímero sólido (PEM)**

Temperatura de operación: 50 - 100 °C. Tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial de energía bastante importante, tal como en el caso de automóviles, de acuerdo con el Departamento de

Energía de los Estados Unidos, "son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios y potencialmente otras aplicaciones mucho más pequeñas tales como baterías recargables para videocámaras por ejemplo.

### **2.6.2.3. Carbonato fundido (MCFC)**

Temperatura de operación: ~ 600 °C Las celdas de combustible de <sup>9</sup>carbonato fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles a base de carbón.

En este tipo de celdas es aprovechada la electricidad y el calor generado.

### **2.6.2.4. Oxido sólido (SOFC)**

Temperatura de operación: 500 - 1000 °C

Es una celda de combustible altamente prometedora, podría ser utilizada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de éstas en vehículos motores. Las unidades que se abrigan van desde 25 hasta 100kw de potencia. Un sistema de óxido sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación sea muy elevada. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%.

---

<sup>9</sup> Carbonatos son las sales del ácido carbónico o con el grupo R-O-C(=O)-O-R'.

### **2.6.2.5. Alcalinas<sup>10</sup>**

Temperatura de operación: 50 - 250 °C Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta un 70%.

Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando la forma de reducir los costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

### **2.6.3. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

El hidrógeno a ser utilizado en las celdas de combustible puede obtenerse a partir de varias formas, utilizando diversos equipamientos y combustibles.

#### **2.6.3.1. Producción de hidrógeno a partir de energía solar**

En el ciclo del hidrógeno solar la electricidad producida por los módulos solares opera un equipo de electrólisis que divide el agua en sus dos componentes elementales, hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). El oxígeno se libera al aire y el hidrógeno se bombea a los tanques, donde es almacenado en el lugar de producción.

#### **2.6.3.2. Producción de hidrógeno a partir de metano (CH<sub>4</sub>):**

Cuando la cantidad de energía requerida es importante, como por ejemplo para abastecer una industria, edificios, etc., lo más conveniente es adoptar un sistema alimentado a gas natural o metano. Este sistema se basa en la oxidación del metano produciendo dióxido de carbono e hidrógeno, el cual pasa a alimentar las celdas de combustible. Generalmente las celdas de combustible tienen una eficiencia del 40%, por otro lado un procesador de combustible tiene una eficiencia de aproximadamente el 80%.

---

<sup>10</sup> Alcalina, son aquellos que están situados en el grupo 1 de la tabla periódica (excepto el Hidrógeno que es un gas)

Por lo tanto la eficiencia total del sistema "procesador + celda de combustible" es de alrededor del 30%. La producción de hidrógeno a partir de metano se basa en la siguiente reacción química:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$   $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$   $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$

# CAPÍTULO 3

## ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

### 3.1. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONALIDAD

La máquina debe tener las siguientes características:

- **Almacenamiento**

Debe contar con un sistema de almacenamiento de tal manera que por ningún motivo el fluido almacenado se congele.

- **Transportable**

El prototipo debe tener las medidas y pesos adecuados para que pueda ser desplazado a cualquier lugar donde se necesite generar agua.

- **Capacidad**

La máquina tiene la capacidad de extraer de 200 litros/día por persona.

### 3.2. PARÁMETROS PARA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Los parámetros o especificaciones de selección de alternativas para el diseño y para la construcción del prototipo de extracción de agua son las siguientes:

- **Funcionalidad**

Este es el parámetro más importante, porque el prototipo debe cumplir con las características planteadas en el párrafo 3.1.

- **Rendimiento**

El parámetro rendimiento define el porcentaje de fluido derretido y extraído reservorio.

- **Mantenimiento**

Los elementos que conforman el prototipo la maquina deben ser los más sencillos para que el mantenimiento sea el mínimo, además sus repuestos deben ser fáciles de obtener en el mercado nacional.

- **Procesos de fabricación**

El proceso de fabricación debe ser lo menos complejo posible, así; tiene que ser acorde a los materiales y maquinaria que se encuentra disponible en el medio, con el fin de tener un tiempo de fabricación rápido.

- **Riesgo operacional**

En mayor o menor medida todo riesgo puede devenir en resultados no planeados ni deseados por la manipulación de la máquina, siendo un aspecto importante para el desarrollo del proyecto.

- **Costo de inversión**

El costo es un factor a considerar que no puede ser elevado y debe oscilar entre \$2200 y \$2700.

### **3.3. ALTERNATIVAS A UTILIZAR**

Para derretir el hielo antártico, es necesario alternativas de energía; vamos a citar las alternativas más viables y conocidas para dicho proyecto, tomando en cuenta las condiciones en las cuales se va a trabajar.

Cabe recalcar que como condición para la construcción del prototipo, se tiene que realizarlo con energías alternativas.

### **3.3.1. GENERADORES ELÉCTRICOS**

Actualmente en la base ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado de la Antártica se tiene sistemas de generación de energía, que funcionan a base de diesel. Estos generadores se encargan de proveer de energía a toda la estación, equipos y elementos que se utilizan para desarrollar investigaciones y otros proyectos.

Nuestra idea es utilizar parte de esta energía para el desarrollo de nuestro proyecto, ya que está instalada en el mismo lugar de trabajo. Esta energía servirá para encender a las resistencias eléctricas y estas transformen esta energía en calor, esto es lo que nos dará la pauta para derretir el hielo.

### **3.3.2. MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Otra opción es la utilización de un motor de combustión interna, el cual se acoplaría al eje un <sup>11</sup>dinamo, y este serviría como generador de electricidad; mas este también necesitaría combustible de la misma forma que el generador nombrado en el ítem anterior.

### **3.3.3. ENERGÍAS ALTERNATIVAS**

Una de las fuentes de energía más saludable, son las energías alternativas.

#### **3.3.3.1. Energía eólica**

Una de las mejores opciones para ahorrar energía sería esta, pero en las condiciones de la antártica el viento es de 320 km/h; es una condición demasiado extrema, pero se podría diseñar un sistema para que el generador se adecúe a estas condiciones.

---

<sup>11</sup> Dínamo, es un generador eléctrico destinado a la transformación de energía mecánica en eléctrica

### **3.3.3.2. Energía solar**

En la temporada de invierno la Antártica se oscurece permanentemente, así que una idea de celdas <sup>12</sup>fotovoltaicas, o un panel solar sería nula.

### **3.3.3.3. Biomasa**

Una planta de transformación de biomasa, se la podría adaptar; pero la descomposición de las sustancias orgánicas sería muy lenta, ya que las temperaturas son muy bajas llegan casi a los -80 °C y esto de asemejaría a un refrigerador. El tiempo para la obtención de un combustible sería demasiado largo.

## **3.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **3.4.1. MATRIZ DE PONDERACIÓN**

En esta matriz se resalta la importancia de cada parámetro de decisión que fue descrito en el subcapítulo 3.2 clasificados en varios criterios. La ponderación de dichos criterios se encuentra en la siguiente tabla.

---

<sup>12</sup> Fotovoltaicos, están formados por dispositivos semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos

**Tabla 3. 1 Ponderación**

<b>Criterio</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Ponderación (%)</b>
Técnico	Funcionalidad	20
	Rendimiento	10
	Mantenimiento	10
	Procesos de Fabricación	10
Seguridad Industrial	Riesgo Operacional	20
Económico	Costo de inversión	30
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>

**Tabla 3. 2 Matriz de decisión**

		<b>ALTERNATIVAS</b>		
<b>CARACT</b>	<b>PONDER</b>	<b>EÓLICA</b>	<b>SOLAR</b>	<b>BIOMASA</b>
Funcionalidad	20	20	14	15
Rendimiento	10	9	5	6
Mantenimiento	10	7	6	5
Procesos de Fabricación	10	8	6	8
Riesgo Operacional	20	18	16	16
Costo de inversión	30	22	27	28
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>84</b>	<b>74</b>	<b>78</b>

### **3.4.2. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS**

Mediante la matriz de resultados, nuestra mejor alternativa es la de energía eólica, la cual obtuvo mejor puntuación.

### **3.4.3. ESPECIFICACIONES DE LA SOLUCIÓN**

- **ESTRUCTURA EXTERIOR DE ACERO A-36**

Es un material de fácil obtención en sus diferentes formas, en el mercado nacional y sus propiedades mecánicas satisfacen las necesidades del prototipo.

- **ROTOR**

Se caracteriza por ser un elemento que mediante la velocidad del viento obtendremos una cierta cantidad de revoluciones la cual ocuparemos para el siguiente elemento de nuestro diseño.

- **SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA POR BANDAS**

Se identifica por ser un sistema de transmisión con bandas, que no tiene lubricación y contiene un sistema de poleas que le permite alcanzar la velocidad requerida para el funcionamiento del prototipo

- **MECANISMO DE GIRO**

Se caracteriza por ser tener un sistema de rodamientos con un coeficiente de rozamiento muy bajo ya que necesitamos obtener la mayor velocidad posible por parte del viento.

# **CAPÍTULO 4**

## **DISEÑO DEL SISTEMA**

### **4.1 PROPÓSITO**

Se espera obtener el diseño de un sistema de generación eléctrica a base de los vientos antárticos, el cual sirva para abastecer de agua en algún caso emergente, en el cual no funcione el generador de energía a base de diésel a la estación Pedro Vicente Maldonado.

### **4.2. DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA**

La máquina consta de los siguientes sistemas o subconjuntos:

- Soporte estructural exterior.
- Sistema generador de potencia.
- Conjunto resistencia y bomba extractora.
- Sistema de control.

#### **4.2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO**

El diseño se fundamenta en la investigación de la antártica:

- Temperatura crítica de  $-80^{\circ}\text{C}$ .
- Vientos máximos de 320km/h.
- Energía eólica como alternativa.

El Generador real va a diseñarse para mantener en una situación de riesgo a 15 personas de manera que puedan estar tranquilos sin falta de agua ni exceso

de la misma. Este sistema servirá como abastecimiento de emergencia no es permanente.

#### **4.2.2. FACTOR DE SEGURIDAD**

La confiabilidad es la probabilidad de que el equipo (como partes, ensambles, componentes, máquinas y sistema de máquinas) realizará la función propuesta de manera satisfactoria, o sin falla.

En muchas aplicaciones el motivo de las fallas está dado por una sobrecarga de esfuerzos, corrosión, desgaste y distorsión, a continuación se detalla los valores de factores de seguridad.

$N = 1.2 - 1.5$  para materiales excepcionales confiables usados bajo condiciones controladas y sujetos a cargas y esfuerzos que puedan determinarse con exactitud, un punto importante es que casi siempre se usa para cargas pequeñas.

$N = 1.5 - 2$  se utiliza para materiales bien conocidos, en condiciones de medio ambiente razonable y sujetos a esfuerzos que puedan calcularse con facilidad.

$N = 2 - 2.5$  se utiliza para materiales promedio que trabajen en condiciones de medio ambiente ordinarias y con cargas que se puedan calcular.

$N = 2.5 - 3$  se utiliza para materiales poco conocidos o para materiales frágiles en condiciones promedio.

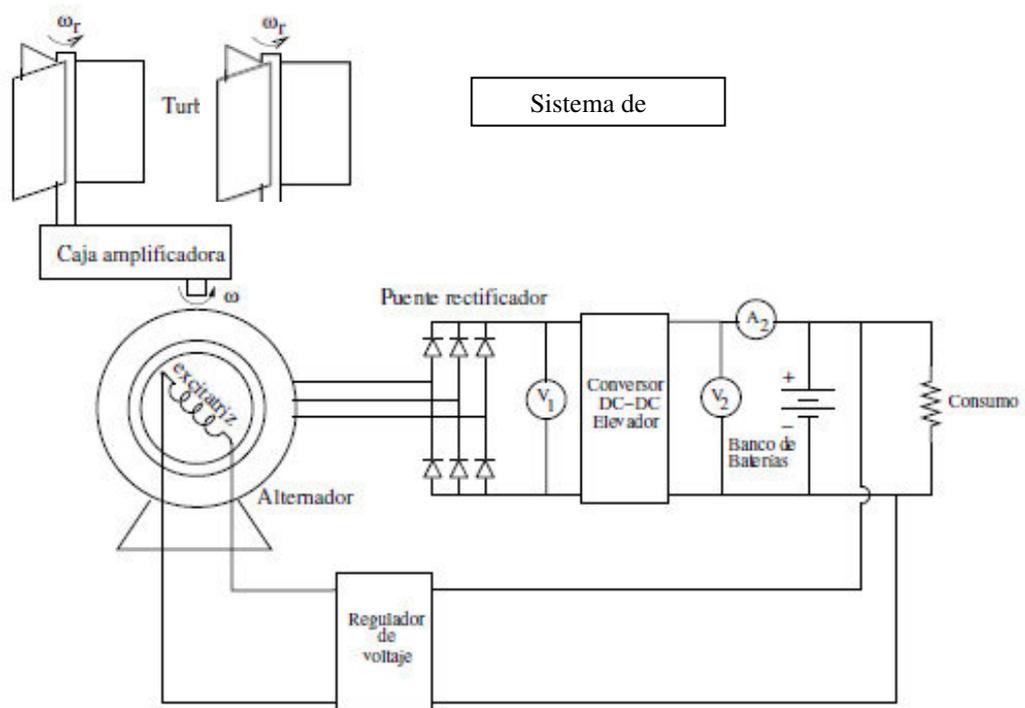
$N = 3 - 4$  se utiliza para materiales conocidos los cuales vayan a trabajar en condiciones ambientales inciertas y sujetos a esfuerzos inciertos.

En el presente trabajo los elementos que directamente tendrán factores de seguridad serán los que constituyen el prototipo eólico, ya que este tendrá ejes, aletas, estructura soportante.

#### **4.2.3 ESQUEMA DE LA MÁQUINA**

Para el desarrollo del sistema principal, se ha tomado los datos reales del prototipo creado en el capítulo 4.

Para los requerimientos establecidos en la Zona Antártica, se ha optado como forma más fácil y simple la construcción de un conjunto sistemas eólicos; ya que si se trata de diseñar uno solo el tamaño se excede.



**Figura 4.1 Esquema del Sistema**

El esquema general ilustra las distintas componentes a diseñar para que el conjunto de aerogeneradores tenga un soporte completo y sea conectado a un banco de baterías cualquiera, para que el momento emergente sea activado y provea agua a dicha estación.

Respecto a este esquema se resaltan las siguientes partes:

- Sistema de generadores eólicos tipo Savonius
- La caja amplificadora de RPM para cada generador.
- Alternador para cada Savonius
- El banco de baterías,
- El micro controlador: encargado de ejercer un correcto control sobre las partes.

## **4.3. DISEÑO DEL SISTEMA**

Para este diseño se complementa todos los cálculos desarrollados en el capítulo 4, por esta razón se empezará con el análisis de vientos y la energía que se necesita obtener para el abastecimiento de la estación.

### **4.3.1. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO**

- Es un sistema que funcionará solo en invierno.
- El sistema deberá actuar como emergente cuando suceda algún daño en la planta de generación de electricidad.
- El sistema deberá proveer agua a una cantidad de 15 personas, y les servirá para solucionar sus necesidades básicas.

### **4.3.2. CÁLCULOS DE ENERGÍA REQUERIDA.**

La energía que se requiere depende de la cantidad de agua  $q$  que se necesite conservar y esta cantidad depende de las necesidades básicas que requieren aproximadamente 15 personas, las cuales van a estar en dicha estación el invierno.

La cantidad promedio de agua que una persona necesita cada día para mantenerse aproximadamente es:

- Para beber  
1 a 3 litros de agua para beber, la OMS recomienda que cada persona beba unos 3 litros de agua al día.
- Para limpiar objetos y preparar alimentos  
2 a 3 litros de agua para preparar alimentos y lavar los trastos. Esta es una de las áreas donde más podemos vigilar para ahorrar agua.
- Para aseo personal  
6 a 7 litros de agua para el aseo personal. Esta es sin duda el consumo de agua donde más podemos ahorrar y vigilar.
- Para lavar la ropa

a 6 litros de agua para lavar la ropa. Podemos hacer acciones para gastar menos agua por persona en las tareas de limpieza de la ropa.

- Para limpiar sitios públicos

1 a 2 litros de agua por persona para mantener limpios los espacios públicos. Los organismos públicos y privados están haciendo esfuerzo en esta línea.

Por lo tanto en un momento de emergencia el cual estamos tratando, el estimado de agua por persona es de 20 litros.

Mediante este análisis la proporción de agua para abastecer a estas personas es de:

$$\text{Total} = \text{Litros} \cdot \# \text{Personas} = 20 \cdot 15 = 300 \text{ litros.}$$

El prototipo diseñado en el capítulo 4 abarca una cantidad de 5 kg de agua en 5 minutos, además de ello se lo realizó en las condiciones más extremas de Ecuador que son: vientos de 40km/h, y temperaturas de 10 °C.

Con estas condiciones se obtuvo una producción neta de energía de 670 Watios, los cuales fueron suficientes para llegar a cumplir la meta.

### **Litros Obtenidos en Ecuador**

$$m_{H2O} := 5000 \quad \text{gr}$$

$$\delta H := 1 \quad \frac{\text{cm}^3}{\text{gr}}$$

$$\text{vol} := m_{H2O} \cdot \delta H_{20} \cdot \frac{1}{1000} \text{ Litros}$$

$$\text{vol} = 5.00 \text{ Litros}$$

Esta cantidad se la obtuvo con 421,7 watios de energía; además de ello en un tiempo estimado de 5 minutos, que en la realidad fueron de 8 a 10 minutos.

Por lo cual se seccionó al día para de esta manera tener un tiempo en el cual la máquina derrita el agua, almacene y la mantenga sin congelación; y el tiempo que sobra tiene que estarse cargando el sistema de baterías. Con los vientos en Ecuador nuestro sistema de baterías tarda en cargarse aproximadamente de 3 a 4 horas. Por motivos de circunstancias adversas y análisis de vientos en Ecuador, se ha procedido a que el tiempo de carga de la batería va a ser de 5 horas; y por esta razón los periodos de abastecimiento de agua se los ha distribuido de la siguiente manera.

Empieza la operación de derretimiento a las 5 de la mañana, por lo que después de 10 minutos se tiene el agua lista, después de este lapso de 5 horas la máquina tiene que realizar la carga de la batería hasta las 10:10 de la mañana y de esta manera el sistema lo haría constantemente, de manera que los 20 litros de agua promedio que necesita una persona en caso de emergencia lo estarían satisfaciendo de una manera óptima. En la antártica las condiciones son más severas; la media de los vientos son de 100 km/h, y la temperatura crítica es de -80 °C, a lo cual vamos a obtener la energía requerida para los 300 litros aproximadamente necesarios.

### **Energía necesaria para derretir los 300 litros de agua en la antártica.**

Para comenzar a realizar el cálculo de energía requerida primeramente vamos a seccionar en cuatro lapsos de tiempo en los cuales se va a realizar la carga de las baterías:

$$\text{Lit\_nec} := 300 \quad \text{Litros}$$

$$\text{Lapsos} := 4$$

$$\text{LitxLaps} := \frac{\text{Lit\_nec}}{\text{Lapsos}}$$

$$\text{LitxLaps} = 75.00 \quad \text{Litros}$$

Por lo tanto en cada lapso necesitamos extraer alrededor de 75 litros, los cuales una parte se tiene que derretir una capa de hielo de 15 centímetros de profundidad y alrededor de un diámetro de 20centímetros. Lo cual nos da una cantidad de 5 litros.

### **DISEÑO ENERGÉTICO**

Energia Entrada - Energia Salida= Energia Sistema

$$E_{\text{entrada}} = \Delta H_{\text{hielo}} + \Delta E_{\text{vase}}$$

$$Cp_{\text{Hielo}} := 1.93 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{K}}$$

$$\text{Masa} := 5 \quad \text{Kg}$$

$$\text{Tiem}_{\text{derretir}} := 5 \quad \text{min}$$

$$Cp_{\text{H}_2\text{O}} := 4.217 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{k}}$$

$$\Delta T_{\text{hielo}} := 1 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{H}_2\text{O}} := 4 - 1 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$\text{FS} := 0.15$$

$$E_{\text{entra}} := (\text{Masa} \cdot \text{Cp}_{\text{Hielo}} \cdot \Delta T_{\text{hielo}})$$

$$E_{\text{entra}} = 9.65 \quad \text{KJ}$$

$$E_{\text{entr}_t} := \frac{E_{\text{entra}}}{150} \cdot 1000 = 64.33 \quad \text{W}$$

$$E_{\text{H2O}} := (\text{Masa} \cdot \text{Cp}_{\text{H2O}} \cdot \Delta T_{\text{H2O}})$$

$$E_{\text{H2O}} = 63.25 \quad \text{KJ}$$

$$E_{\text{H2O}_t} := \frac{E_{\text{H2O}}}{150} \cdot 1000 = 421.70 \quad \text{W}$$

$$\text{Pot}_{\text{req}} := E_{\text{H2O}_t} + E_{\text{H2O}_t} \cdot \text{FS}$$

$$\text{Pot}_{\text{req}} = 484.95 \quad \text{W}$$

En consecuencia la energía que se va a requerir en cada lapso es de 484.95 vatios.

Se plantea colocar una bomba para extraer el agua de 1/4 hp, la cual consume aproximadamente 187,5 vatios, y es realmente suficiente para extraer los 75 litros en aproximadamente 20 minutos después de haber descongelado la capa de hielo. Se plantea utilizar aislante sobre toda la tubería hasta el tanque de abastecimiento, la cual tenga una resistencia interna de aproximadamente 1000 vatios.

Ya que el sistema en la Antártica requiere de un conjunto de baterías para el almacenamiento de energía, se tiene por obligación una resistencia para la

calefacción de las baterías, ya que estas son a base de agua y se tiene que evitar el congelamiento de las mismas; además de ello está también mantendrá al sistema de control fuera de temperaturas críticas.

Ya que interviene el mismo cálculo para derretir el agua aproximadamente esta resistencia necesitará de 700 watios. Dando un total de energía requerida de: 2373 watts aproximadamente

### **4.3.3. CÁLCULOS SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

#### **DISEÑO DEL SISTEMA**

Ya hechas las respectivas pruebas en el Nevado Antisana se ha obtenido:

Con vientos a 40km/h el savonius gira a 40 RPM, la relación de transmisión final es de 1/20; por esta razón en el eje de ingreso al alternador se tiene 800 RPM. El torque generado por el Savonius es de 10,66 N.m y el necesitado por el alternador es de 6N.m, con lo cual se tiene una seguridad de giro sin ningún problema.

Con todos estos datos reales se obtiene una generación de energía de 12 voltios, con lo cual se puede sin dificultad derretir el hielo, ya que se ha diseñado una resistencia para este voltaje. Las pruebas realizadas fueron hasta el punto de llegar a derretir el hielo; ya que los vientos en el Ecuador no son tan grandes. El propósito se lo cumplió con 422 watios, ahora tenemos que implementar un nuevo diseño que nos provea 2373 watios. Por lo tanto vamos a proponer el primer diseño que se planteó en Ecuador que era el funcionamiento con un generador de electricidad por giro, o el diseño con un alternador variando los polos.

#### **4.3.3.1. Diseño y cálculos del alternador**

Los alternadores de flujo axial de imanes permanentes son compactos, tienen un buen rendimiento y no necesitan excitación externa. Esto hace que puedan ser usados como generadores de alta y baja velocidad. Tienen las ventajas de tener una densidad de potencia alta, y al fabricarse de forma

modular es muy fácil ampliarlos e integrarlos con otros componentes mecánicos, como turbinas. La tensión a la salida normalmente debe ser rectificadora e invertida con un convertidor estático.

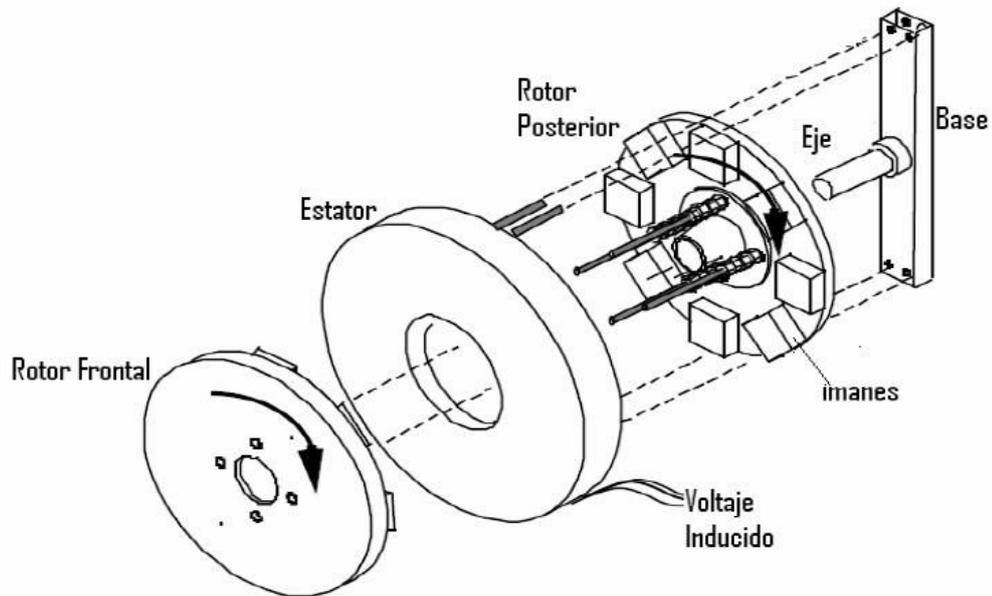
Los alternadores de baja velocidad suelen ser usados en turbinas eólicas. Con la energía eólica presentándose como una de las alternativas más fiables como fuente de energía alternativa, los alternadores de flujo axial ofrecen una solución eficiente y de bajo coste comparado con el resto de tecnologías, como pueden ser los paneles solares. Además, al funcionar a bajas velocidades se evita el uso de mecanismos de multiplicación de velocidad, con lo que se reduce el coste y se aumenta el rendimiento al disminuir las pérdidas mecánicas.

Las máquinas de flujo axial son especialmente recomendables en aplicaciones donde se cumplen los siguientes requisitos:

- Bajas velocidades.
- Pares elevados.
- Bajo peso.
- Sobrecargas elevadas y frecuentes.

Las máquinas eléctricas de flujo axial pueden diseñarse con una relación potencia/peso mucho más alto que las máquinas de flujo radial para rendimientos similares. Esta relación tan alta se consigue con un número de polos elevado. Como se puede observar en la figura 18, al aumentar el número de polos aumenta la densidad de potencia, por lo que se consigue mayor potencia con una máquina más ligera. Por tanto, este tipo de máquinas son recomendables en aquellas aplicaciones que requieran pares elevados y velocidades bajas.

En un generador de flujo axial, el flujo magnético pasa por las bobinas en dirección paralela al eje de la máquina. El diseño aquí presentado se compone de un rotor frontal de acero, un estator de madera sin ranuras, sobre el cual se arrollará directamente el bobinado, y un rotor posterior también de acero. Ambos rotores y el estator están unidos por un eje longitudinal.



**Figura 4.2 Partes de un Alternador**

Sin ingresar en estos cálculos, los requerimientos para la fabricación de dicho elemento nos dice que son la velocidad del viento a la cual va a trabajar y el tamaño de las palas del savonius.

Velocidad de diseño= 150km/h- aprox 42 m/s

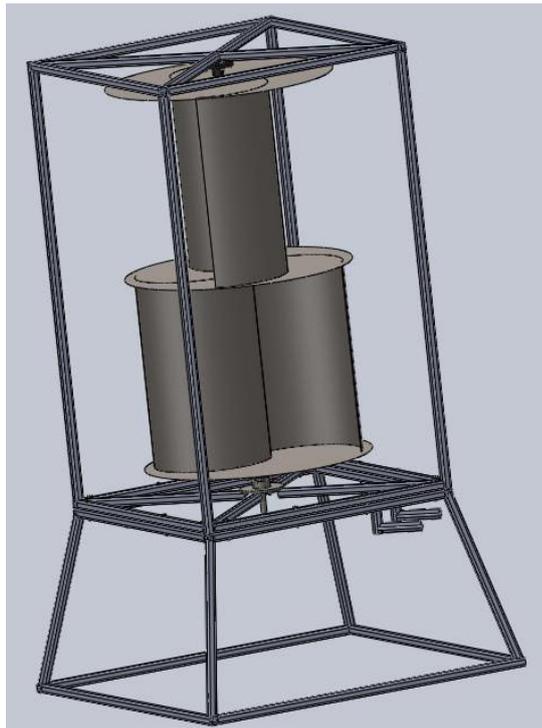
Y las medidas que vamos a proponer del Savonius van a ser las mismas del actual que tenemos para que no se desperdicie el diseño ya construido en Ecuador.

$$\text{Area\_Real\_aprox} := \frac{10.87 \cdot 0.035}{0.17} = 2.24 \text{ m}^2$$

H\_req := 1.1 m      Altura de la aspa del savonius

$$Da_{req} := \left[ \frac{Pot_{req}}{0.18 \cdot H_{req} \cdot \left( \frac{2 \cdot V_{dis}}{3} \right)^3} \right] = 1.94 \quad \text{Diámetro total del Savonius}$$

Por esta razón se diseñó al savonius de dos pisos el cual se tiene en la figura.



**Figura 4.3. Savonius construido.**

Con estos datos el diseño implementado por el fabricante nos dice que va a ser:

Un alternador de 16 polos de 24 voltios y una potencia de 2500 watts, el cual comienza la carga en 400 RPM y un torque de 14 N.m Los cuales nos servirán para abastecer todo el sistema de abastecimiento de agua.

O también se puede tomar como opción la de utilizar el generador.

Este generador tiene como especificaciones:

Honda EM-2500 es un generador portátil accionado con combustible, denominado así por los 2.500 watts de potencia que emite. Es ideal para utilizarlo desde en campamentos o hasta para ejecutar sistemas para bombas de muestreo.

- **EL MOTOR**

El EM-2500 está equipado con un motor OHV monocilíndrico enfriado por aire. Tiene un desplazamiento de 9,9 pulgadas cúbicas (162 cm<sup>3</sup>) y un diámetro de 2,7 pulgadas (6,9 cm) con un recorrido de 1,8 pulgadas (4,6 cm), su compresión es de 8,5 en 1 y funciona a 3.600 revoluciones por minuto. También tiene un sistema de encendido magneto transistorizado y una potencia de salida de 5,5 caballos de fuerza.

- **LA POTENCIA DE SALIDA**

El EM-2500 es un generador del tipo A, lo que significa que las bobinas inductrices eléctricas están conectadas externamente. La corriente alterna (CA) de salida es de 2.500 watts a 120 voltios, con una frecuencia de salida de 60 Hz. y una salida de amperios de 9,2 A. Por otro lado, la corriente directa (CD) de salida es de 100 watts a 12 voltios, con una salida de 8,3 A.

#### **4.3.4. REDISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE**

Nuestro generador prototipo nos dio una cantidad de 670 wattios totales, con lo cual el diseño actual a realizar se lo va a hacer con 5000 watts.

Por datos estadísticos e investigaciones realizadas, el Continente Antártico; conocido también como sexto continente, es el más elevado de la Tierra, con una altitud promedio de 2000 msnm. Con este dato procederemos al cálculo de la densidad del aire para sacar las presiones del mismo.

La Antártida es el continente más ventoso. Debido a la influencia de la gravedad los vientos corren desde el Polo hacia las costas, y llegan a alcanzar velocidades superiores a los 300 km/h. Pero la media se encuentra entre 100 km/h y 300 km/h.

Por lo tanto se va a diseñar con una medida de viento de 150 km/h.

**De tablas Presión del viento en función de su velocidad tenemos**

$$\text{Velocidad Ant} = 150 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

A una velocidad de entrada de 150 aprox 151.2 existe una presión de 1078 (N/m<sup>2</sup>)

Entonces:

$$P_v := 1078 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Presión frontal del viento, en función de su velocidad.

v (m/s)	v (km/h)	p (N/m <sup>2</sup> )	p (kp/m <sup>2</sup> )	v (m/s)	v (km/h)	p (N/m <sup>2</sup> )	p (kp/m <sup>2</sup> )
5	18	15	1.6	33	118.83	666	67.9
6	21.6	22	2.2	34	122.4	707	72.1
7	25.2	30	3.1	35	126	749	76.4
8	28.8	39	4	36	129.6	792	80.9
9	32.4	50	5.1	37	133.2	837	85.4
10	36	61	6.2	38	136.8	883	90.1
11	39.6	74	7.5	39	140.4	930	94.9
12	43.2	88	9	40	144	978	99.8
13	46.8	103	10.5	41	147.6	1028	104.9
14	50.4	120	12.2	42	151.2	1078	110
15	54	138	14	43	154.8	1130	115.4
16	57.6	157	16	44	158.4	1184	120.8
17	61.2	177	18	45	162	1238	126.3
18	64.8	198	20.2	46	165.6	1294	132
19	68.4	221	22.5	47	169.2	1351	137.8
20	72	245	25	48	172.8	1409	143.7
21	75.6	270	27.5	49	176.4	1468	149.8
22	79.2	296	30.2	50	180	1528	156
23	82.8	323	33	51	183.6	1590	162.3
24	86.4	352	35.9	52	187.2	1653	168.7
25	90	382	39	53	190.8	1717	175.2
26	93.6	413	42.2	54	194.4	1783	181.9
27	97.2	446	45.5	55	198	1849	188.7
28	100.8	479	48.9	56	201.6	1917	195.6
29	104.4	514	52.5	57	205.2	1986	202.7
30	108	550	56.1	58	208.8	2057	209.9
31	111.6	588	60	59	212.4	2128	217.2
32	115.2	626	63.9	60	216	2201	224.6
				61	219.6	2275	232.1
				62	223.2	2350	239.8
				63	226.8	2427	247.6
				64	230.4	2504	255.5
				65	234	2583	263.6
				66	237.6	2663	271.8
				67	241.2	2744	280
				68	244.8	2827	288.5
				69	248.4	2911	297
				70	252	2996	305.7
				71	255.6	3082	314.5
				72	259.2	3169	323.4

Tabla 4.1 Tabla de Presión Vs Velocidad del Aire

Densidad del aire en función de la altura

$$Da = 348.42 * (1 - H * 1.05 E-4) / (T + 273)$$

Dónde: Da = densidad del aire (g / Litro)

P = presión barométrica (psi)

T = temperatura (°C)

H = altura sobre el nivel del mar (m)

Datos:

$$H_{exp} := 2000 \text{ msnn}$$

$$T_{exp} := -80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho := \frac{348.42 \cdot (1 - H_{exp} \cdot 0.000105)}{(T_{exp} + 273)}$$

$$\rho = 1.426 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ya una vez obtenidos estos datos vamos a verificar si las partes del savonius tienen que rediseñarse:

$$V_{dis} := 150 \frac{Km}{h} \quad \text{Velocidad de diseño} = 150km/h \text{ aprox } 42 \text{ m/s}$$

$$V_{dis} := 42 \frac{m}{s}$$

$$V_{prueba} := V_{dis}$$

$$V_{prueba} = 42 \frac{m}{s} \quad \text{Esta velocidad se toma ya que no se tiene un estudio amplio de vientos en invierno.}$$

Si en un área de 0.035 da un torque de 0.17 N.m entonces tenemos que:

$$\text{Area\_Real\_aprox} := \frac{10.87 \cdot 0.035}{0.17} = 2.24 \quad m^2$$

$H_{req} := 1.1 \quad m$  consideramos el área como una proyección rectangular en las semicircunferencias

$$D_{a\_req} := \frac{\text{Pot\_req}}{\left[ 0.18 \cdot H_{req} \cdot \left( \frac{2 \cdot V_{dis}}{3} \right)^3 \right]} = 1.67 \quad m$$

Por lo tanto se tiene que nuestro prototipo con las medidas que se tienen en Ecuador, tranquilamente funciona en la Antártica

Ahora vamos a verificar el diseño estructural:

#### 4.3.5. REDISEÑO Y CÁLCULO ALABES

$$H_{sa} := 1.10 \quad \text{m}$$

$$Ra_{sa} := 0.3137 \quad \text{m}$$

$$V_{sa} := 6.94 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{teo} := 0.18 \cdot H_{sa} \cdot Ra_{sa} \cdot 4 \cdot \left( \frac{2 \cdot V_{sa}}{3} \right)^3$$

$$P_{teo} = 24.61 \quad \text{W}$$

$$T_{sa} := 2.17 \quad \text{Nm}$$

$$\omega := 4.19 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

#### Potencia Convertida hasta el eje:

$$P_g := T_{sa} \cdot \omega$$

$$P_g = 9.09 \quad \text{W}$$

#### Eficiencia del Generador

$$\eta := \frac{P_g}{P_{teo}}$$

$$\eta = 0.37$$

### Velocidad adimensional periférica

$$u := \frac{\omega \cdot R_{a\_sa}}{V\_sa}$$

$$u = 0.19$$

### Perdidas de potencia en el eje

$$P_{per} := P_{teo} - P_g = 15.51 \quad W$$

### Fuerzas en el disco de revolución debido al viento:

$$I_z = \frac{1}{4} R^2 \cdot dm$$

$$I_z = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left( \frac{1}{4} \cdot \frac{R^2 M}{L} + \frac{M}{L} \cdot x^2 \right) dx = \frac{M}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left( \frac{1}{4} R^2 + x^2 \right) dx$$

$$I_z = \frac{M}{L} \left[ \left[ \frac{1}{4} R^2 \cdot x \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} + \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \right] = \frac{M}{L} \left[ \frac{1}{4} R^2 \left( \frac{L}{2} - \left( -\frac{L}{2} \right) \right) \right] + \left( \frac{\left( \frac{L}{2} \right)^3}{3} - \frac{\left( -\frac{L}{2} \right)^3}{3} \right)$$

$$I_z = \frac{M}{L} \left[ \frac{1}{4} R^2 \cdot L + \frac{L^3}{12} \right] = \frac{1}{4} R^2 \cdot M + \frac{1}{12} \cdot ML^2$$

$$I_z = \frac{1}{4} MR^2 + \frac{1}{12} ML^2$$

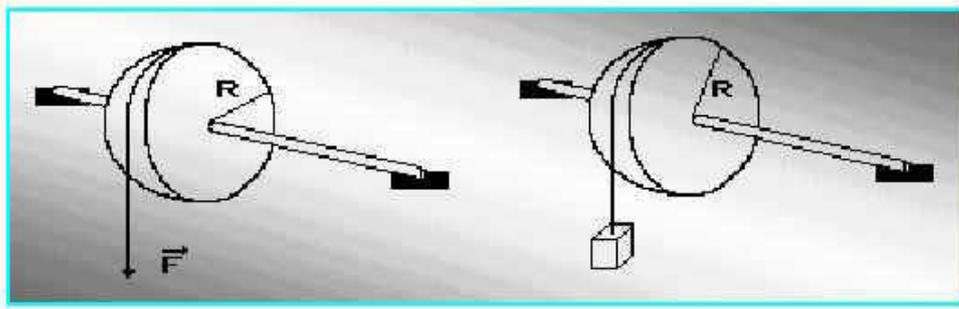


Figura 4.4 Fuerzas en discos de revolución.

$$\text{Tor\_req} = 6.63 \quad \text{N m}$$

Torque T

$$\delta_{\text{acero}} := 7850 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Inercia I

$$\text{Masa\_Disco} := 27.53 \quad \text{Kg}$$

Aceleración Angular

$\alpha$

$$\text{Long} := 0.03 \quad \text{m}$$

Aceleración Linear a

Volumen eje Veje

$$\text{Radio} := 0.61 \quad \text{m}$$

Densidad  $\delta$

$$I_{\text{Sol\_rig}} := \frac{1}{4} \cdot \text{Masa\_Disco} \cdot \text{Radio}^2 + \frac{1}{12} \cdot \text{Masa} \cdot \text{Long}^2$$

Longitud Eje L

Radio R

$$I_{\text{Sol\_rig}} = 2.57 \quad \text{Kg} \cdot \text{m}^2$$

Masa M

$$\alpha := \frac{\text{Tor\_req}}{I_{\text{Sol\_rig}}}$$

Fuerza ejercida F

$$\alpha = 2.58 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$a := \text{Radio} \cdot \alpha$$

$$a = 1.58 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Vol\_eje} := 0.0061 \text{ m}^3$$

$$F_{\text{aplic\_disco}} := \text{Vol\_eje} \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot a$$

$$F_{\text{aplic\_disco}} = 75.48 \text{ N}$$

### **COMO SON 3 DISCOS**

$$F_{\text{total}} := 3 \cdot F_{\text{aplic\_disco}}$$

$$F_{\text{total}} = 226.429 \text{ N}$$

$$X := 1950 \text{ mm}$$

$$q_{\text{dist}} := \frac{F_{\text{total}}}{X}$$

$$q_{\text{dist}} = 0.116 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Mediante estos resultados, ya que el torque es mucho menor, que el diseño que se presentó para Ecuador; la fuerza de empuje también disminuye, ya que no se opone mucha fuerza, por lo tanto se evitará el cálculo del eje y los rodamientos. Ya que soportaran sin ningún problema. Toda la estructura y el eje principal deben ser hechos de material A36 estructural, ya que aguanta tranquilamente las cargas de viento, nieve sismos entre las principales; ya que no nuestro diseño no está considerado como una gran estructura.

### **Selección de rodamientos:**

Se debe tomar en cuenta que bajo los parámetros de selección del capítulo 5, debido a fuerzas; se debe escoger el mismo rodamiento según el tamaño, pero con el criterio que debe ser para bajas temperaturas. O utilizar grasa para bajas temperaturas.

### **Material Eléctrico:**

En lo que compete a todo lo que se puede realizar respecto al sistema de control, no se tiene ningún tipo de criterio especial ya que al sistema de baterías, eléctrico se lo debe hermetizar y en ese lugar instalar la resistencia especificada para la calefacción y que los elementos no sufran cambios.

### **Instalación:**

Se debe tomar en cuenta que el nivel de la nieve sube aproximadamente a 4 metros de altura, por esta razón el sistema se debe colocar sobre una estructura que tenga como mínimo esta altura, además debe la estructura debe ser cementada. Por la razón que el savonius debe ser empernado sobre esta, para su mejor mantenimiento, limpieza y lubricación en alguna emergencia o cuando ya lo requiera.

Todo el sistema estructural y metálico debe ser aplicado pintura especial para alta corrosión ambiental como es la pintura marina; para evitar un desgaste excesivo con el tiempo.

## **4.4. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO**

ANEXO C

# **CAPÍTULO 5**

## **DISEÑO DEL PROTOTIPO**

### **5.1. DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO**

La máquina consta de los siguientes sistemas o subconjuntos:

- Soporte estructural exterior.
- Sistema generador de energía alternativa.
- Conjunto resistencia eléctrica.
- Sistema de control.

#### **5.1.1. PARÁMETROS DE DISEÑO**

El diseño del prototipo se fundamenta en la investigación de campo en los nevados Cotopaxi, Antisana y Camyambe:

- Temperatura crítica de 7° - 12 ° C.
- Vientos máximos de 30 a 50 km/h.
- Energía eólica como alternativa.

El prototipo va a diseñarse para abastecer 20 litros de agua, que en situación de ahorro en la antártica sería para dos personas y esa cantidad sería para un día.

### 5.1.2. FACTOR DE SEGURIDAD

La confiabilidad es la probabilidad de que el equipo (como partes, ensambles, componentes, máquinas y sistema de máquinas) realizará la función propuesta de manera satisfactoria, o sin falla.

En muchas aplicaciones el motivo de las fallas está dado por una sobrecarga de esfuerzos, corrosión, desgaste y distorsión, a continuación se detalla los valores de factores de seguridad.

$N = 1.2 - 1.5$  para materiales excepcionales confiables usados bajo condiciones controladas y sujetos a cargas y esfuerzos que puedan determinarse con exactitud, un punto importante es que casi siempre se usa para cargas pequeñas.

$N = 1.5 - 2$  se utiliza para materiales bien conocidos, en condiciones de medio ambiente razonable y sujetos a esfuerzos que puedan calcularse con facilidad.

$N = 2 - 2.5$  se utiliza para materiales promedio que trabajen en condiciones de medio ambiente ordinarias y con cargas que se puedan calcular.

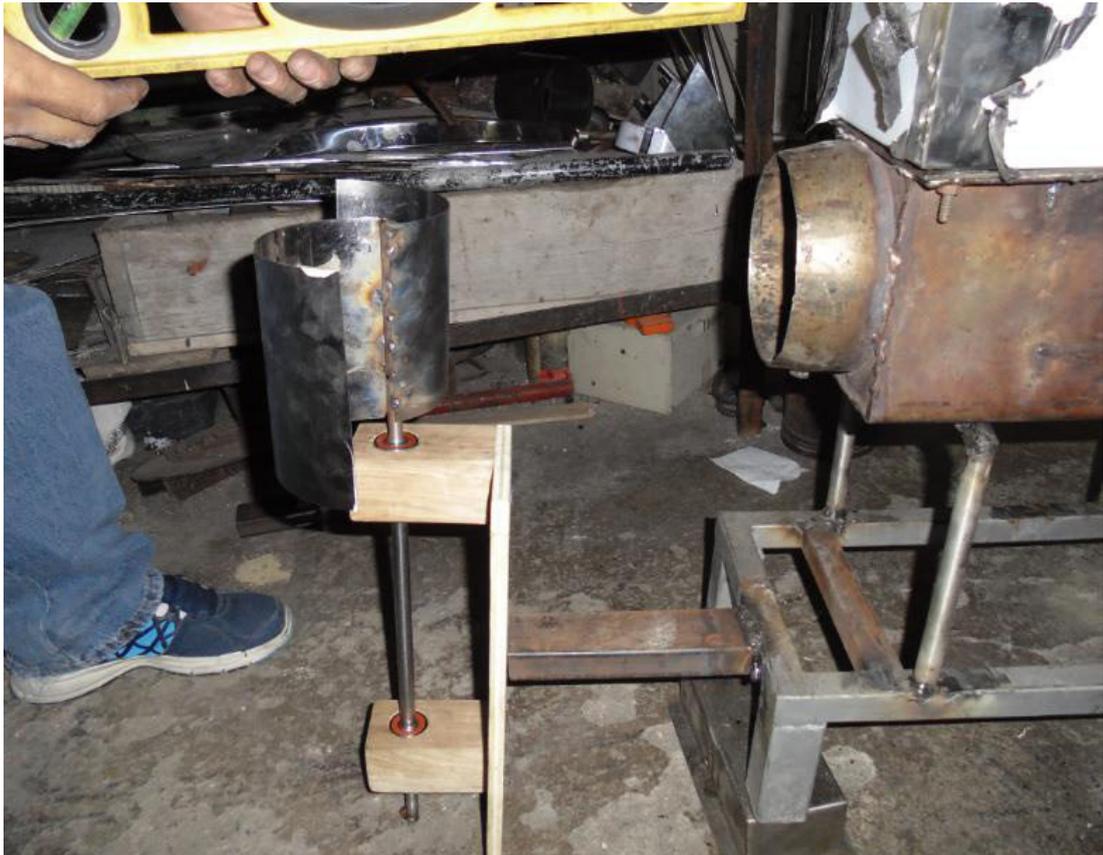
$N = 2.5 - 3$  se utiliza para materiales poco conocidos o para materiales frágiles en condiciones promedio.

$N = 3 - 4$  se utiliza para materiales conocidos los cuales vayan a trabajar en condiciones ambientales inciertas y sujetos a esfuerzos inciertos.

En el presente trabajo los elementos que directamente tendrán factores de seguridad serán los que constituyen el prototipo eólico, ya que este tendrá ejes, aletas, estructura soportante.

## 5.2. DISEÑO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL

El diseño que se va a presentar a continuación, va a solucionar el problema situado en la sección 1.2, de la manera más simple, eficiente y completa posible. La base fundamental del sistema es la fuente de energía, entonces nuestro diseño partirá desde este punto.



**Figura 5. 1 Prototipo base experimental**

## 5.3. DISEÑO ENERGÉTICO

Nuestra fuente de energía renovable va a ser el viento, de aquí parte el diseño de nuestro generador.

Presión frontal del viento, en función de su velocidad.

v (m/s)	v (km/h)	p (N/m <sup>2</sup> )	p (kp/m <sup>2</sup> )	v (m/s)	v (km/h)	p (N/m <sup>2</sup> )	p (kp/m <sup>2</sup> )
5	18	15	1.6	33	118.83	666	67.9
6	21.6	22	2.2	34	122.4	707	72.1
7	25.2	30	3.1	35	126	749	76.4
8	28.8	39	4	36	129.6	792	80.9
9	32.4	50	5.1	37	133.2	837	85.4
10	36	61	6.2	38	136.8	883	90.1
11	39.6	74	7.5	39	140.4	930	94.9
12	43.2	88	9	40	144	978	99.8
13	46.8	103	10.5	41	147.6	1028	104.9
14	50.4	120	12.2	42	151.2	1078	110
15	54	138	14	43	154.8	1130	115.4
16	57.6	157	16	44	158.4	1184	120.8
17	61.2	177	18	45	162	1238	126.3
18	64.8	198	20.2	46	165.6	1294	132
19	68.4	221	22.5	47	169.2	1351	137.8
20	72	245	25	48	172.8	1409	143.7
21	75.6	270	27.5	49	176.4	1468	149.8
22	79.2	296	30.2	50	180	1528	156
23	82.8	323	33	51	183.6	1590	162.3
24	86.4	352	35.9	52	187.2	1653	168.7
25	90	382	39	53	190.8	1717	175.2
26	93.6	413	42.2	54	194.4	1783	181.9
27	97.2	446	45.5	55	198	1849	188.7
28	100.8	479	48.9	56	201.6	1917	195.6
29	104.4	514	52.5	57	205.2	1986	202.7
30	108	550	56.1	58	208.8	2057	209.9
31	111.6	588	60	59	212.4	2128	217.2
32	115.2	626	63.9	60	216	2201	224.6
				61	219.6	2275	232.1
				62	223.2	2350	239.8
				63	226.8	2427	247.6
				64	230.4	2504	225.5
				65	234	2583	163.6
				66	237.6	2663	271.8
				67	241.2	2744	280
				68	244.8	2827	288.5
				69	248.4	2911	297
				70	252	2996	305.7
				71	255.6	3082	314.5
				72	259.2	3169	323.4

Figura 5. 2 Tabla de la presión del viento en función de la velocidad

### **5.3.1. TEORÍA DE GENERADORES EÓLICOS**

El viento ha sido utilizado desde tiempos muy antiguos, logrando transformar la energía cinética de las masas de aire en energía mecánica, empleada para ejercer movimiento en los molinos o el bombeo de agua, en la actualidad se opta por pequeños sistemas eólicos como aerogeneradores eléctricos para dar energía limpia y renovable a pequeñas comunidades, energía utilizada principalmente en iluminación nocturna y comunicación telefónica de emergencias.

El por qué se produce viento se puede entender como un subproducto del sol, esto se debe a que el sol no calienta de forma uniforme la superficie terrestre llegando a provocar zonas de alta y baja presión dando lugar a diferencias en la velocidad del viento y movimiento de masas de aire en todo el planeta.

#### **5.3.1.1. Tipos de turbinas eólicas**

Las máquinas eólicas han sido estudiadas por el hombre en forma intensiva y dentro de ellas existen en la actualidad diferentes tipos que van desde pequeñas potencias, a las grandes máquinas americanas y alemanas de varios MW.

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

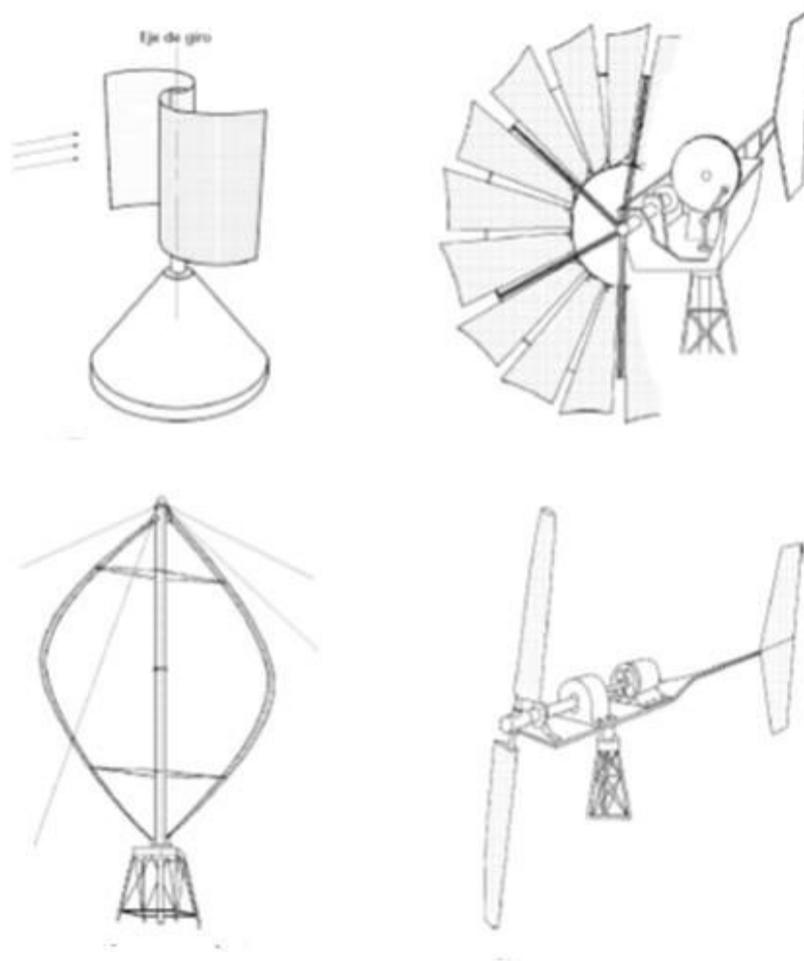
En las máquinas eólicas de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme  $w$ , para una determinada velocidad del viento  $v$  se requiere que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas.

Por el contrario, en las máquinas eólicas de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables, por lo que en estas

máquinas, el flujo aerodinámico resulta ser muy complicado, ignorándose en muchas ocasiones las verdaderas posibilidades de las mismas. Las máquinas eólicas se pueden clasificar en:

- Aeroturbinas de eje horizontal y de eje vertical
- Sistemas giromill (eje vertical y palas verticales, con o sin distribuidor)
- Sistemas especiales.

Dentro de ellas las aeroturbinas de eje horizontal se encuentran más desarrolladas, tanto desde el punto de vista técnico como comercial.



**Figura 5. 3 Tipos de Turbinas**

#### 5.3.1.1.1. Maquinas eólicas de eje horizontal

Las Aero turbinas de eje horizontal se suelen clasificar según su velocidad de giro o según el número de palas que lleva el rotor aspectos que están íntimamente relacionados, en rápidas y lentas; las primeras tienen un número de palas no superior a 4 y las segundas pueden tener hasta 24.

#### 5.3.1.1.2. Maquinas eólicas de eje vertical

Entre las máquinas eólicas de eje vertical se pueden citar:

a) El aerogenerador Savonius: que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo.

b) El aerogenerador Darrieux o de catenaria, requiere para un correcto funcionamiento, vientos de 4 a 5 metros por segundo como mínimo, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento; se construyen con 2 ó 3 hojas

c) El molino vertical de palas tipo giromill o ciclogiro que deriva del Darrieux; tiene entre 2 y 6 palas. El modelo Darrieux arranca mal, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas de forma que un rotor Savonius actúe durante el arranque y un rotor Darrieux sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

a) No necesitan sistemas de orientación

b) Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo.

c) No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- a) Mayor rendimiento
- b) Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos)
- c) Menor superficie de pala  $S$  a igualdad de área barrida  $A$
- d) Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa

**Tabla 5. 1 Descripción general de los distintos aerogeneradores**

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

### 5.3.2. ALTERNATIVA SELECCIONADA

La alternativa a escoger se la á tomado basándonos en el elemento generador de energía. Para ello lo hemos escogido por los mínimos requerimientos de potencia que necesita una resistencia eléctrica, un sistema simple de control y una bomba para extraer agua. Y los mínimos requerimientos son 491 W de potencia, para lograr derretir un volumen de 5kg de hielo.

- **ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:**

Alternador de automóvil de 60 Amperios con relay de almacenamiento de voltaje a 12 voltios.

### **5.3.3. DISEÑO DEL GENERADOR SAVONIUS**

El aerogenerador Savonius fue inventado por el finlandés de igual nombre en el año 1924 y patentado en 1929. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro, de ejes paralelos acoplados al eje de giro y separados una cierta distancia. Las fuerzas que ejerce el viento en la parte cóncava y convexa son diferentes, como sabemos, y ello hace que el conjunto gire alrededor de un eje.

Para el rotor Savonius de dos palas o canaletas, el coeficiente de arrastre es aproximadamente la unidad para el curvado cóncavo (intradós), y oscila entre 0,12 y 0,25 para la parte opuesta (extradós) a donde sopla el viento.

El rotor siempre está sometido a un par aerodinámico suplementario debido a las dos desviaciones sucesivas que experimenta el viento por efecto de las palas, llegando a formar esta desviación un ángulo de 180°. Con estos datos se puede calcular fácilmente la fuerza de arrastre, resultante de la diferencia de las fuerzas de arrastre correspondientes a los dos flancos, así como el par motor neto del aparato.

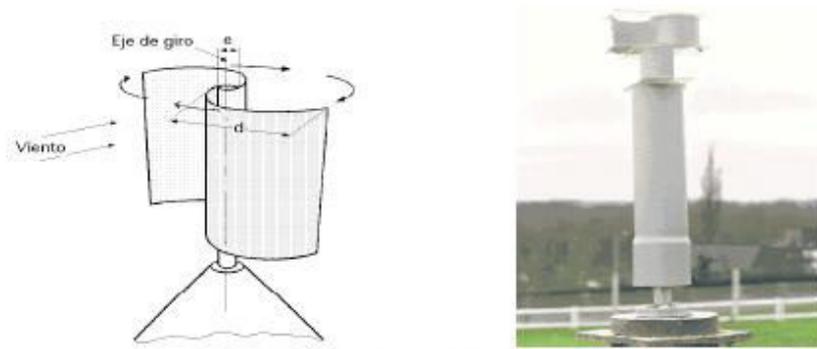


Fig IV.15.- Aerogenerador Savonius

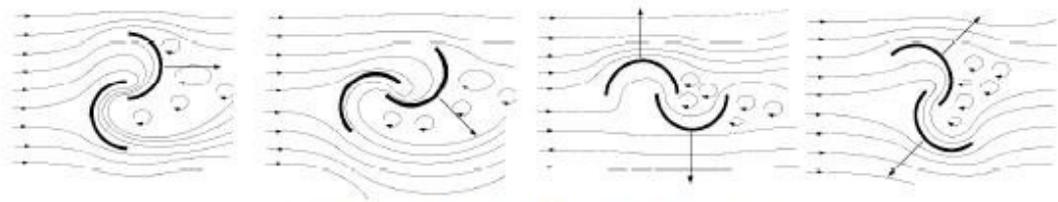


Figura 5. 4 Perfil de vientos

### 5.3.3.1. Potencia y velocidad de giro

La potencia máxima en vatios [W] que podemos obtener con un rotor Savonius puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$P_{max} = 0,18 \cdot H \cdot D \cdot v^3 \text{ [W]} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Dónde:

H es la altura

D el diámetro del rotor, ambos expresados en metros [m] y

$v^3$  es el cubo de la velocidad del viento [m/s].

La velocidad de giro n en revoluciones por minuto [rpm] de un rotor Savonius se calcula con la siguiente fórmula:

$$n = (60 \cdot \lambda \cdot v) / (\pi \cdot D) \text{ [rpm]} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

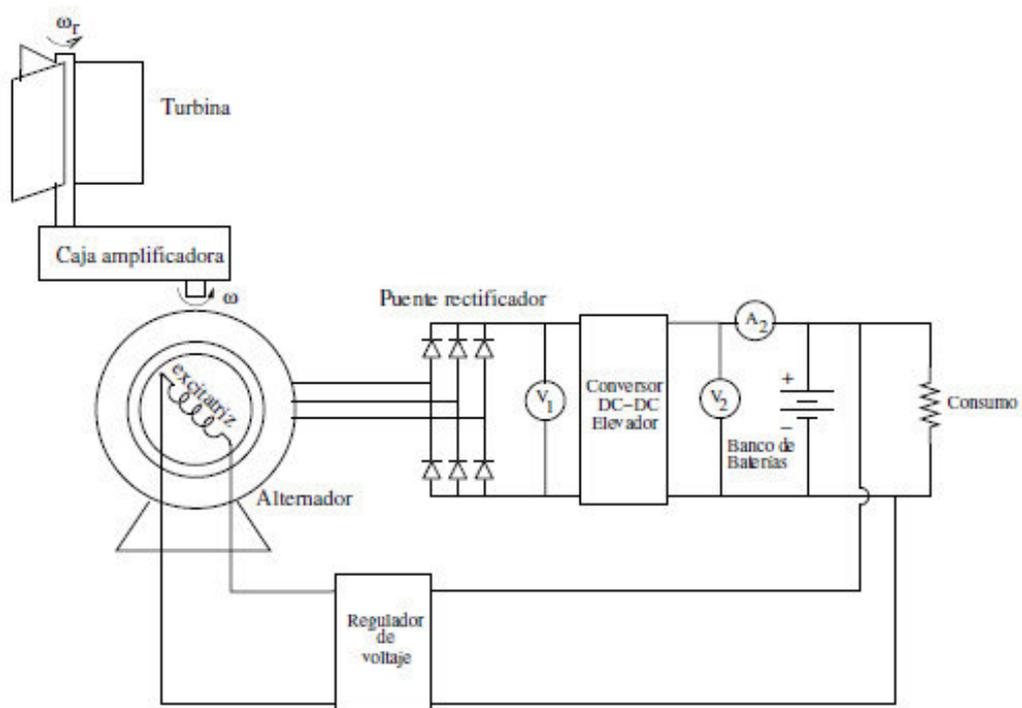
Dónde:

$\lambda$  es un factor llamado velocidad específica de la eólica (número adimensional),

$v$  la velocidad del viento en [m/s]

$D$  el diámetro del rotor Savonius en [m].

La velocidad específica  $\lambda$  es un factor característico de cada eólica. Su valor oscila entre 0,5 y 14. Se obtiene dividiendo la velocidad de las puntas de las palas por la velocidad del viento. En un rotor Savonius  $\lambda$  es aproximadamente igual a la unidad ( $\lambda = 1$ ).



**Figura 5. 5 Generación de Energía Eólica**

El esquema general ilustra las distintas componentes a implementar para que el aerogenerador tenga un soporte completo y sea conectado a un banco de baterías cualquiera.

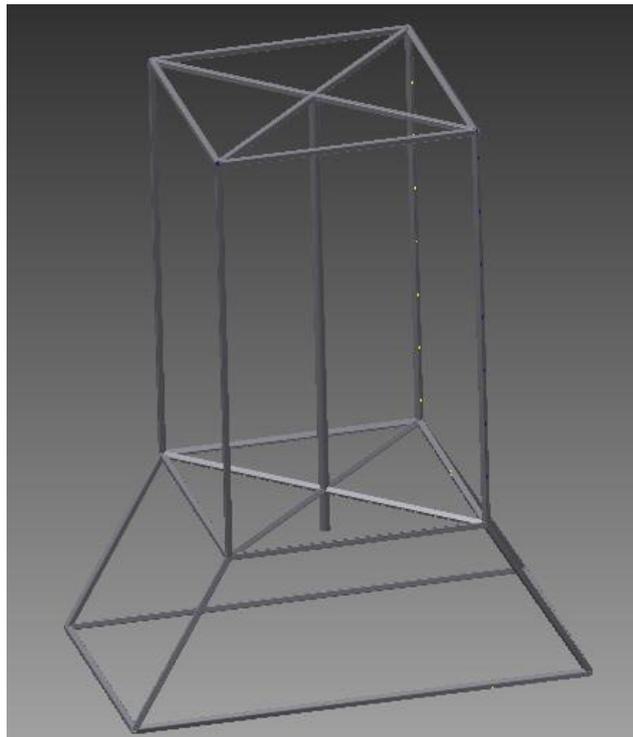
Respecto a este esquema se resaltan las siguientes partes:

- El rotor del aerogenerador: de eje vertical,
- La relación de transmisión de RPM,
- El alternador a 12 v.
- El banco de baterías.
- Controlador de carga o descarga del sistema.

#### **5.4. DISEÑO DEL PROTOTIPO**

Como es sabido el desarrollo de generadores Savonius es muy escasa, por lo tanto no existe una guía práctica para esto; por esta razón se va a diseñar un prototipo experimental, al cual vamos a tomar medidas, sacar la máxima cantidad de datos posibles; para después de ello tratar de ver la manera de relacionar estos datos con los que nosotros necesitamos para el prototipo real.

##### **5.4.1. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOPORTE**



**Figura 5. 6 Soporte Estructural**

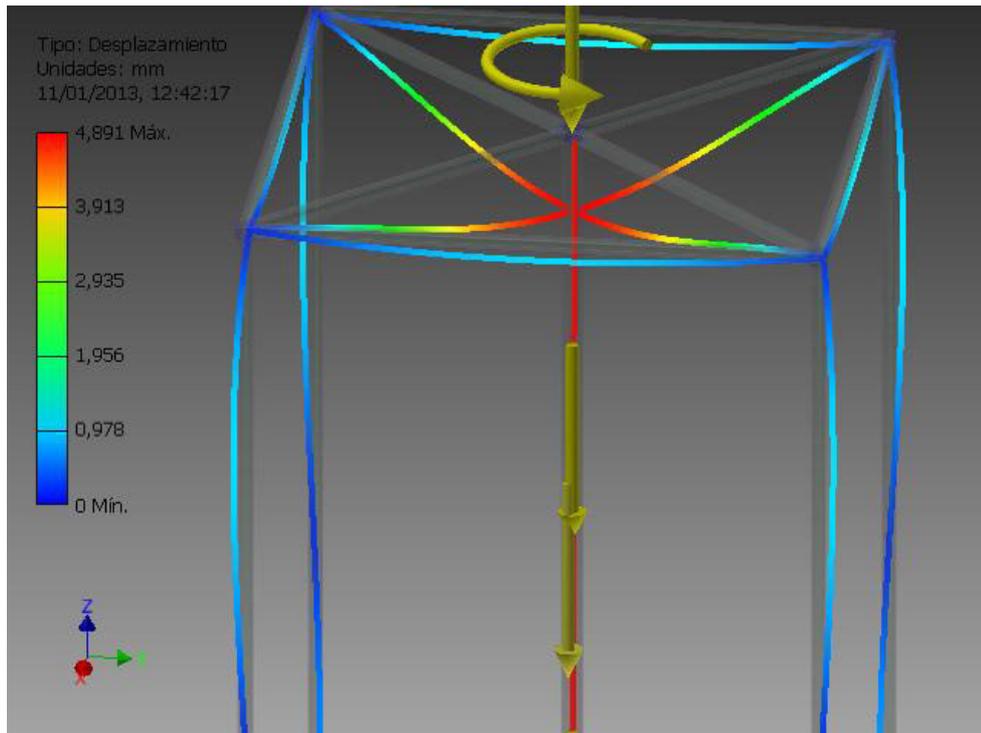
**Fuerza y pares de reacción en restricciones**

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componentes (Fx,Fy,Fz)	Magnitud	Componentes (Mx,My,Mz)
Restricción personalizada:3	2170,644 N	1000,207 N	45595,990 N mm	33995,839 N mm
		-1230,391 N		29997,215 N mm
		1482,369 N		4841,935 N mm
Restricción personalizada:4	2169,124 N	-998,367 N	61012,151 N mm	40851,924 N mm
		-1237,350 N		-43196,535 N mm
		1475,576 N		-13698,989 N mm
Restricción personalizada:1	2153,101 N	-996,440 N	72799,016 N mm	-53280,888 N mm
		1233,883 N		-48929,537 N mm
		1456,187 N		8169,707 N mm
Restricción personalizada:2	2158,504 N	994,600 N	59457,545 N mm	-49562,667 N mm
		1233,858 N		32647,871 N mm
		1465,436 N		3585,825 N mm

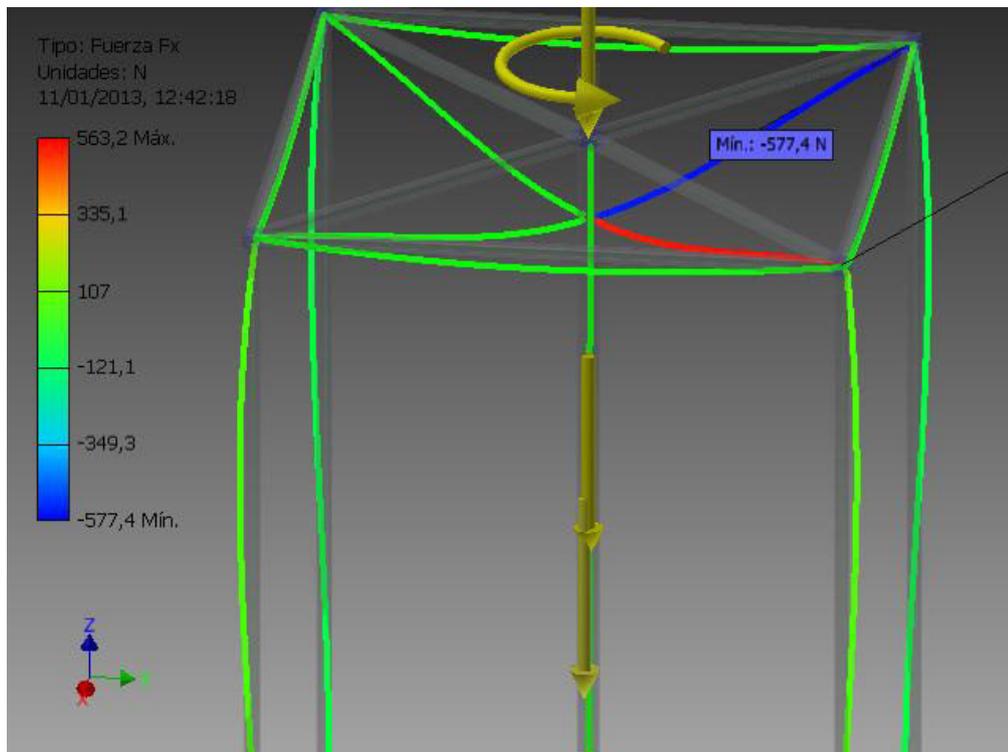
**Resumen de resultados estáticos**

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0,000 mm	4,891 mm
Fuerzas	Fx	-577,382 N	563,246 N

	Fy	-700,441 N	684,988 N
	Fz	-1404,925 N	2565,905 N
Momentos	Mx	-338554,632 N mm	388127,073 N mm
	My	-344362,218 N mm	219002,247 N mm
	Mz	-12000,000 N mm	2170,290 N mm
Tensiones normales	Smax	-4,849 MPa	88,921 MPa
	Smin	-91,914 MPa	1,971 MPa
	Smax( Mx)	0,000 MPa	90,060 MPa
	Smin( Mx)	-90,060 MPa	-0,000 MPa
	Smax( My)	0,000 MPa	79,905 MPa
	Smin( My)	-79,905 MPa	-0,000 MPa
	Saxial	-5,192 MPa	2,027 MPa
Tensión de corte	Tx	-2,888 MPa	2,960 MPa
	Ty	-3,512 MPa	3,591 MPa
Tensiones de torsión	T	-5,487 MPa	9,110 MPa



**Figura 5. 7 Desplazamiento**



**Figura 5. 8 Fuerza en X**

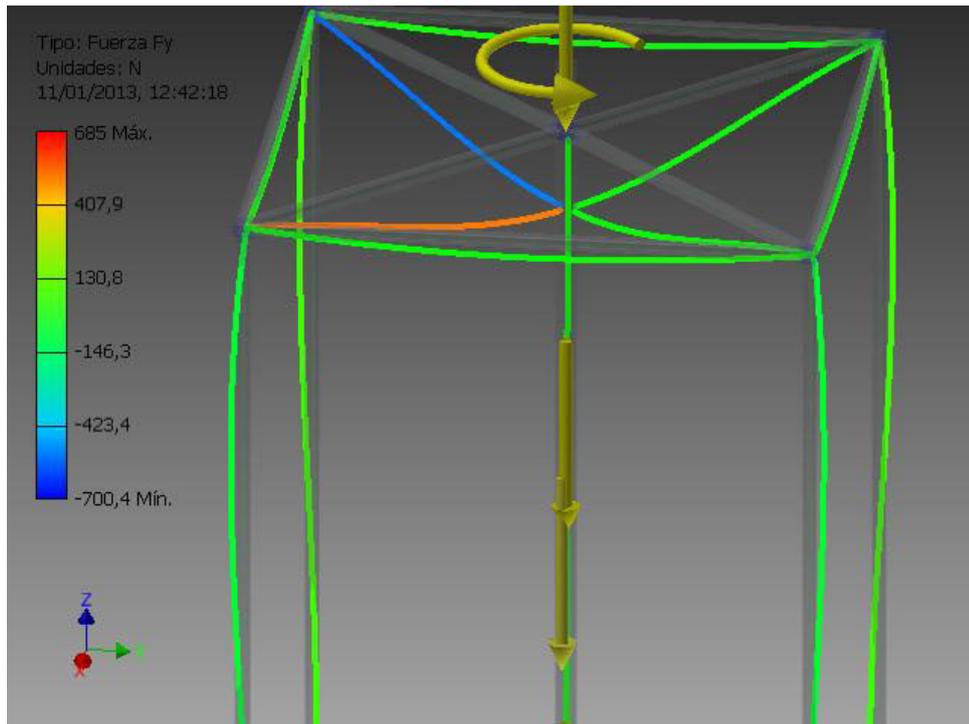


Figura 5. 9 Fuerza en Y

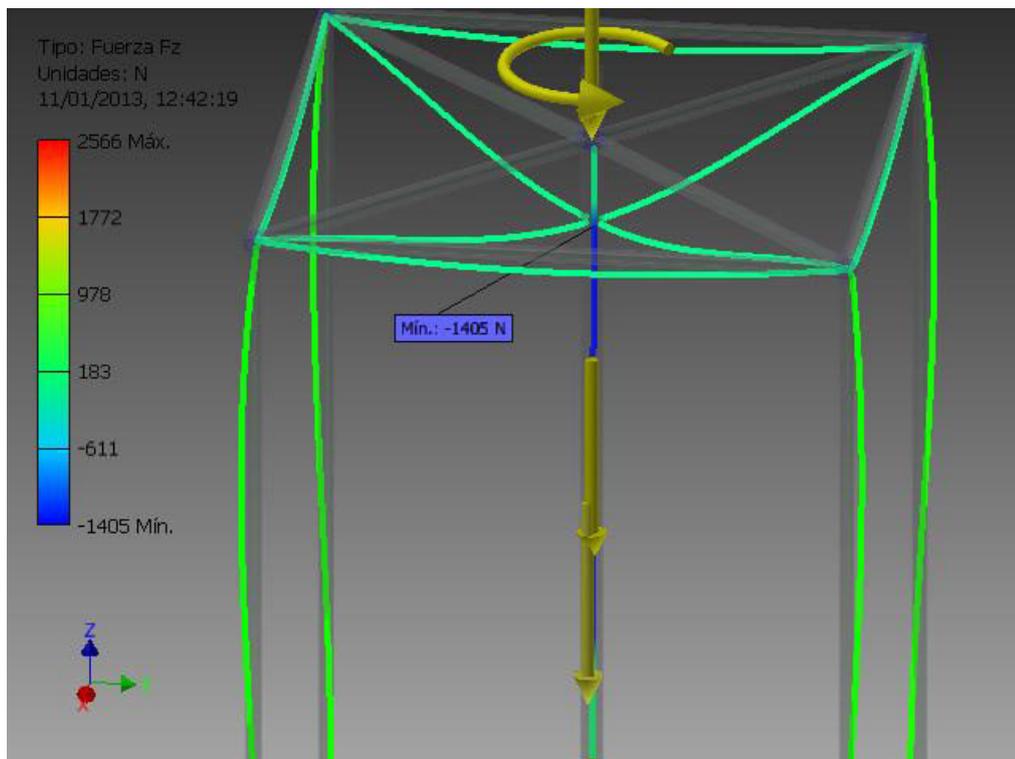
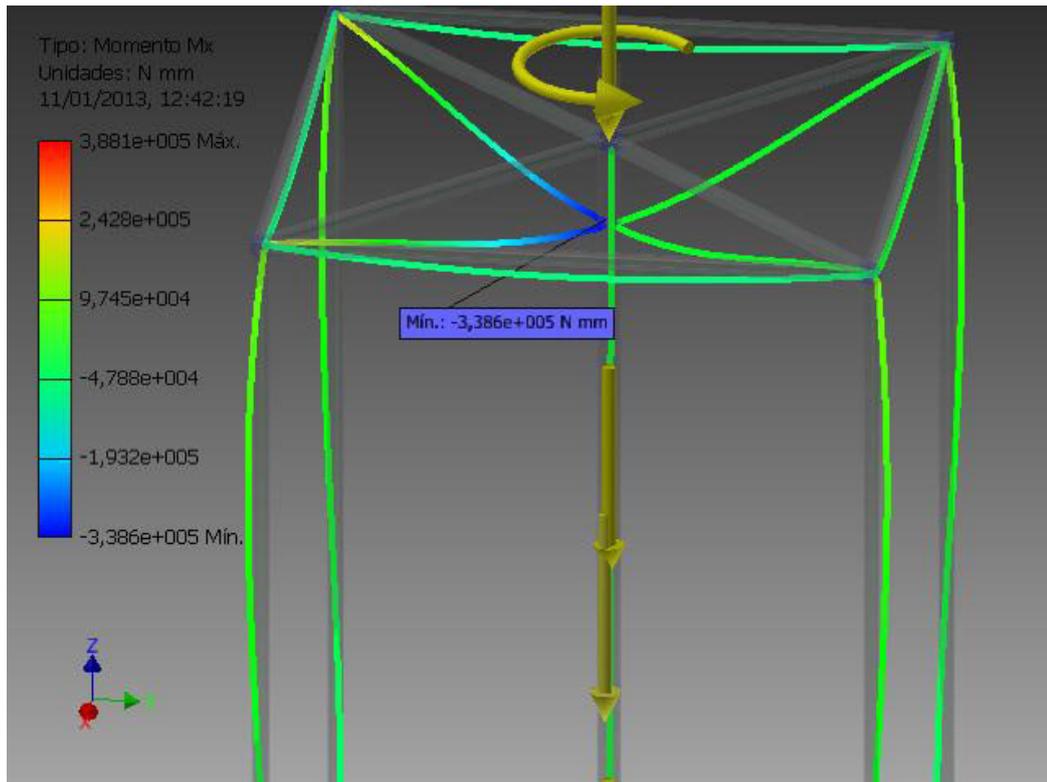
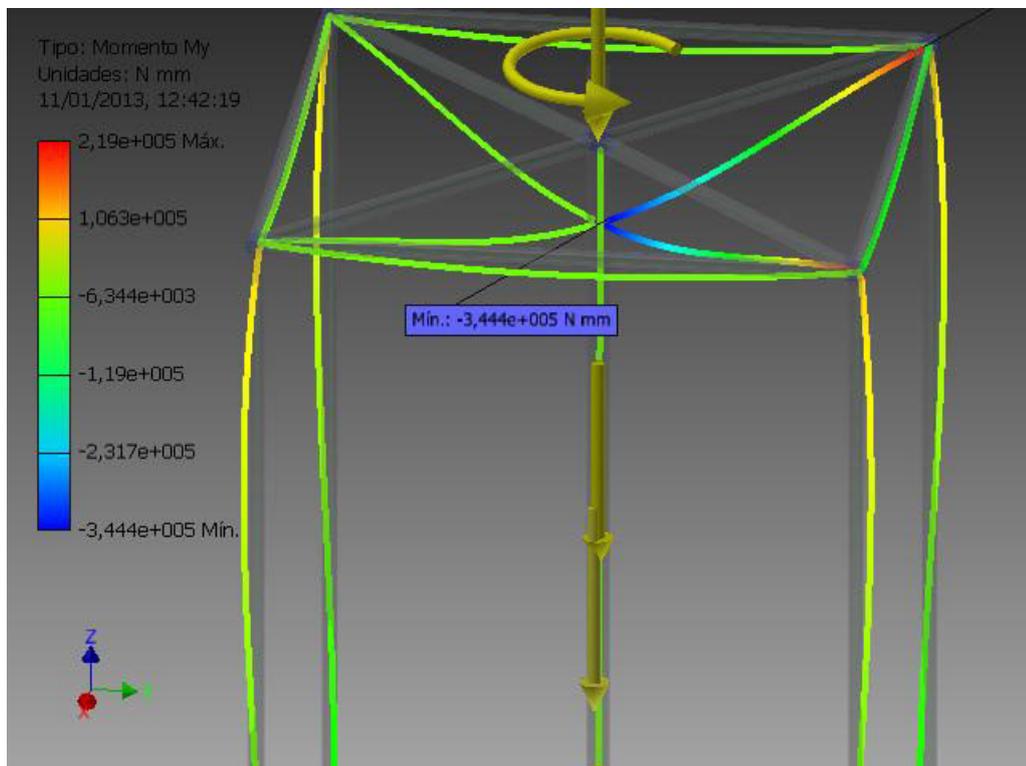


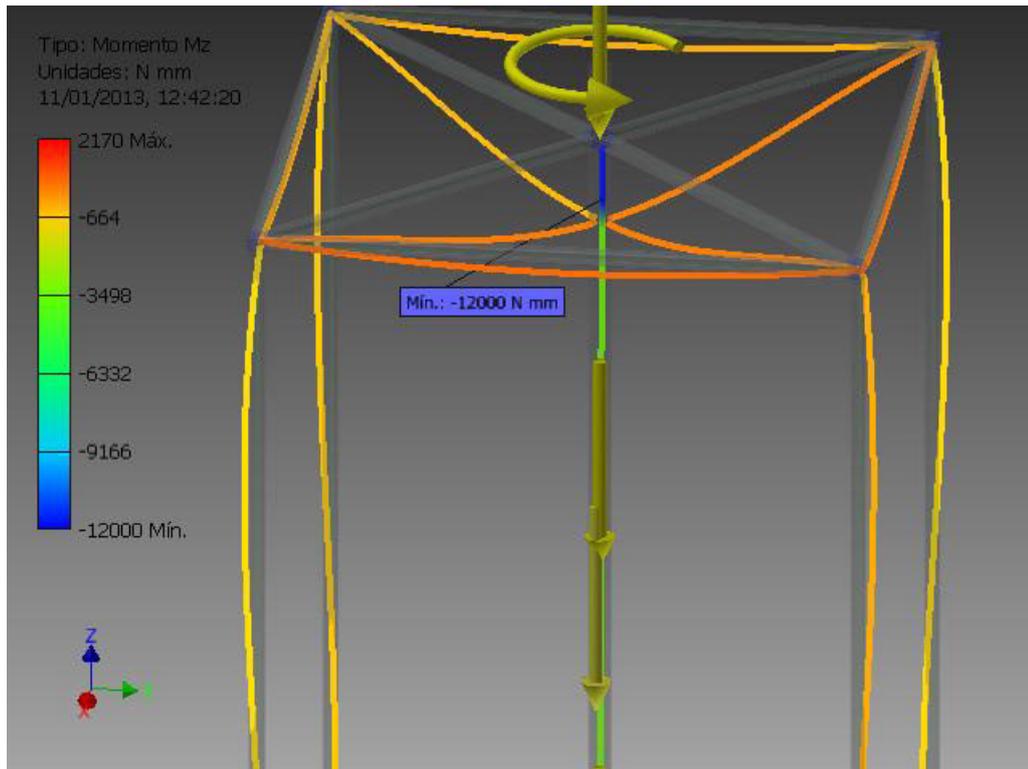
Figura 5. 10 Fuerza en Z



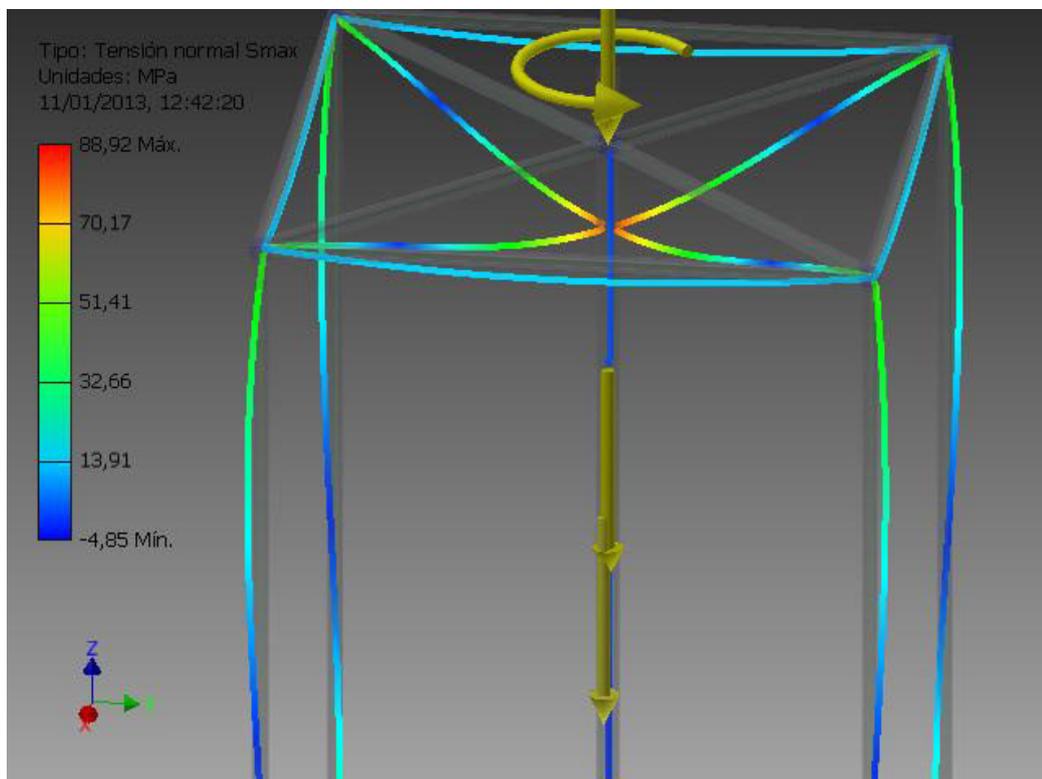
**Figura 5. 11 Momento en X**



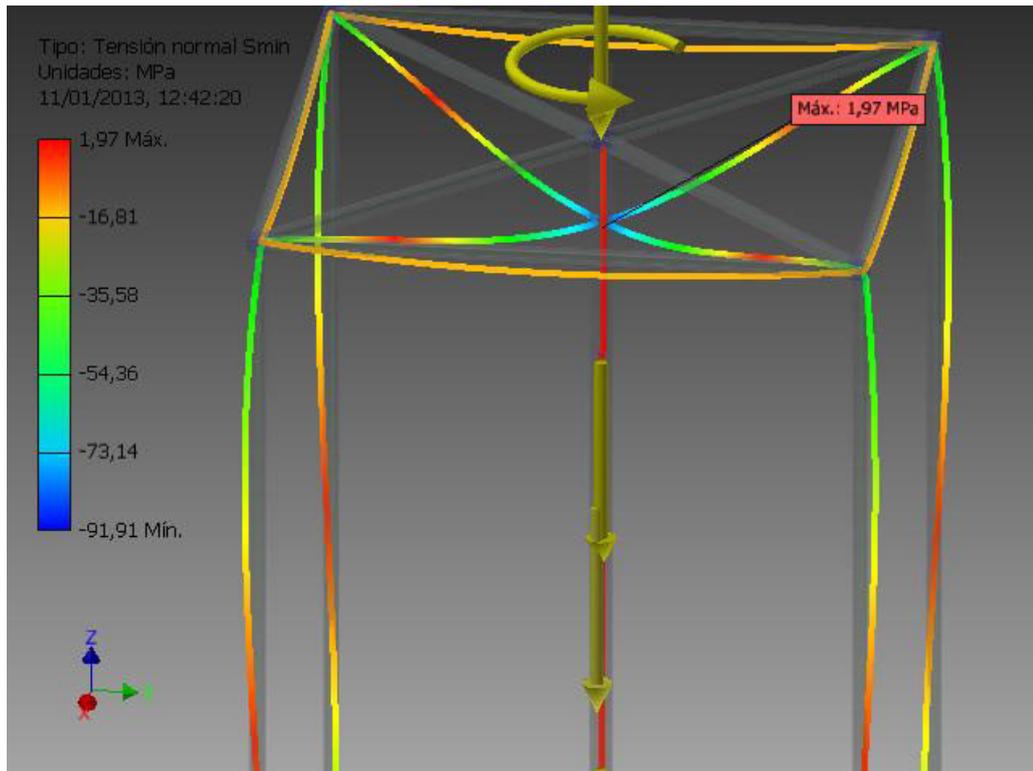
**Figura 5. 12 Momento en Y**



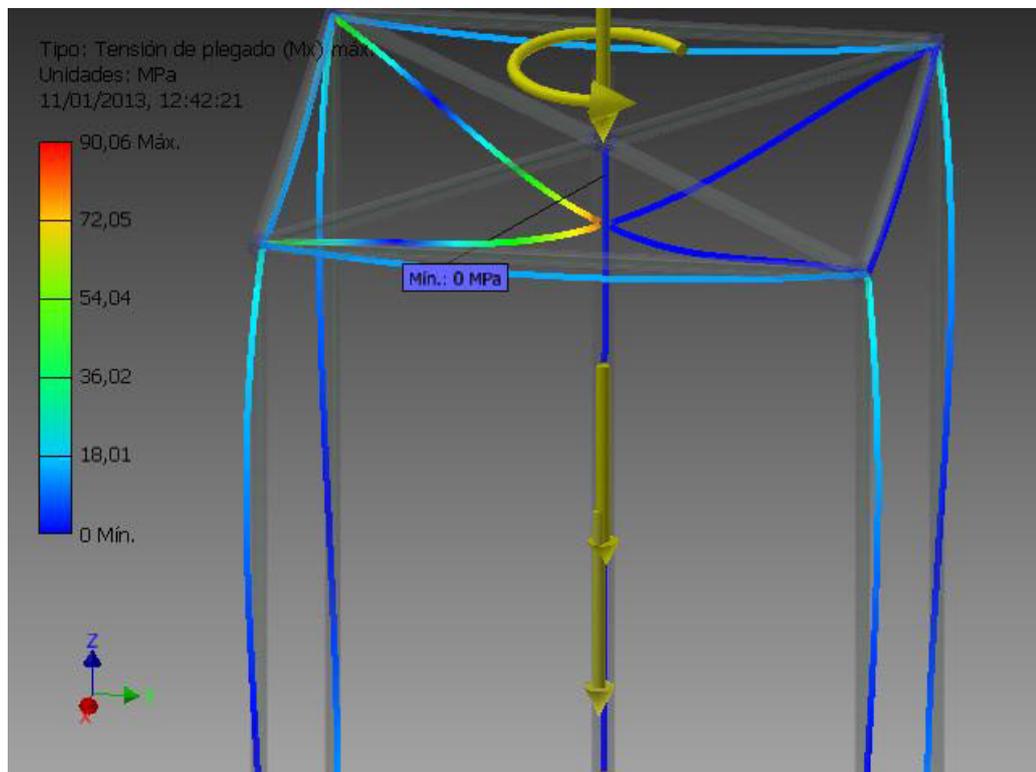
**Figura 5. 13 Momento en Z**



**Figura 5. 14 Tensión normal Smax**



**Figura 5. 15 Tensión normal Smin**



**Figura 5. 16 Tensión de plegado Smax(Mx)**

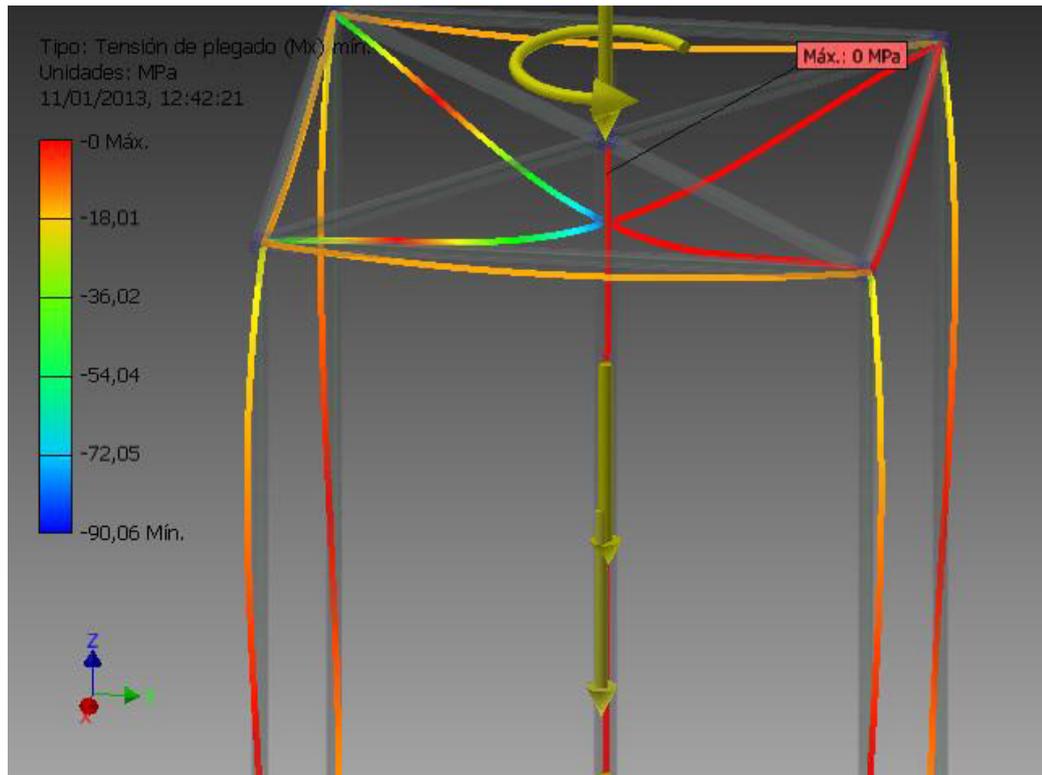


Figura 5. 17 Tensión de plegado  $S_{min}(M_x)$

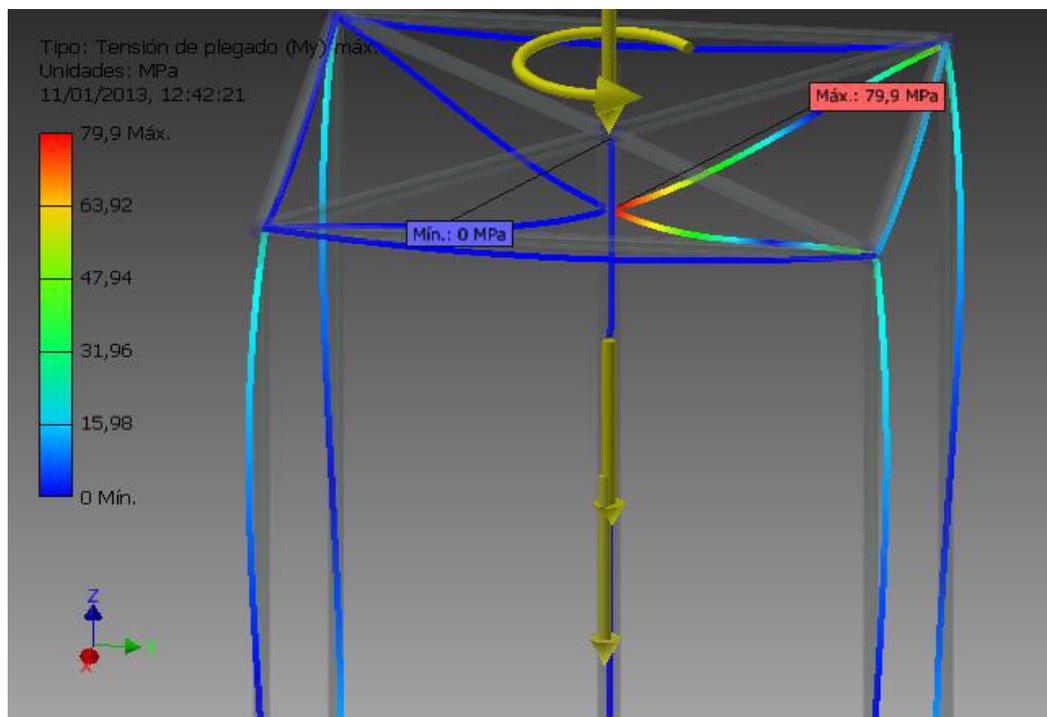
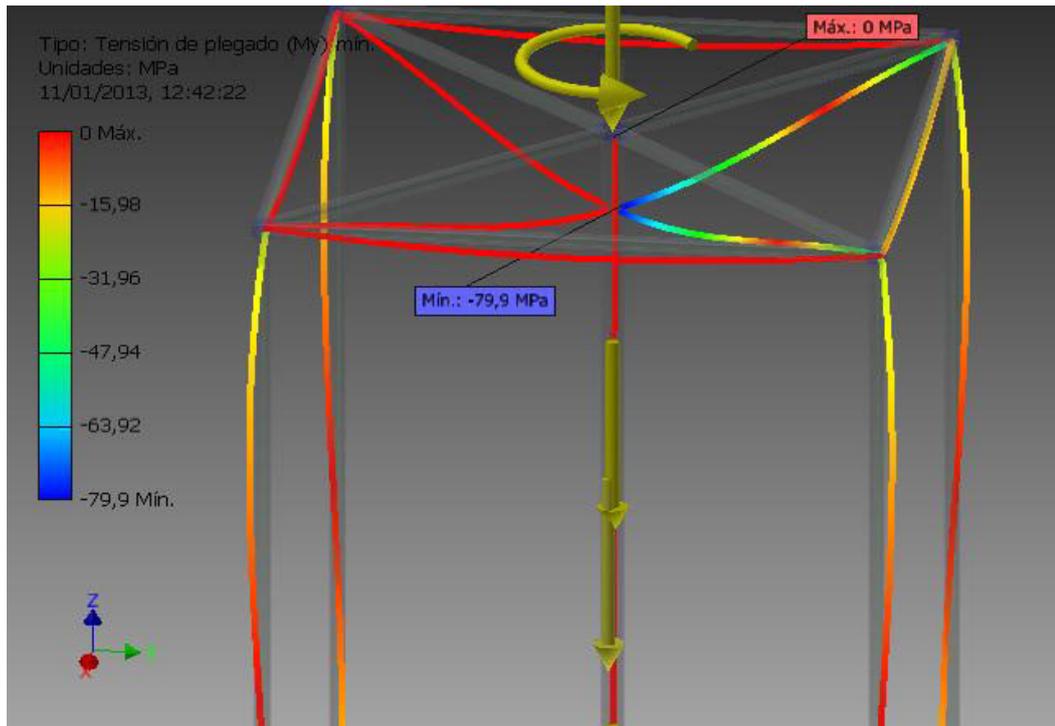
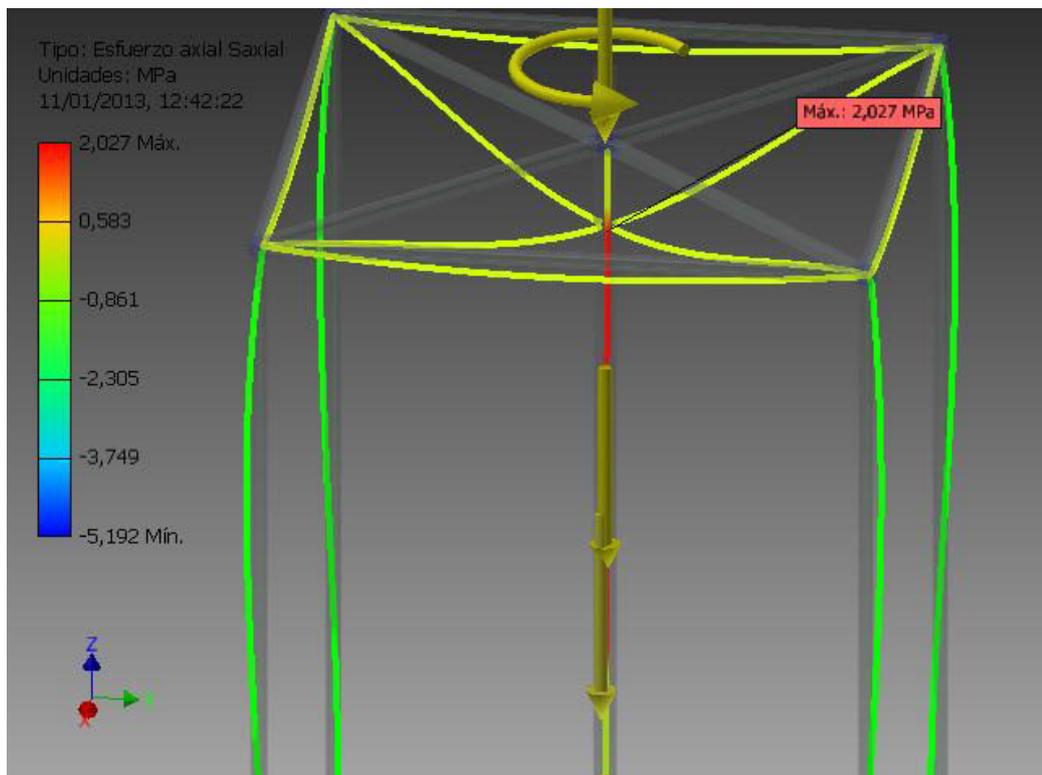


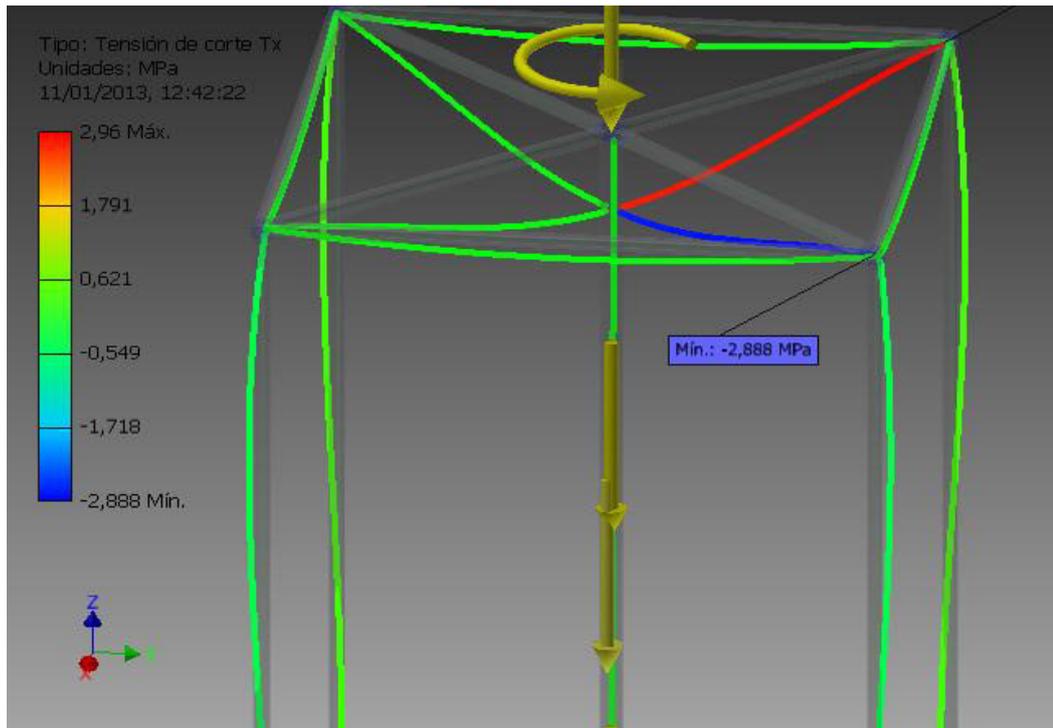
Figura 5. 18 Tensión de plegado  $S_{max}(M_y)$



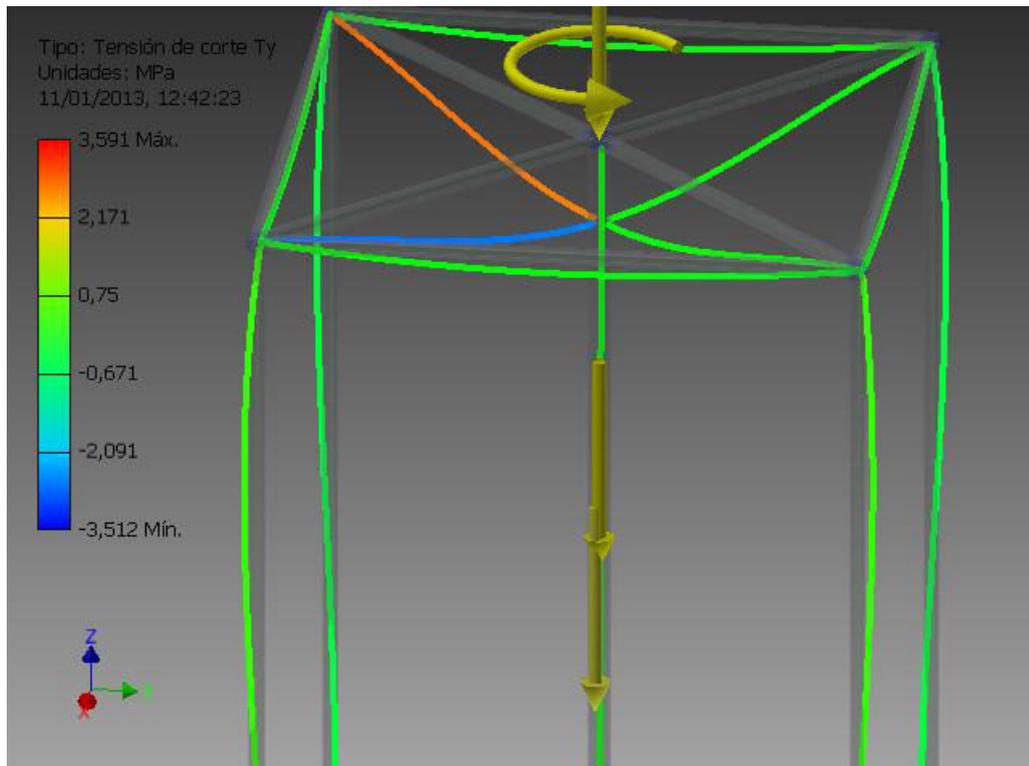
**Figura 5. 19 Tensión de plegado Smin(My)**



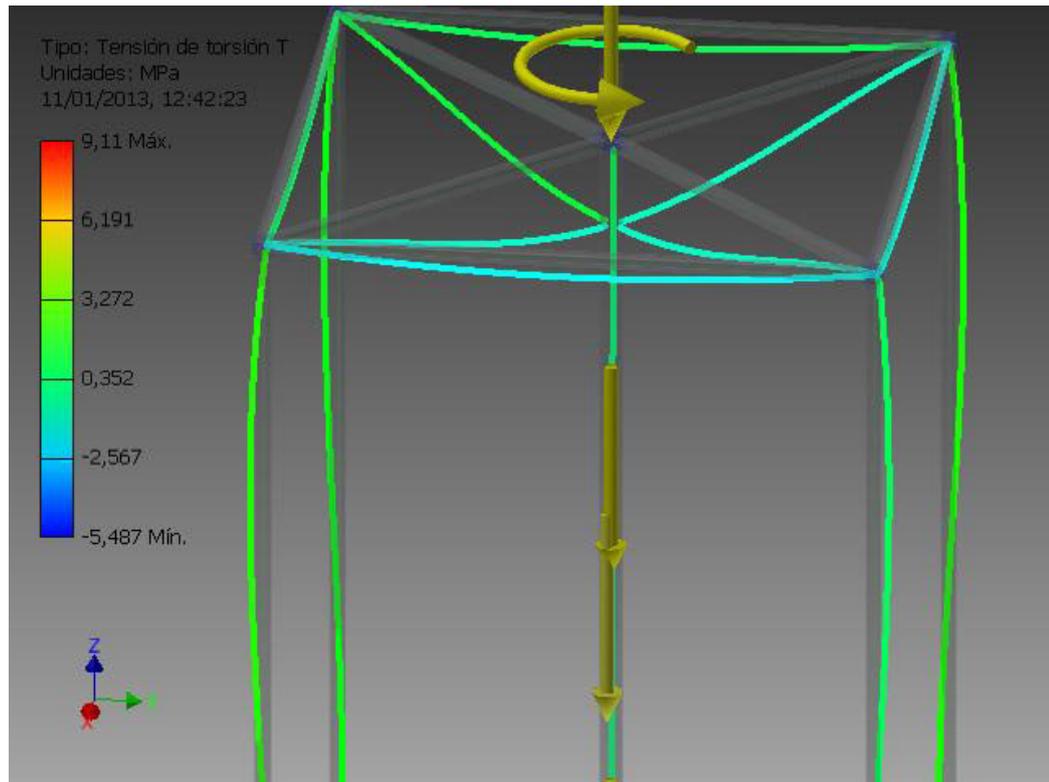
**Figura 5. 20 Esfuerzo axial Saxial**



**Figura 5. 21 Tensión de corte Tx**



**Figura 5. 22 Tensión de corte Ty**



**Figura 5. 23 Tensión de Torsión T**

## 5.4.2. DISEÑO Y CALCULO DE ALABES

### GENERADOR SAVONIOUS

#### DISEÑO PARA EL PROTOTIPO REAL

$$\text{Pot\_mot} := 670 \quad \text{W}$$

$$n := 600 \quad \text{rpm}$$

$$\text{Tor\_req} := \frac{9.55 \cdot \text{Pot\_mot}}{n}$$

$$\text{Tor\_req} = 10.66 \quad \text{N}\cdot\text{m} \quad \text{Velocidad viento de 80 a 120 km/h}$$

#### DISEÑO ENERGÉTICO

Energía Entrada - Energía Salida = Energía Sistema

$$E_{\text{entrada}} = \Delta H_{\text{hielo}} + \Delta E_{\text{vase}}$$

$$\text{Cp\_Hielo} := 1.93 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\text{Masa} := 5 \quad \text{Kg}$$

$$\text{Tiem\_derretir} := 5 \quad \text{min}$$

$$\text{Cp\_H2O} := 4.217 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{k}}$$

$$\Delta T_{\text{hielo}} := 1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{H2O}} := 4 - 1 \quad ^\circ\text{C}$$

$$E_{\text{entra}} := (\text{Masa} \cdot C_{p\_Hielo} \cdot \Delta T_{\text{hielo}})$$

$$E_{\text{entra}} = 9.65 \quad \text{KJ}$$

$$E_{\text{entr}_t} := \frac{E_{\text{entra}}}{150} \cdot 1000 = 64.33 \quad \text{W}$$

Potencia necesaria  
para derretir hielo

$$E_{\text{H2O}} := (\text{Masa} \cdot C_{p\_H2O} \cdot \Delta T_{\text{H2O}})$$

incrementando la  
temperatura en 1 °C

$$E_{\text{H2O}} = 63.25 \quad \text{KJ}$$

$$E_{\text{H2O}_t} := \frac{E_{\text{H2O}}}{150} \cdot 1000 = 421.70 \quad \text{W}$$

Potencia necesaria  
para mantener en  
estado líquido el  
agua a temperatura  
3 °C

En consecuencia la energía que absorbe el envase y la convección natural que la asumimos como un factor de seguridad

$$\text{Pot\_req} := E_{\text{H2O\_t}} + E_{\text{H2O\_t}} \cdot \text{FS} \quad \text{W}$$

$$\text{Pot\_req} = 484.95 \quad \text{W}$$

$$\omega_{\text{real}} := \frac{\text{Pot\_req}}{\text{Tor\_req}} = 45 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\text{Rpm\_req} := \frac{\omega_{\text{real}} \cdot 60}{2\pi}$$

$$\text{Rpm\_req} = 434.3$$

$$V_{\text{dis}} := 100 \frac{\text{Km}}{\text{h}}$$

$$V_{\text{dis}} := 28$$

Velocidad de diseño = 27.77 aprox 28 m/s

### De tablas Presión del viento en función de su velocidad tenemos

A una velocidad de entrada de 27.77 aprox 28 existe una presión de 479 (N/m<sup>2</sup>)

Entonces:

$$Pv\_real := 479 \quad \frac{N}{m^2}$$

$$P\_real := 0.18 \cdot H\_req \cdot Da\_req \cdot \left( \frac{2 \cdot Vdis}{3} \right)^3 = 484.955 \quad W$$

$$F\_real := Pv\_real \cdot \frac{Area\_Real\_aprox}{2} = 535.99 \quad N$$

$$F\_prueba := Pv\_prueba \cdot \frac{Area\_Real\_aprox}{2} = 33.57$$

$$P\_prueba := 0.18 \cdot H\_req \cdot Da\_req \cdot \left( \frac{2 \cdot V\_prueba}{3} \right)^3 = 7.58$$

Densidad del aire en función de la altura

$$Da = 348.42 * (1 - H * 1.05 E-4) / (T + 273)$$

Dónde: Da = densidad del aire (g / Litro)

P = presión barométrica (psi)

T = temperatura (°C)

H = altura sobre el nivel del mar (m)

Datos:

$$H_{exp} := 3100 \text{ msnn}$$

$$T_{exp} := 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho := \frac{348.42 \cdot (1 - H_{exp} \cdot 0.000105)}{(T_{exp} + 273)}$$

$$\rho = 0.83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$H_{sa} := 1.10 \text{ m}$$

$$Ra_{sa} := 0.3137 \text{ m}$$

Esto equivale a 25 Km/h  
que representa la  
velocidad de prueba en  
campo.

$$V_{sa} := 6.94 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{teo} := 0.18 \cdot H_{sa} \cdot Ra_{sa} \cdot 4 \cdot \left( \frac{2 \cdot V_{sa}}{3} \right)^3$$

$$P_{teo} = 24.61 \text{ W}$$

$$T_{sa} := 2.17 \text{ Nm}$$

$$\omega := 4.19 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Velocidad angular savonious a 40 RPM

### **Potencia Convertida hasta el eje:**

$$P_g := T_{sa} \cdot \omega$$

$$P_g = 9.09 \text{ W}$$

### **Velocidad adimensional periférica**

$$u := \frac{\omega \cdot R_{a\_sa}}{V_{sa}}$$

$$u = 0.19$$

### **Eficiencia del Generador**

$$\eta := \frac{P_g}{P_{teo}}$$

$$\eta = 0.37$$

### **Perdidas de potencia en el eje**

$$P_{per} := P_{teo} - P_g = 15.51$$

### **Fuerzas en el disco de revolución debido al viento:**

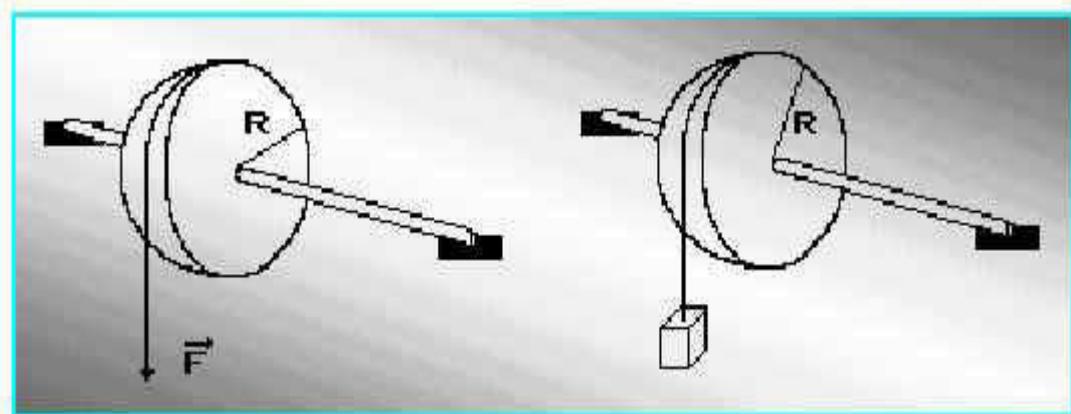
$$I_z = \frac{1}{4} R^2 \cdot dm .$$

$$I_z = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left( \frac{1}{4} \cdot \frac{R^2 M}{L} + \frac{M}{L} \cdot x^2 \right) dx = \frac{M}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left( \frac{1}{4} R^2 + x^2 \right) dx$$

$$I_z = \frac{M}{L} \left[ \left[ \frac{1}{4} R^2 \cdot x \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} + \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \right] = \frac{M}{L} \left[ \frac{1}{4} R^2 \left( \frac{L}{2} - \left( -\frac{L}{2} \right) \right) \right] + \left( \frac{\left( \frac{L}{2} \right)^3}{3} - \frac{\left( -\frac{L}{2} \right)^3}{3} \right)$$

$$I_z = \frac{M}{L} \left[ \frac{1}{4} R^2 \cdot L + \frac{L^3}{12} \right] = \frac{1}{4} R^2 \cdot M + \frac{1}{12} \cdot ML^2$$

$$I_z = \frac{1}{4} \cdot MR^2 + \frac{1}{12} \cdot ML^2$$



$$\text{Tor}_{\text{req}} = 10.66 \quad \text{N m}$$

$$\delta_{\text{acero}} := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa\_Disco} := 27.53 \quad \text{Kg}$$

$$\text{Long} := 0.03 \quad \text{m}$$

$$\text{Radio} := 0.61 \quad \text{m}$$

$$I_{\text{Sol\_rig}} := \frac{1}{4} \cdot \text{Masa\_Disco} \cdot \text{Radio}^2 + \frac{1}{12} \cdot \text{Masa} \cdot \text{Long}^2$$

$$I_{\text{Sol\_rig}} = 2.56 \quad \text{Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\alpha := \frac{\text{Tor\_req}}{I_{\text{Sol\_rig}}}$$

$$\alpha = 4.16 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$a := \text{Radio} \cdot \alpha$$

$$a = 2.54 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Vol\_eje} := 0.0061 \quad \text{m}^3$$

$$F_{\text{aplic\_disco}} := \text{Vol\_eje} \cdot \delta_{\text{acero}} \cdot a$$

$$F_{\text{aplic\_disco}} = 121.61 \quad \text{N}$$

### **COMO SON 3 DISCOS**

$$F_{\text{total}} := 3 \cdot F_{\text{aplic\_disco}}$$

$$F_{\text{total}} = 364.845 \quad \text{N}$$

$$X := 1950 \quad \text{mm}$$

$$q_{\text{dist}} := \frac{F_{\text{total}}}{X}$$

$$q_{\text{dist}} = 0.187 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

### CÁLCULO DEL EJE

$$\text{Pot}_{\text{req}} = 484.95 \quad \text{W}$$

$$P_c := \frac{\text{Pot}_{\text{req}}}{745} = 0.65 \quad \text{Hp}$$

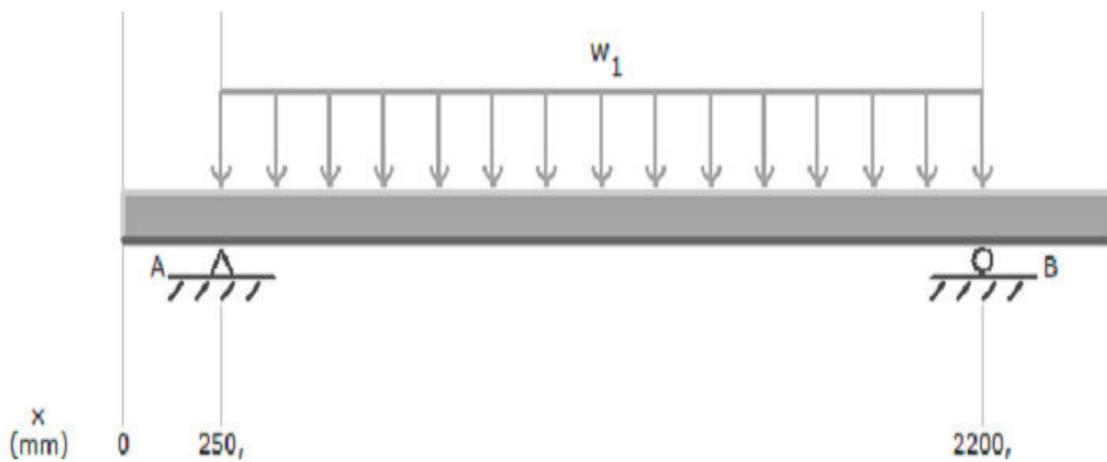


Figura 5.24 Diagrama de Carga Distribuida al eje

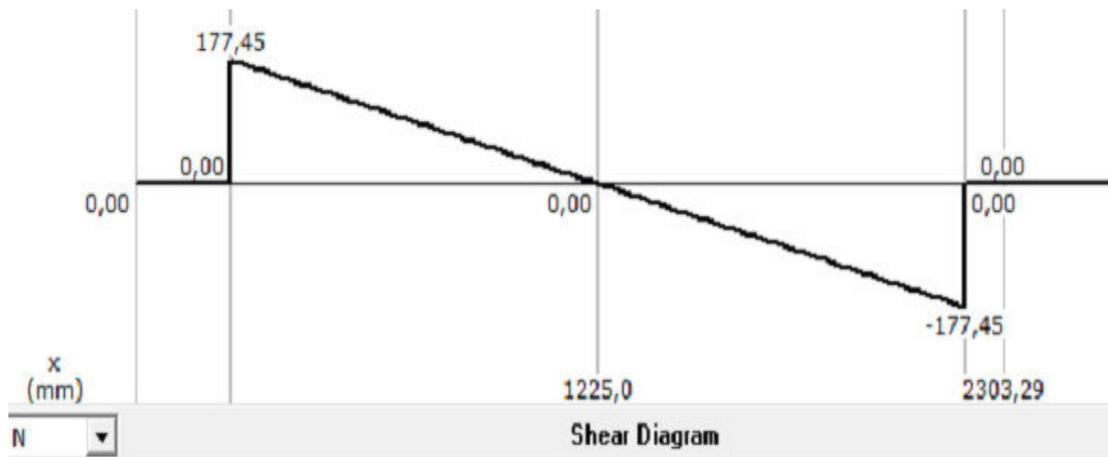


Figura 5.25 Diagrama de Fuerza Cortante

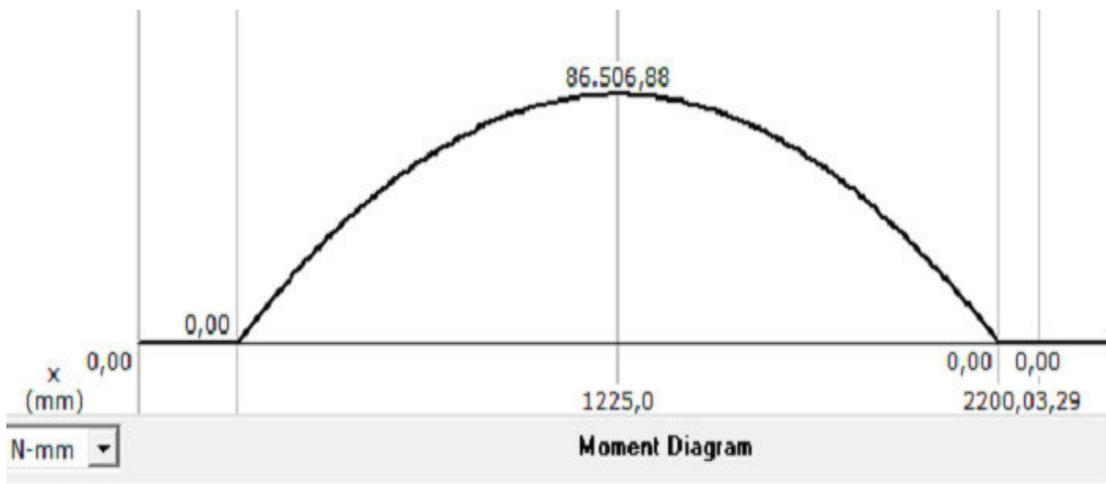


Figura 5.26 Diagrama de Momento Flector

## DATOS

$$n = 600 \quad \text{rpm}$$

$$\text{Tor}_{\text{req}} = 10.66 \quad \text{Nm}$$

## MOMENTO GENERADO SOBRE EL EJE EN LA SECCIÓN MAS CRÍTICA

$$M1 := 86.51 \quad \text{Nm}$$

$$T1 := \text{Tor}_{\text{rec}} \quad \text{TORQUE REQUERIDO}$$

## MATERIAL SAE 1018

$$S_y := 370 \quad \text{Mpa} \quad S_u := 440 \quad \text{Mpa}$$

$$F_s := 2.5$$

$$D := \left[ \left[ \frac{32(F_s)}{\pi S_y \cdot 10^6} \cdot \sqrt{(M1)^2 + (T1)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot 1000 \right] = 18.17 \quad \text{mm}$$

## ANALISIS DEL EJE EN LA SECCIÓN CRÍTICA

### ESFUERZO CORTANTE DEL EJE

$$\tau_1 := \frac{16(T1 \cdot 1000)}{\pi \cdot D^3} = 9.05 \quad \text{Mpa}$$

## ESFUERZO DE FLEXIÓN DEL EJE

$$\sigma_1 := \frac{32(M_1 \cdot 1000)}{\pi \cdot D^3} = 146.89 \text{ Mpa}$$

## TENSIÓN POR CORTANTE

máximo

mínimo

$$\tau_{m2} := \tau_1$$

$$\tau_{a2} := 0$$

## TENSIÓN POR FLEXIÓN

máximo

mínimo

$$\sigma_{\max 2} := \sigma_1$$

$$\sigma_{\min 2} := -\sigma_1$$

Aplicando la teoría del esfuerzo cortante máximo, se tiene

$$\sigma_{\text{equi1}} := \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max 2} + \sigma_{\min 2}}{2}\right)^2 + 4 \cdot \tau_{m2}^2} = 18.11 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{equi2}} := \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max 2} - \sigma_{\min 2}}{2}\right)^2 + 4 \cdot \tau_{a2}^2} = 146.89 \quad \text{MPa}$$

## CÁLCULO DE FACTORES A FATIGA

$$K_{\text{tamaño}} := 1.24 \cdot D^{-0.107} = 0.91$$

$$K_{\text{carga}} := 0.258 \cdot S_u^{0.125} = 0.55$$

$$K_{\text{confiabilidad}} := 1 - 0.08 \cdot 2.326 = 0.81$$

### CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD

$$S_e := 0.5 \cdot S_u \cdot (K_{\text{tamaño}} \cdot K_{\text{carga}} \cdot K_{\text{confiabilidad}}) = 89.89 \text{ MPa}$$

### FACTOR DE SEGURIDAD A FATIGA

$$F_{\text{seg}} := \frac{S_y}{\sigma_{\text{equi1}} + \frac{S_y \cdot \sigma_{\text{equi2}}}{S_e}} = 0.59$$

### CÁLCULO POLEAS

$$\text{Tor}_{\text{salida\_eje}} := \frac{\text{Tor}_{\text{req}}}{4} = 2.67 \quad \text{N m}$$

$$\text{Rpm}_{\text{salida\_eje}} = 40$$

$$\omega_{\text{salida\_eje}} := \frac{\omega}{4} = 1.05 \quad \text{rad/s}$$

por motivo de funcionamiento

$$\text{Rpm}_{\text{req}} = 434.26 \quad \text{del alternador se requiere}$$

$$\text{Rpm}_{\text{alt\_Fun}} = 700 \quad \text{700 rpm para que empiece a}$$

generar el campo magnético

Entonces

para producir energía eléctrica

$$i := \frac{\text{Rpm}_{\text{alt\_Fun}}}{\text{Rpm}_{\text{salida\_eje}}}$$

$$i = 17.50$$

Para llegar a esta relación de transmisión tenemos 2 poleas de 11plg la que viene de fabricación del alternador de 2 plg.

### PASO 1

#### RELACION DE TRANSMISIÓN DE 11 A 2 PLG

$$\text{polea1} := 11 \quad \text{plg}$$

$$\text{polea2} := 2 \quad \text{plg}$$

$$i1 := \frac{\text{polea1}}{\text{polea2}} = 5.50$$

$$\text{Rpm}_{i1} := 40 \cdot i1 = 220$$

### PASO 2

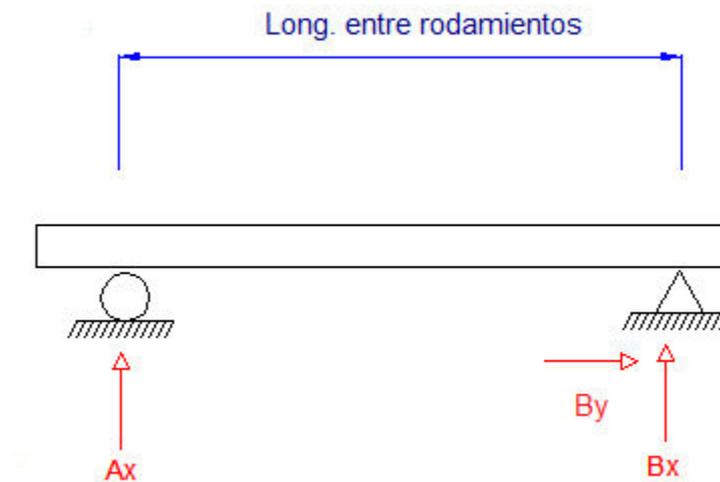
x = diámetro polea a calcular

$$x := \frac{\text{Rpm}_{i1}}{\text{Rpm}_{\text{alt\_Fun}}} \cdot \text{polea1} \quad x = 3.46 \text{ plg}$$

EN EL MERCADO SE TIENEN POLEAS DE 4 Y 3 PLG, SI ESCOGEOS DE 4 PLG REDUCE LAS RPM NECESARIAS POR LO TANTO DECIDIMOS POR LA POLEA DE 3 PLG.

## CÁLCULO Y SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Para el cálculo de rodamientos en el eje se considerarán las fuerzas que se generan en los apoyos de cada uno y se tomará en consideración como referencia el catálogo de la FAG



### **Cálculo de rodamiento en el apoyo A**

$$A_x := 121.61 \quad \text{N}$$

$$A_y := 0 \quad \text{N}$$

$$A_z := 0 \quad \text{N}$$

Cálculo de la fuerza radial según la

$$A_r := \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{1000}$$

$$A_r = 0.12 \quad \text{k(N)}$$

Factores de consideración del catálogo de Fag

$$X_o := 1 \quad \text{Factor radial}$$

$$Y_o := 0 \quad \text{Factor axial}$$

$$P_o := X_o \cdot A_r + Y_o \cdot A_z$$

$$P_o = 0.12 \text{ kN}$$

Se selecciona el rodamiento **6210 FAG**.

### Cálculo de rodamiento en el apoyo B

$$B_y := 809.82 \text{ N} \quad \text{Carga de los 3 discos debido al peso}$$

Rodamiento en el apoyo B

$$B_x := 121.61 \text{ N}$$

$$B_z := 0 \text{ N}$$

$$B_{yy} := \frac{B_y}{1000} \text{ kN}$$

Cálculo de la fuerza radial según la Fag

$$B_r := \sqrt{\left(\frac{B_x}{1000}\right)^2 + B_z^2}$$

$$B_r = 0.122 \text{ K(N)}$$

Factores de consideración del catálogo de Fag

$$X_o := 1 \quad \text{Factor radial}$$

$$Y_o := 0.76 \quad \text{Factor axial}$$

$$P_o := X_o \cdot B_r + Y_o \cdot B_{yy}$$

$$P_o = 0.74 \text{ kN}$$

Cálculo de carga dinámica según Fag

$$X_1 := 0.67$$

$$Y1 := 1.41$$

$$P := X1 \cdot Br + Y1 \cdot Byy$$

$$P = 1.22 \text{ kN}$$

Se selecciona el rodamiento **32010X** del catálogo de la Fag.

## 5.5. DIAGRAMA DE PROCESOS

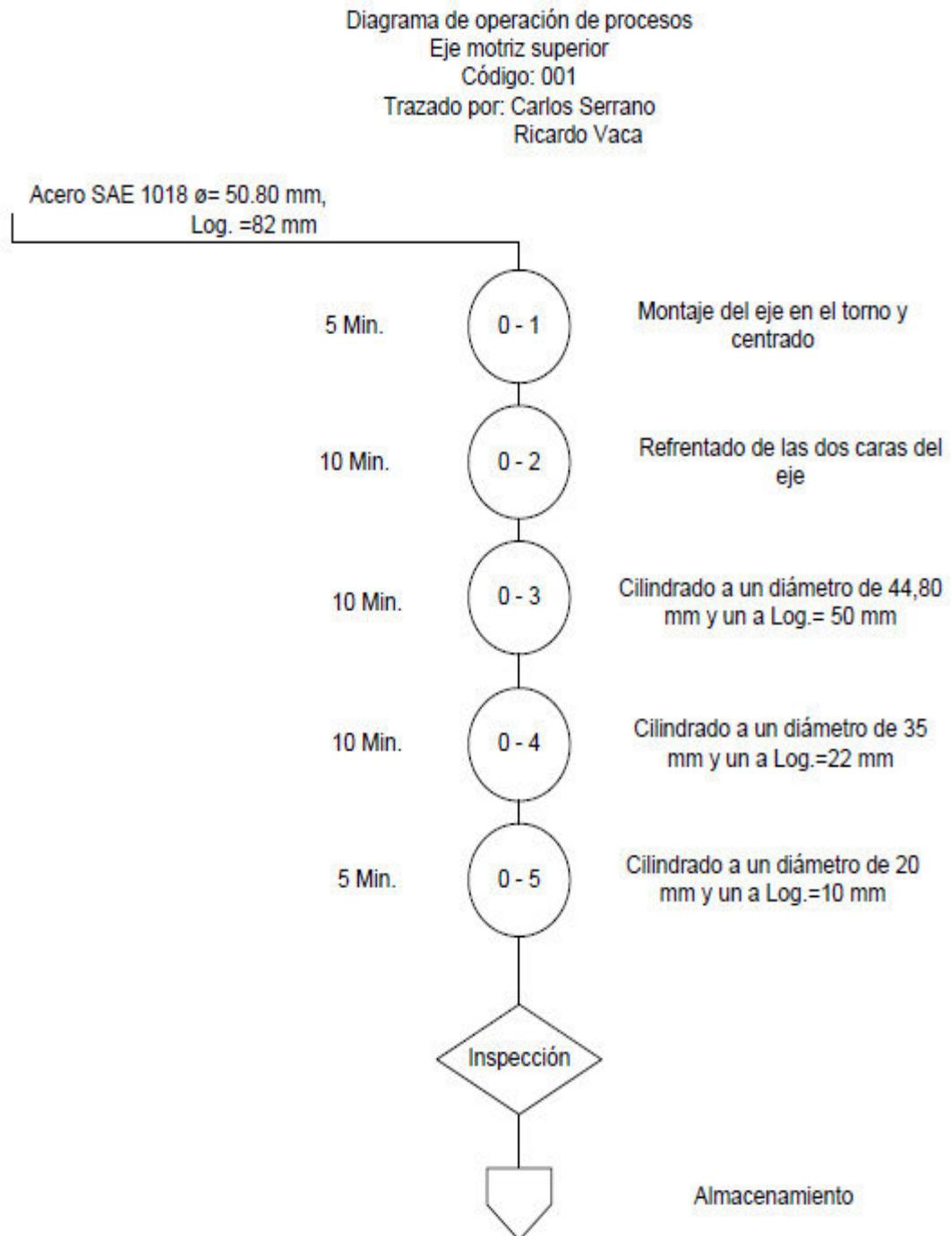


Figura 5.27 Diagrama de Procesos del eje superior

Diagrama de operación de procesos  
 Eje motriz inferior  
 Código: 002  
 Trazado por: Carlos Serrano  
 Ricardo Vaca

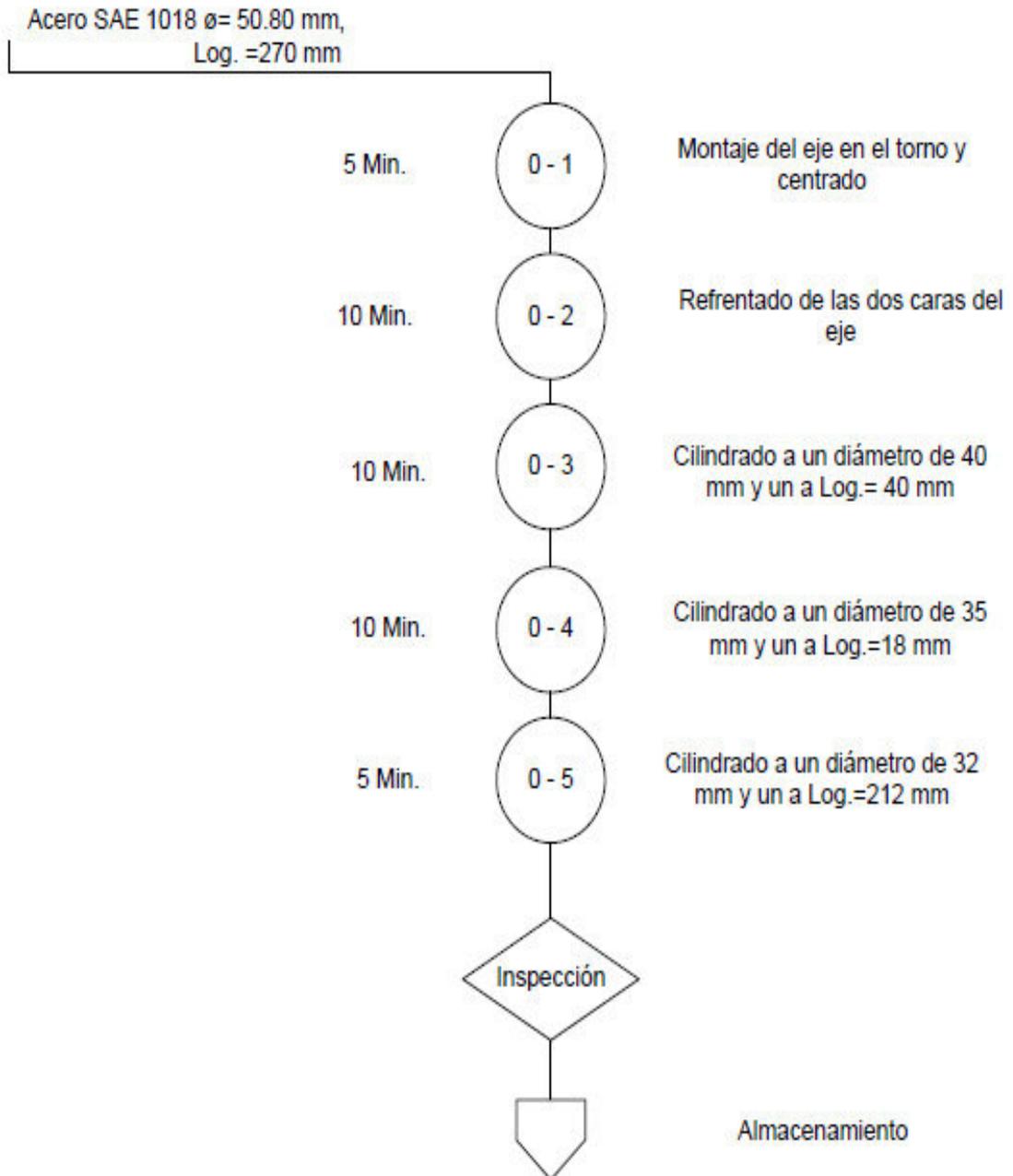
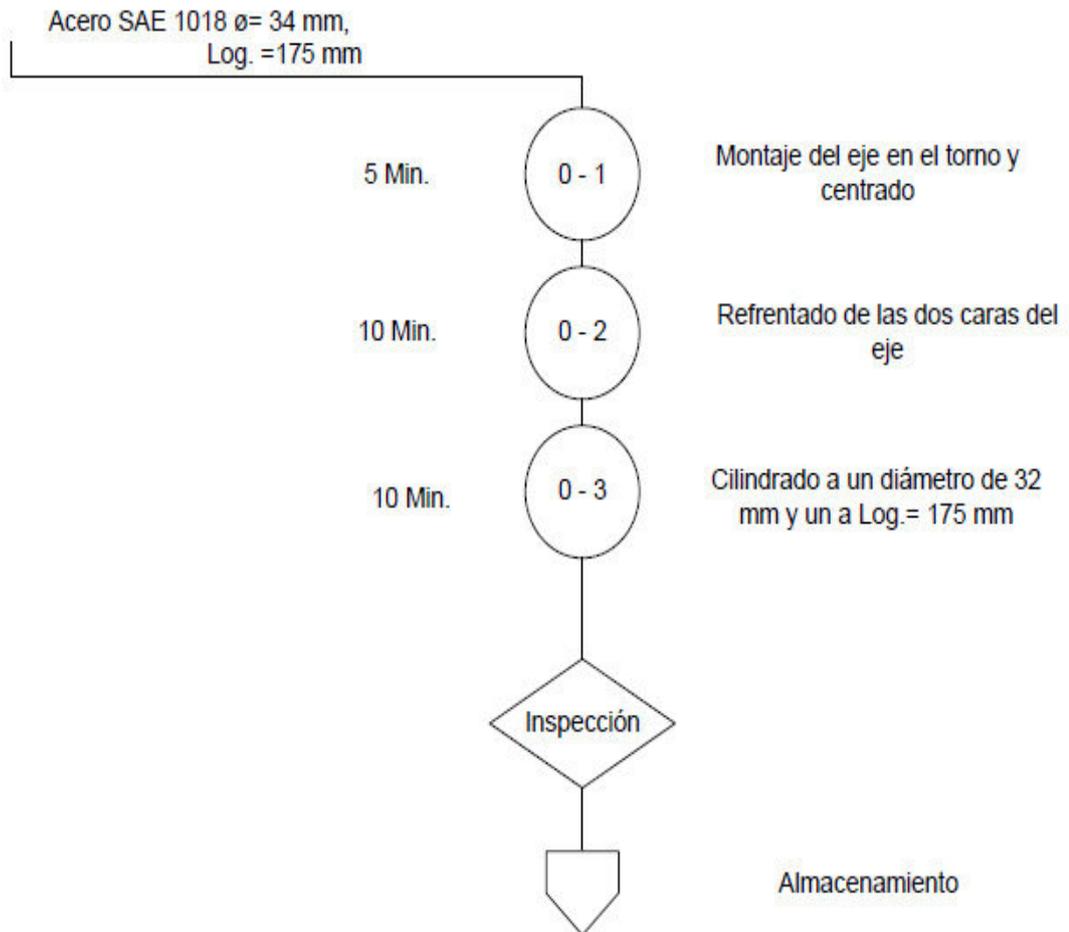


Figura 5.28 Diagrama de Procesos del eje inferior

Diagrama de operación de procesos  
Eje chumacera  
Código: 003  
Trazado por: Carlos Serrano  
Ricardo Vaca



**Figura 5.29 Diagrama de Procesos del eje de la chumacera**

Diagrama de operación de procesos  
Brida Superior  
Código: 004  
Cantidad: 2  
Trazado por: Carlos Serrano  
Ricardo Vaca

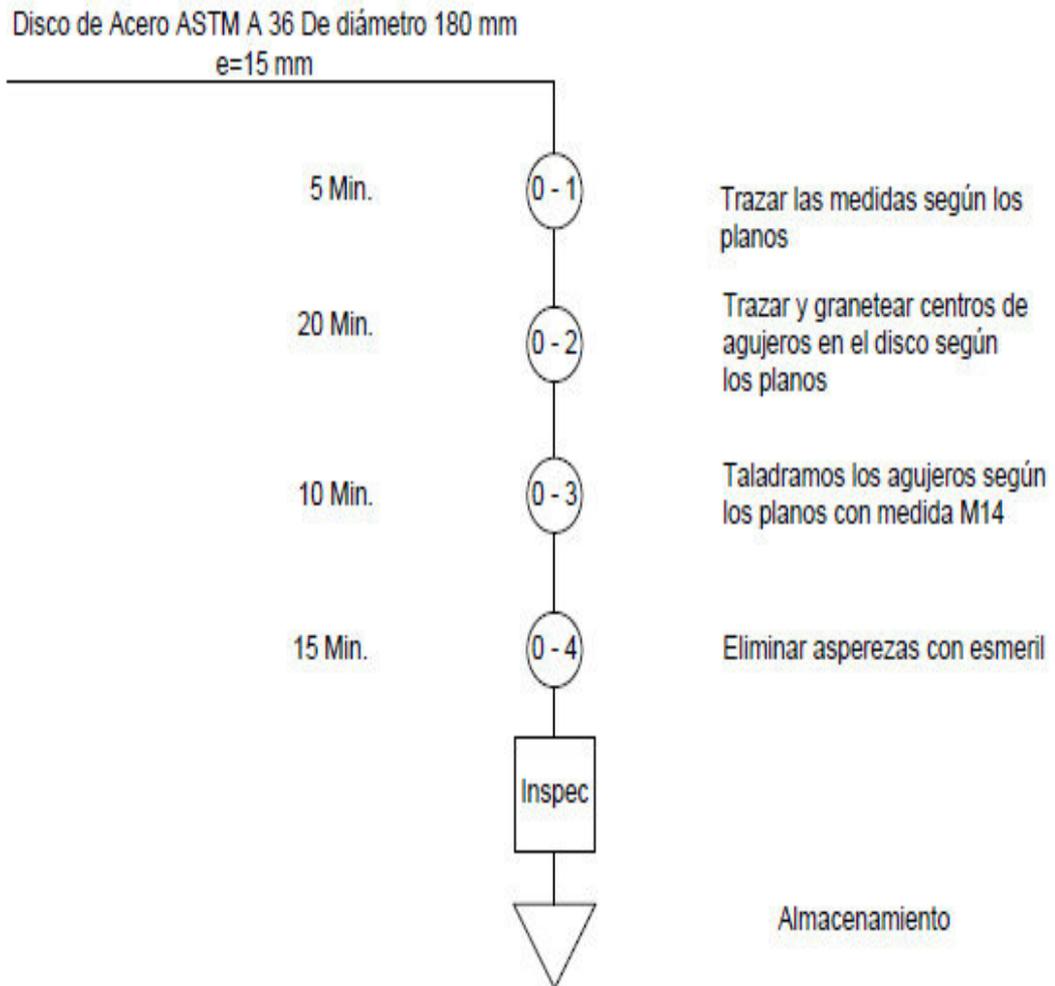
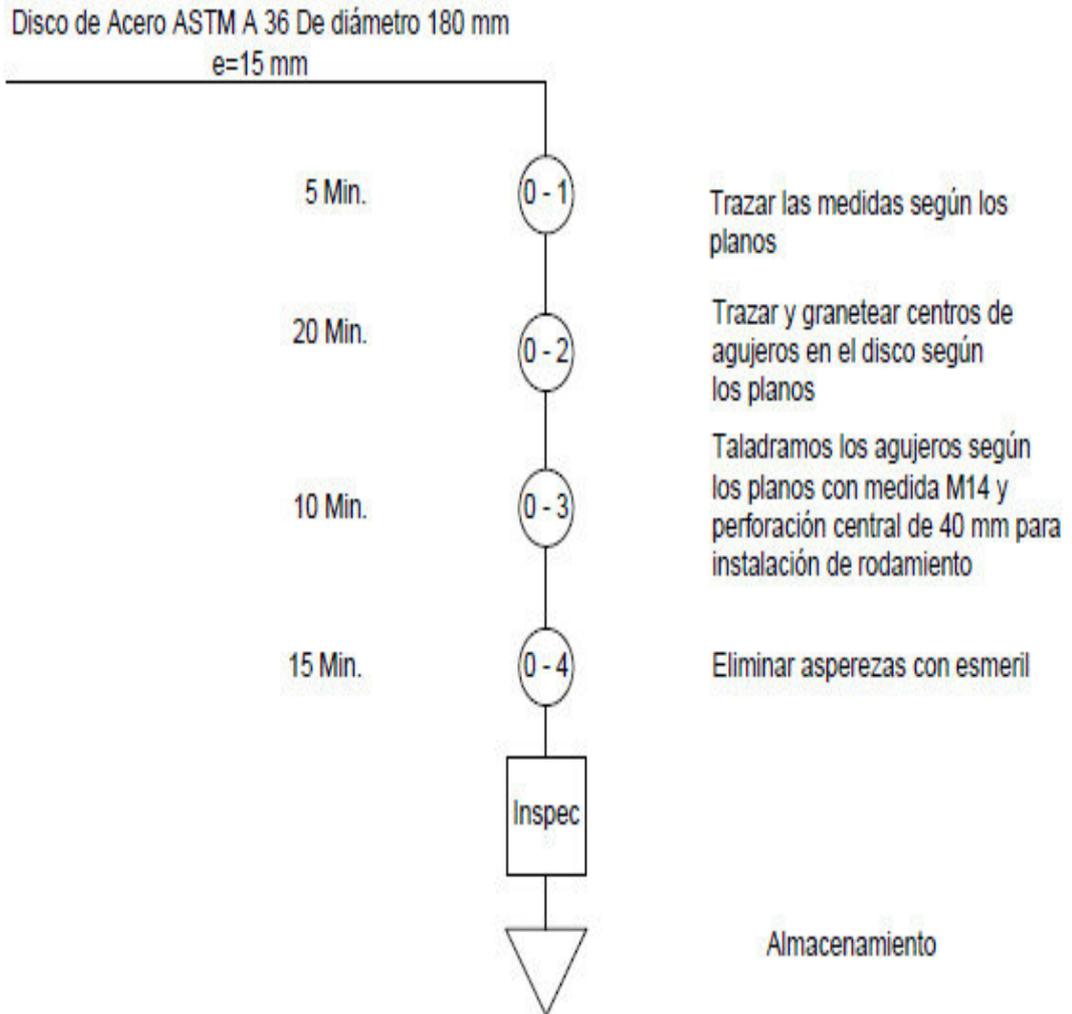


Figura 5.30 Diagrama de Procesos Brida superior

Diagrama de operación de procesos  
Brida Inferior  
Código: 005  
Cantidad:2  
Trazado por: Carlos Serrano  
Ricardo Vaca



**Figura 5.31 Diagrama de Procesos Brida Inferior**

Diagrama de operación de procesos  
Disco de Revolución  
Código: 006  
Cantidad:3  
Trazado por: Carlos Serrano  
Ricardo Vaca

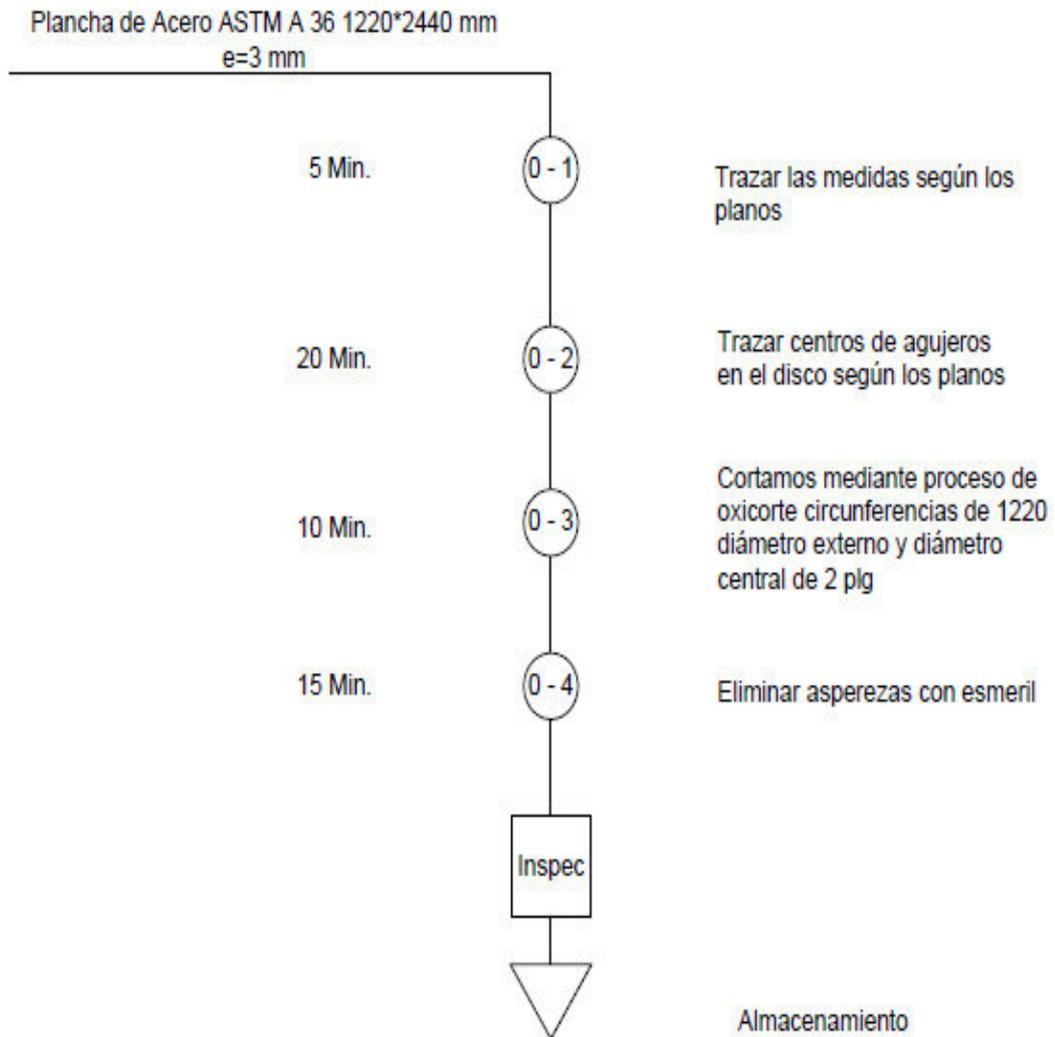


Figura 5.32 Diagrama de Procesos Disco Revolución

## **5.6. PLANOS DE COSNTRUCCIÓN**

Ver ANEXO B

## **5.7. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO**

Ver ANEXO D

# **CAPÍTULO 6**

## **PRUEBAS DE OPERACIÓN**

### **6.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES**

Dentro del desarrollo de las pruebas de un aerogenerador se debe considerar los parámetros y variables que intervendrán directamente en la operación del mismo, entre los cuales tenemos:

La energía que proporcionará el movimiento al rotor del aerogenerador, la cual se encuentra constituida por la velocidad y dirección del viento.

El número de revoluciones que alcanzará el rotor cuando este inmerso en una corriente de viento.

La potencia del aerogenerador que se calculara a partir del voltaje y amperaje que aportará el generador eléctrico (dinamo) en su funcionamiento.

### **6.2 PLAN DE PRUEBAS DE CAMPO.**

#### **6.2.1 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO**

Los permisos que se obtuvieron para la realización de las pruebas fueron en la Reserva Ecológica Antisana, se realizaron pruebas de viento también en el Parque Nacional Cotopaxi, donde los vientos llegaron como máximo en la Laguna de Limpiopungo 47 km/h, en las faldas del Volcán Cotopaxi 42km/h; el viento era mayor, pero los permisos no fueron dados.

Por esta razón se procedió a llevar el prototipo a la Reserva Ecológica Antisana, se tomaron datos dos fechas antes de llevar el prototipo, y una vez

ya instalado se realizaron pruebas por cuatro días, y el quinto se realizó las pruebas de campo con el Ingeniero Roberto Gutiérrez (Director de la tesis).

Cabe recalcar que para nuestro diseño la dirección del viento no es un factor primordial, ya que este diseño funciona sin importar la dirección del viento.

Según los datos tomados en la Reserva Ecológica Antisana, en diferentes lugares, se obtuvo:

**Tabla 6.1 Presentación de Resultados de Velocidad del Viento**

#Da to	FEC HA	LUGAR	HO RA	VELC .
1	MAR 27	LA MICA: Refugio	11:0 0	14.3
2			11:1 0	23
3			11:2 0	16.4
4			11:1 5	18
5			11:1 7	20.3
6			11:3 0	17.4
7			11:3 5	19
8			11:3 8	16.7
9			11:4 0	13.5
10			11:4	18

			3	
11		LA MICA: A 10Km del refugio	12:1 0	21.2
12			12:1 5	20
13			12:2 3	20.6
14			12:3 0	18.4
15			12:3 4	24.2
16			12:4 0	23.7
17			12:4 2	25.2
18			12:4 7	24.3
19			12:5 0	22.3
20			12:5 3	19.8
21		LA MICA: laguna la Mica	13:1 0	22.4
22			13:1 5	25.3
23			13:2 0	25.6
24			13:2 5	23.2
25			13:3 0	26
26			13:3	24.7

			5	
27			13:4 0	25.4
28			13:4 5	25
29			13:5 0	24.8
30			13:5 5	24,2
31	ABRI L 3	Faldas del volcán Antisana	11:1 5	10.2
32			11:2 0	8.3
33			11:2 5	9
34			11:3 0	5.2
35			11:3 5	7.8
36		Refugio ingreso al volcán Antisana	11:5 0	23.2
37			11:5 3	26.1
38			11:5 5	30.1
39			11:5 7	39.2
40			12:0 0	35.2

41	ABRIL 18	MICALOMA	15:30	25.3
42			15:40	25.6
43			15:50	21.1
44			16:00	23.5
45			16:10	19.4
46			16:20	21.3
47			16:30	17.5
48			16:40	20.4
49			16:50	19.3
50			17:00	21.6
51			17:10	15.2
52			17:20	10.3
53			17:30	12.2
54			17:40	13.3
55			17:50	9.3
56			18:00	6.2
57			18:10	7.3
58			18:20	5.4
59			18:30	5
60			18:40	6.1
61			18:50	8.2
62			19:00	5.4
63			19:10	5
64			19:20	5.9
65			19:30	5.3
66			19:40	6.5
67			19:50	4.1
68			20:00	6.4
69			21:00	5.6
70			21:30	2.7

71			22:00	3.1
72			22:30	4.4
73			23:00	4.7
74			23:30	6.4
75	ABRIL 19		0:00	1.8
76			0:30	2.2
77			1:00	3.1
78			8:00	7.5
79			8:20	8.3
80			8:40	4.2
81			9:00	4.7
82			9:20	2.2
83			9:40	1.8
84			10:00	3.2
85			12:00	18.4
86			12:20	22.4
87			12:40	18.2
88			13:00	13.6
89			13:20	25.3
90			13:40	35.3
91			14:00	40.2
92			17:00	21.2
93			17:20	17.3
94			17:40	10.5
95			18:00	13.2
96			18:20	10.6
97			18:40	8.8
98			19:00	12.3
99	ABRIL 20		11:00	10.3
100			11:30	15.5

101			12:00	21.5
102			12:30	33.2
103			13:00	25.6
104			13:30	33.1
105			14:00	30.2
106			14:30	35.9
107			15:00	37
108			15:30	36.4
109			16:00	18.2
110			16:30	21.1
111			17:00	14.2
112	ABRIL 21		11:00	21.2
113			11:30	19.2
114			12:00	24.1
115			12:30	25.4
116			13:00	31.1
117			13:30	21.1
118			14:00	12.1
119			14:30	17.3
120			15:00	19.7

### 6.2.2 DETALLE DEL PLAN DE PRUEBAS.

- Posicionar el equipo a 20m de altura del refugio de Micaloma, para obtener mayor proporción del viento.
- Verificar que la máquina se encuentre a nivel o lo más próximo para evitar desbalanceo..
- Conectar multímetros en la salida del generador para medir voltaje y amperaje respectivamente.
- Conectar anemómetro y ensamblar tacómetro para medir velocidad de viento y RPM respectivamente.

- Esperar unos segundos hasta que la máquina se estabilice.
- Hacer la toma de datos (Voltaje, Amperaje, RPM y Velocidad de viento) siguiendo este orden, tomando en cuenta que la velocidad de viento debe ser tomada cuando el equipo esté ya en movimiento.

**Datos:**

**Tabla 6.2 Datos Pruebas de Operación**

Nro.	Vel. Viento	RPM	Voltaje	Amperaje
	Km/h		V	A
1	20	8	-	-
2	25	12	-	-
3	30	20	-	-
4	30	23	-	-
5	30	26	0.55	0.21
6	35	26	-	-
7	35	31	1.21	3.15
9	35	29	2.23	13.12
9	40	38	2.70	18.17
10	40	50	5.15	40

### 6.2.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

**Tabla 6.3 Presentación de Potencias Efectivas**

<b>Nro.</b>	<b>Potencia Activa</b>
	<b>V*A</b>
1	-
2	-
3	-
4	
5	0,1155
6	-
7	3,8115
8	29,4583
9	49,059
10	206

### **6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para realizar el análisis de resultados, primero se debe tener en cuenta que el prototipo experimental debe funcionar con vientos desde 25km/h, y su tope es de 150 km/h; ya que se lo sobredimensionó, por la razón que este diseño podría funcionar en la Antártica.

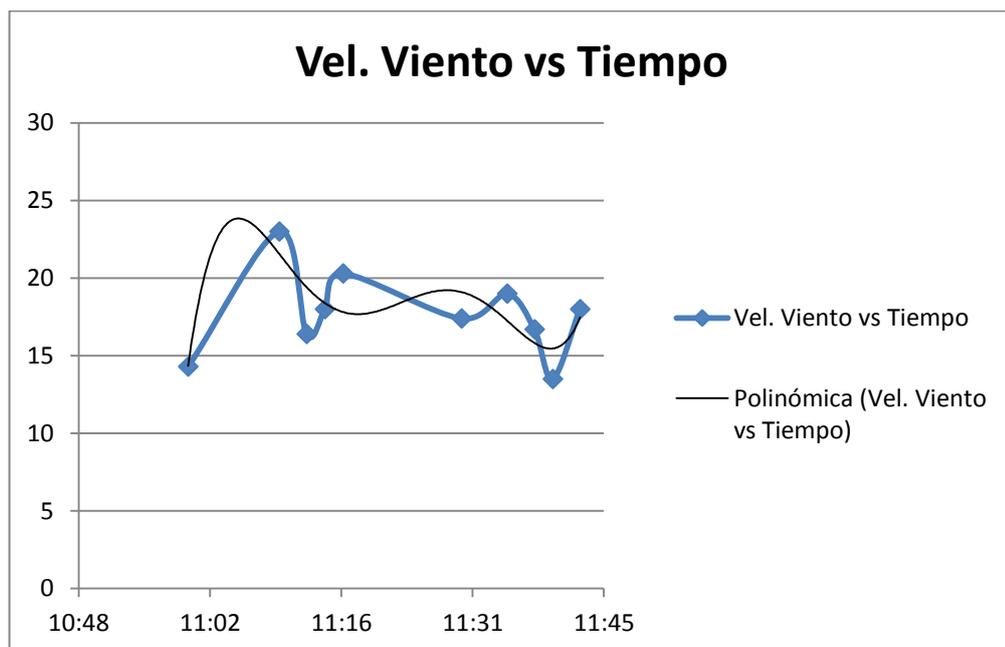
Por los datos experimentales se tiene que el prototipo comienza su funcionamiento a partir de los 30km/h, lo que nos da un error del 16,7%.

Se lo puede explicar por la razón que la velocidad del viento no es constante y no brinda la presión necesaria para romper la inercia del prototipo y las

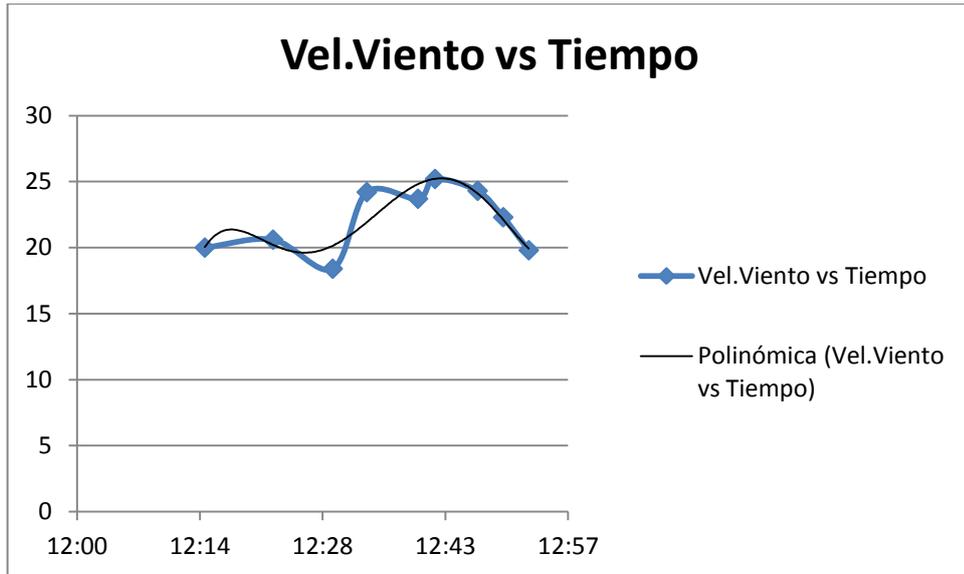
pérdidas que existen por efecto de la transmisión de potencia desde el eje principal hasta el generador eléctrico.

Se determinó que el error en las RPM es del 10% aproximadamente el cual es efecto de la resistencia que presentan los diferentes elementos mecánicos que intervienen en el sistema, como chumaceras, rodamientos en los extremos, fricción de las bandas, además de que solo los  $\frac{3}{4}$  de todo el viento que ingresa al Savonius es aprovechado.

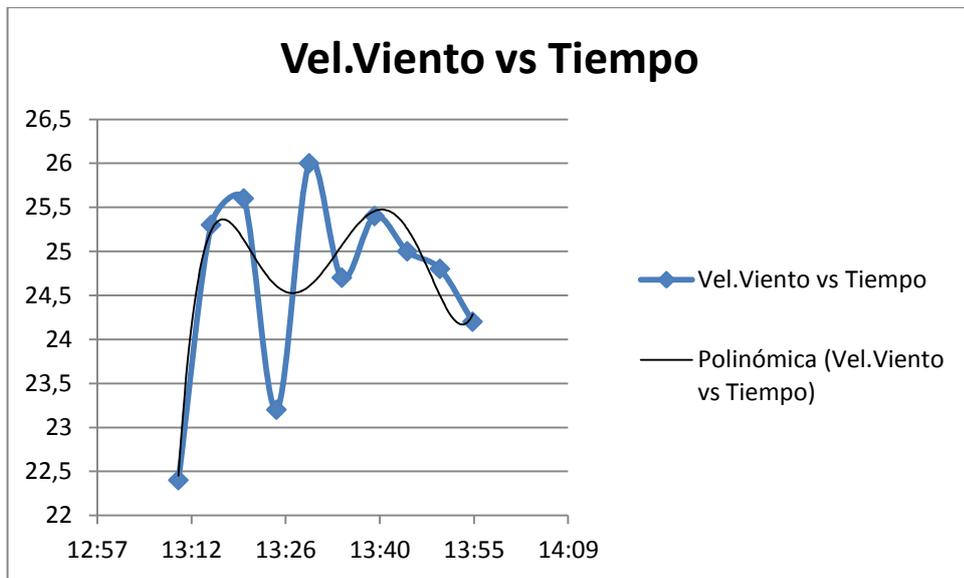
Los errores producidos en el cálculo del torque son debidos a que dicha máquina es un sistema de bajo torque, debido a que el radio del rotor es pequeño y aprovecha la velocidad de viento para transformarla en altas revoluciones.



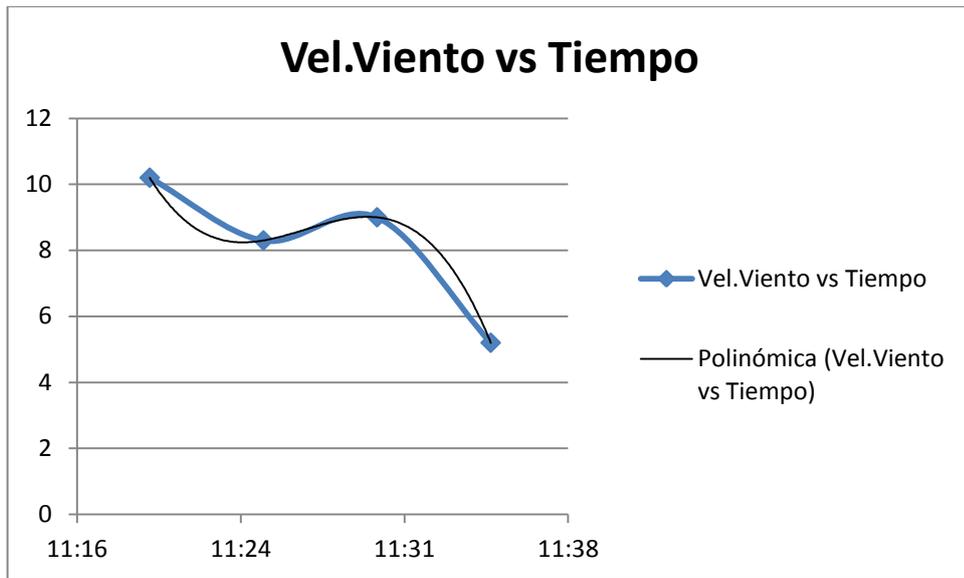
**Figura 6.1 Día 1 La Mica Refugio**



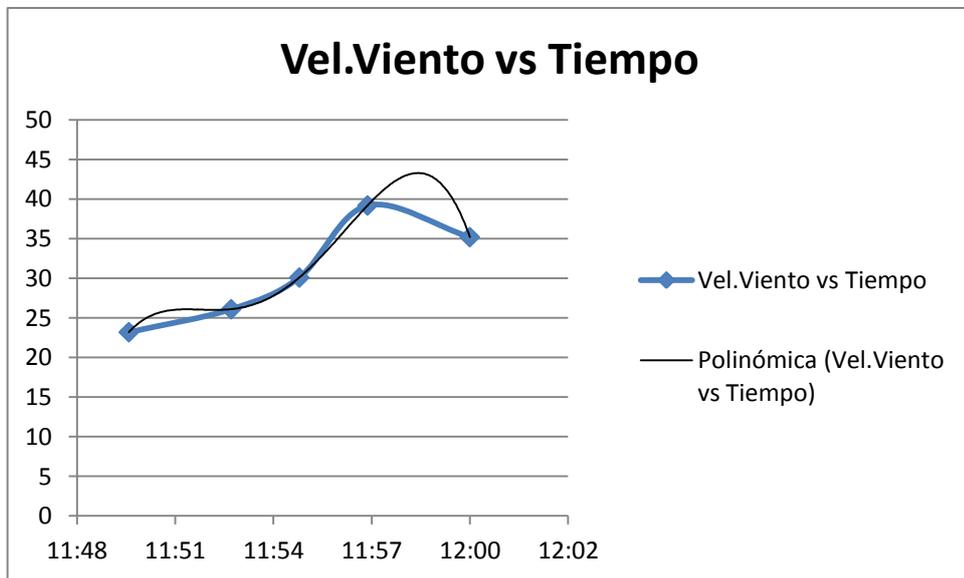
**Figura 6.2** Día 1 La Mica a 10km del refugio



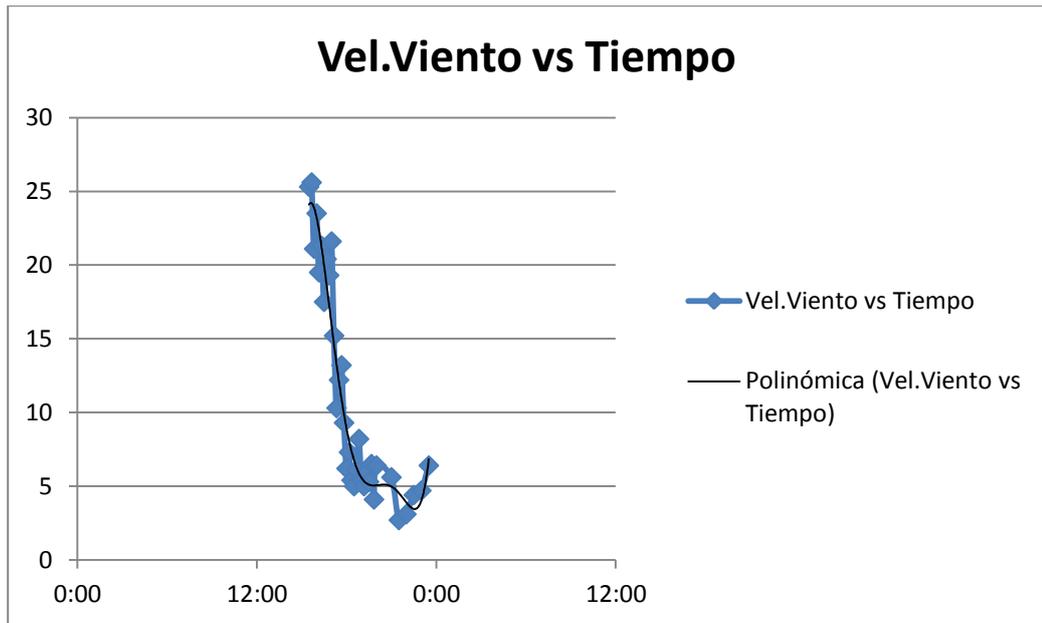
**Figura 6.3** Día 1 Laguna la Mica



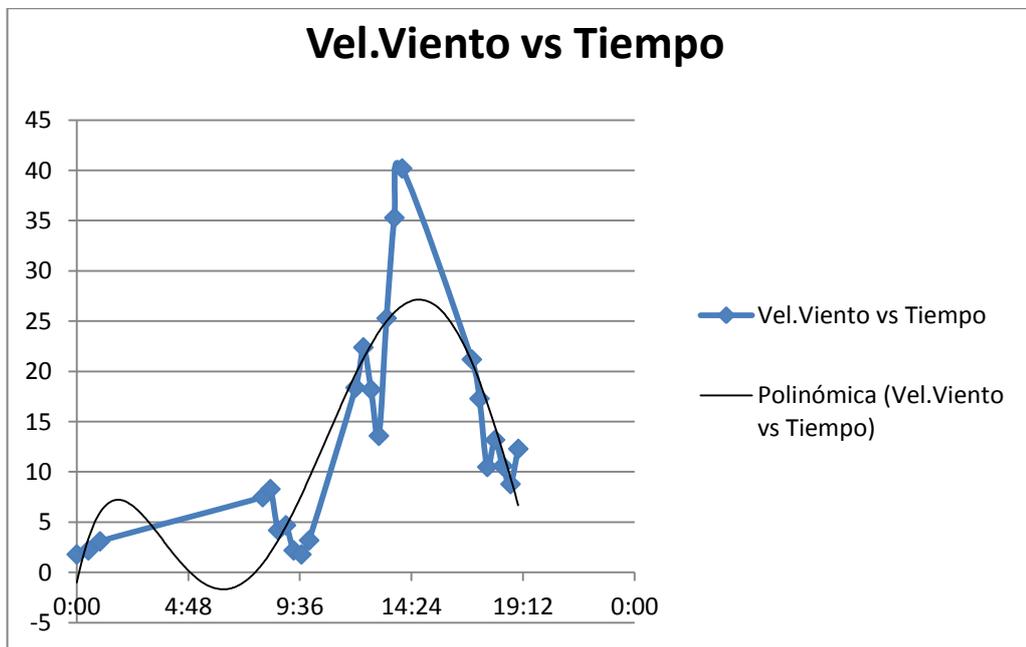
**Figura 6.4** Día 2 Faldas del Volcán



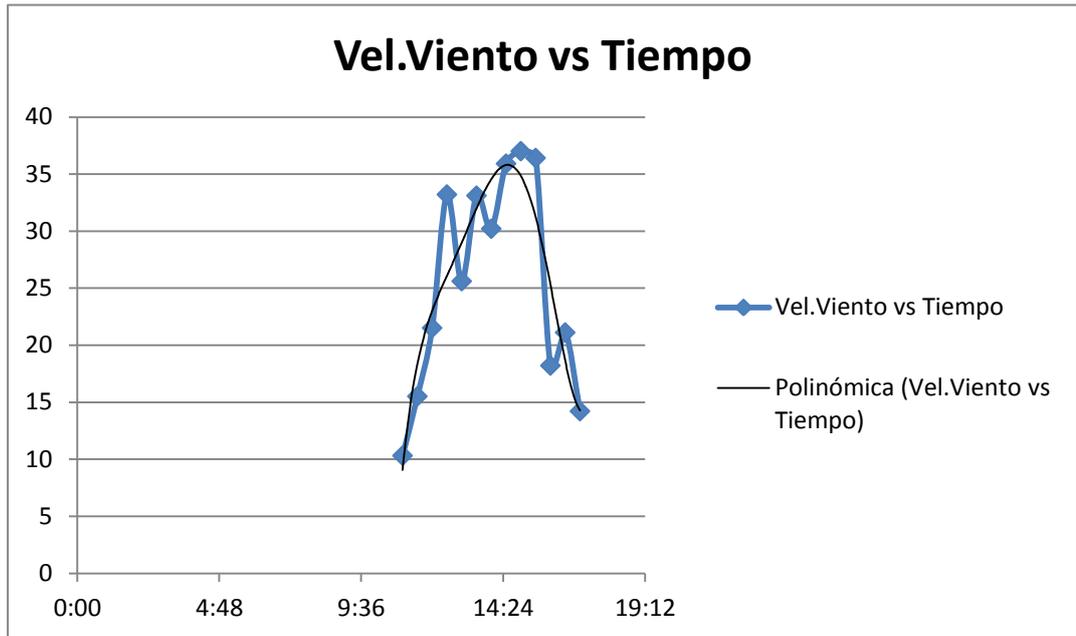
**Figura 6.5** Refugio Ingreso al Volcán



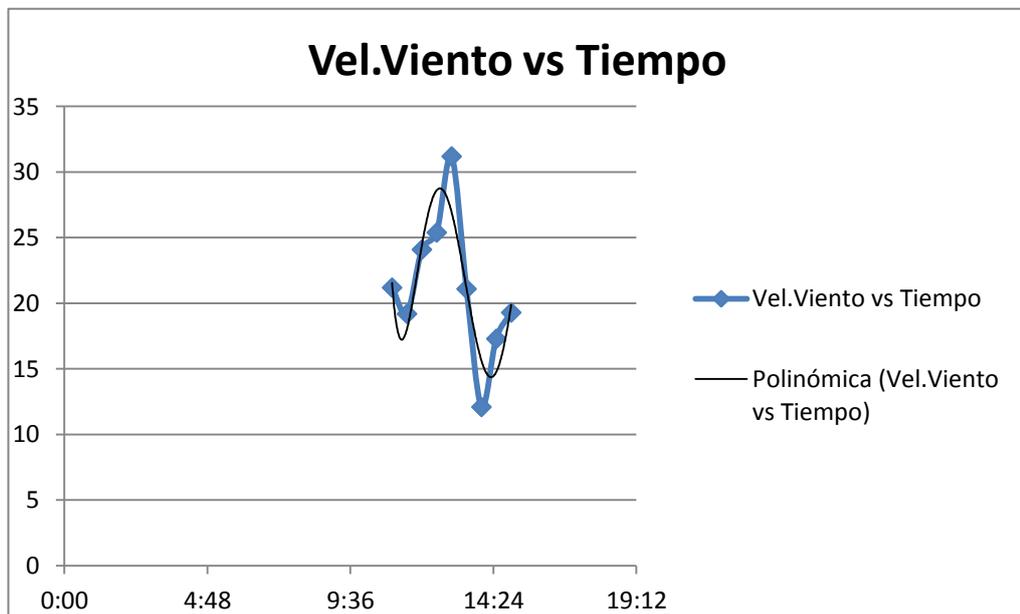
**Figura 6.6 Día 3 Micaloma**



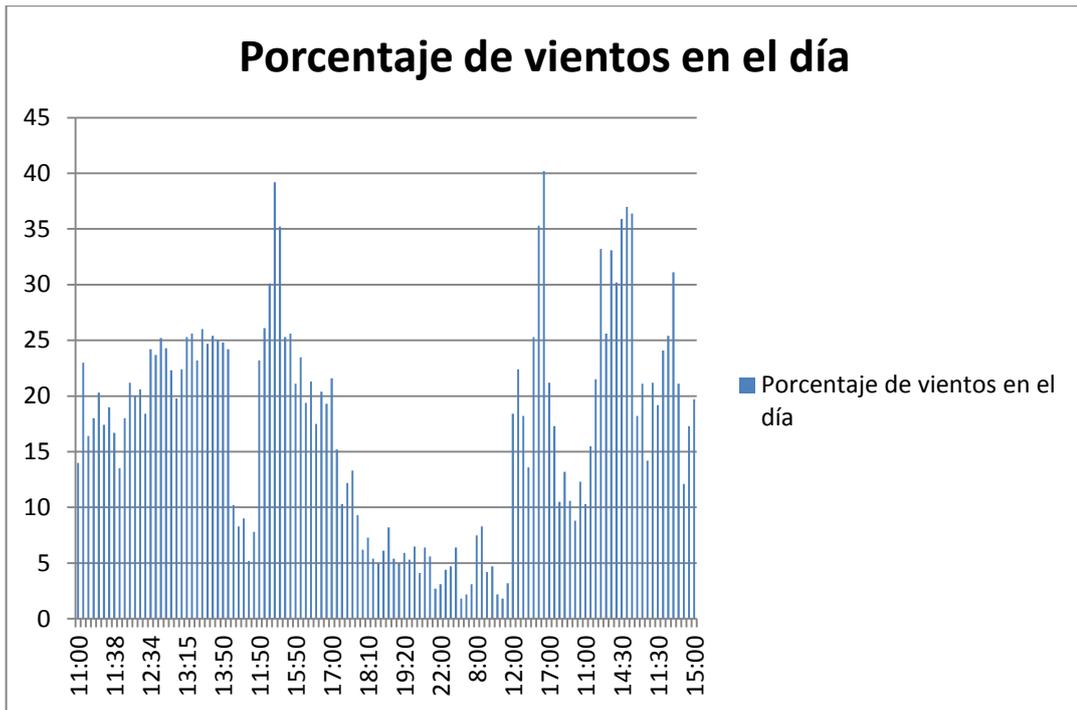
**Figura 6.7 Día 4 Micaloma**



**Figura 6.8 Día 5 Micaloma**



**Figura 6.9 Día 5 Micaloma**



**Figura 6.10 Totales de vientos.**

Por todo el tiempo en el cual se desarrollaron la toma de datos, se pudo observar que la mayoría de vientos empezaron a las once de la mañana, suben en una gran magnitud hasta las cinco de la tarde y empiezan a decrecer hasta la noche.

Las pruebas se desarrollaron en este rango y como máximo se llegaron a vientos de 40 km/h; como resultado el prototipo tuvo su funcionamiento, pero en una eficiencia de un 15% ya que se necesitaban vientos más fuertes para que comience a generar mayor energía.

# CAPITULO 7

## ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

### 7.1. EVALUACIÓN ECONÓMICA

#### 7.1.1. COSTOS DIRECTOS

Se refiere a los materiales que forman parte integral de la máquina, servicios de fabricación y mano de obra.

##### 7.1.1.1 Costos de materiales directos

Costos de materiales directos

Se refiere a los materiales que se encuentran físicamente y forman parte integral de la máquina y se detallan en la tabla 7.1.

##### 7.1.1.2. Costo de servicios

Son los costos que constituyen el uso de equipos y máquinas herramientas que no se dispone en el taller, se detallan en la tabla 7.2.

##### 7.1.1.3. Costo de mano de obra directa

Es el costo del personal que realiza diferentes actividades en el proceso de construcción de la máquina. El valor asignado a la hora de trabajo de un obrero se considera como 2.50 USD/hora

Las actividades realizadas por el obrero son las siguientes:

- Cortes realizados según los planos individuales.
- Perforaciones en los diferentes elementos de la máquina.
- Limpieza de los componentes de la máquina.
- Pintura de los elementos externos tales como la estructura, todos los soportes tanto del generador y chumaceras.
- Ensamblaje de la máquina.

Estos costos se detallan en la tabla 7.3.

#### 7.1.1.4. Costo de diseño

Son los costos que abarcan los gastos en el proceso de diseño del prototipo y se detallan en la tabla 7.6

#### 7.1.2. COSTOS INDIRECTOS

##### 7.1.2.1. Costos de materiales indirectos

Son los materiales necesarios para el proceso de construcción, pero no necesariamente se encuentran en la máquina y se detallan en la tabla 7.4.

##### 7.1.2.2. Otros costos indirectos

Se detallan en la tabla 7.5.

#### 7.1.3. COSTOS DE LA MÁQUINA

El costo de la máquina es la suma de todos los costos descritos en los párrafos anteriores y se detallan en la tabla 7.7.

**Tabla 7.1. Costo de materiales directos**

<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Costo Unitario (USD)</b>	<b>Subtotal (USD)</b>
Tubo cuadrado 1 1/2*1.8	9	18,75	168,75
Eje SAE 1018 1 1/2*6 plg	1	4,46	4,46
Rodamiento bolas 6006 2RS	1	3,93	3,93
Chumacera UCP20516	2	7,95	15,9
Pernos 9/16*2 tuerca, arandela plana y de presión	10	1,16	11,6
Rodamiento cónico 30207 CM3	1	10,71	10,71
Platina 1 *1/8	8	1,043	8,344

**Tabla 7.1. Costo de materiales directos (continuación)**

<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Costo Unitario (USD)</b>	<b>Subtotal (USD)</b>
Tubo redondo 5/8 * 1.5	6	1,22	7,32
Polea de 11 plg una via tipo A	1	14,8	14,8
Perno 3/8*4 AC-G8	12	0,34	4,04
Tuerca 3/8 AC 304 inoxidable	12	0,13	1,54
Rodela de Presión 3/8	12	0,02	0,24
Tubo redondo 2plg*3mm	1	29,55	29,55
Tool negro 0,9 mm	2	23,21	46,42
Discos Int. 50/ 1220*1220*3	3	61,97	185,91
Acero SAE 1018 2 plg	1	2,82	5,80
Acero 1045 50 mm	1	3,42	16,41
Angulo 1*3/16	1	11,19	11,19
IVA 12%			65,63
<b>TOTAL USD</b>			<b>612,54</b>

**Tabla 7.2. Costos de servicios**

<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Costo Unitario (USD)</b>	<b>Subtotal</b>
Servicios y uso de herramientas (horas)	120	5	600
Servicio de Corte (c/u)	10	0,7	7
Servicio de Dobles	5	0,7	3,5
<b>TOTAL USD</b>			<b>610,5</b>

**Tabla 7.3. Costos mano de obra directa**

<b>Descripción</b>	<b>Cant. Horas</b>	<b>Costo Unitario (USD)</b>	<b>Subtotal (USD)</b>
Mano de obra obreros	300	2.5	375
<b>TOTAL USD</b>			<b>750</b>

**Tabla 7.4. Costo de materiales indirectos**

<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Costo Unitario (USD)</b>	<b>Subtotal (USD)</b>
Electrodo Aga 6011 x1/8	10	0,25	2,80
Discos de corte	5	3,75	21,00
Discos de pulido	5	0,92	5,15
Juego de llaves Hexagonales	1	6,45	7,22
Juego de destornilladores	1	13,57	15,20
<b>TOTAL USD</b>			<b>51,37</b>

**Tabla 7.5. Otros costos Indirectos**

<b>Ítem</b>	<b>Subtotal (USD)</b>
Energía Eléctrica Construcción	50
Energía Eléctrica Diseño	20
Agua	10
Teléfono	20
Internet	20
Vehículo	210
Combustible	50

Alimentación	40
Imprevistos	20
<b>TOTAL USD</b>	<b>440</b>

**Tabla 7.6. Costos de diseño**

Ítem.	Costo (USD)	Tiempo (Mes)	Subtotal (USD)
Diseñador	700	1	700
Impresiones	20	1	20
Material técnico	20	2	40
<b>TOTAL USD</b>			<b>760</b>

**Tabla 7.7. Costo total del Prototipo Savonious**

Ítem	Subtotal (USD)	Porcentaje
Costo materiales	612,54	19,3
Costos indirectos	440	13,9
Costo de diseño	760	24,0
Costo de servicios	610,5	19,2
Costo mano de obra	750	23,6
<b>TOTAL</b>	<b>3173,04</b>	100

## 7.2. EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera consiste en verificar que tan rentable es la construcción del prototipo mediante el cálculo del valor actual neto y la tasa interna de retorno.

Se ha determinado que la vida útil de la máquina, va a ser de 5 años debido a que está constituida de acero y otros materiales que tienen una elevada durabilidad.

Para la evaluación financiera los costos del proyecto se deben agrupar según se detalla en la tabla 7.8.

**Tabla 7.8. Costo del prototipo Generador Savonious (Inversión inicial)**

Ítem	Subtotal (USD)
Costo materiales	663,91
Costo de servicios	610,50
Costo mano de obra	750,00
<b>TOTAL</b>	<b>2024,41</b>

### 7.2.1. VALOR ACTUAL NETO (VAN)

Es un procedimiento que permite determinar si se cumple con el objetivo básico financiero: maximizar la inversión mediante el cálculo de un flujo de caja futuro, verificando si el proyecto de inversión es recomendable y sea aceptado.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (7.1)$$

VAN = Flujo de caja neta – Inversión.

De donde:

$BN_t$  : Beneficio neto del flujo del período t

$I_0$  : Inversión Inicial

n : Número de años

i : Tasa de descuento , rentabilidad mínima que se espera del proyecto

### 7.2.1.1. Cálculo de BNt

El beneficio neto se calcula haciendo uso de las tablas 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 y 7.13.

**Tabla 7.9. Precio de KW/h**

Ítem	Valor (USD)
Precio de kW/h	0,80

**Tabla 7.10. Ventas anuales**

Ítem	Unidad	Valor
Generadores	8	2834,17
<b>VENTAS</b>	<b>USD</b>	<b>22673,39</b>

**Tabla 7.11. Costos de producción anuales**

Ítem	Valor (USD)	Valor Total (USD)
Costo materiales	663,91	5311,28
Costo de mano de obra	750	6000
Costo del transporte	210	1680
Costo de servicios	610,5	4884
Costos de mantenimiento	210	1680
<b>TOTAL DE COSTOS PRODUCCION (USD)</b>		<b>19555,28</b>

**Tabla 7.12. Beneficio neto anual.**

Ítem	Valor (USD)
Ventas	22673,39
Costo de producción	19555,28
<b>Beneficio neto</b>	<b>3118,11</b>

La proyección de la máquina es a cinco años y la inflación para maquinarias tomada en cuenta para el proyecto produce un incremento del 10% anual y se detalla en la tabla 7.13.

**Tabla 7.13. Cálculo del VAN**

Cálculo del VAN						
n	0	1	2	3	4	5
lo	2024,41					
<b>BNT</b>		3118,11	3429,92	3772,91	4150,20	4565,22
i	20%	20%	20%	20%	20%	20%
$(1+i)^n$	1	1,20	1,44	1,72	2,07	2,48
<b>fnc = BNT / <math>(1+i)^n</math></b>		2598,43	2381,89	2193,55	2004,93	1840,82
<b>van</b>	<b>11019,61</b>					

El resultado del VAN es mayor al de la inversión, por lo que el proyecto va a producir ganancias por encima de la rentabilidad exigida y es aceptable.

### **7.2.2. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

La tasa interna de retorno es un indicador de rentabilidad de un proyecto, a mayor valor, mayor rentabilidad, y se refiere a la evaluación del proyecto en función de una tasa única de rendimiento por período, y se resume en el cálculo del VAN igualado a cero.

$$\sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 = 0 \quad (7.2)$$

La tasa interna de retorno se compara con la tasa de descuento, si es mayor se deduce que el proyecto es rentable.

**Tabla 7.14. Cálculo del TIR**

Cálculo de la TIR						
n	0	1	2	3	4	5
<b>Io</b>	2024,41					
<b>BN</b>	-2024,41	3118,11	3429,92	3772,91	4150,20	4565,22
<b>TIR</b> %	162	%				

El resultado del TIR de la tabla 7.14 es mayor que la tasa de descuento asumida del 20%, por lo que se concluye que el proyecto es rentable.

# CAPITULO 8

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1. CONCLUSIONES

- El desarrollo de la presente tesis cumplió con su objetivo principal, que fue generar la energía necesaria para derretir hielo; además abastecer de agua a una persona en estado de emergencia.
- Para la construcción del prototipo se analizó tres alternativas y se determinó que en las condiciones de la Antártica la mejor opción es la energía eólica.
- El mecanismo de bandas es una solución acertada para incrementar la velocidad de giro de nuestro generador, ya que se necesitó altas revoluciones.
- El software “SOLIDWORKS” es una herramienta importante para interpretar el comportamiento del fluido mediante un estudio por elementos finitos, en situaciones en las cuales no se pueden obtener las condiciones deseadas.
- Con los sistemas de conversión de energía eólica para generación eléctrica, se reduce la dependencia de combustibles fósiles, por cuanto disminuyen los niveles de emisiones contaminantes, asociados al consumo de este tipo de combustibles.
- La investigación dentro del campo eólico y el desarrollo de nuevos diseños y materiales para aplicaciones en aerogeneradores eólicos, hacen de esta

tecnología una de las más dinámicas, por lo cual constantemente están saliendo al mercado nuevos productos más eficientes con mayor capacidad y confiabilidad.

- Para mejorar la eficiencia de los generadores eólicos y el uso de su energía se debe tener un estudio de vientos del lugar donde se va a colocar; para de esta manera saber aproximadamente los horarios de trabajo del aerogenerador.

## **8.2. RECOMENDACIONES**

- Es necesario conocer de las condiciones de operación del generador eléctrico que se dispone para comenzar con el diseño del aerogenerador.
- Confirmar totalmente el lugar donde se va a colocar el generador eólico y tomar en cuenta las velocidades variables y constantes del viento para un correcto uso del mismo.
- Tomar en cuenta la cimentación de la base del generador savonious para el diseño del sistema ya que produce altas vibraciones.
- Analizar las condiciones de selección de rodamientos para bajas temperaturas ya que la lubricación interna de los rodamientos comunes se congelarían.
- Tomar en cuenta el almacenamiento de energía ya que en la Antártica se considera una reserva natural motivo por el cual no se debe contaminar y las baterías de automóvil no servirán para el objetivo.

### 8.3. BIBLIOGRAFÍA

- Bastianon, R. (1992). *Energía del viento y Diseño de turbinas Eólicas*. Argentina, Buenos Aires: Tiempo de Cultura.
  
- Deutschman, A. M. (1991). *Diseño de Màquinas Teoría y Práctica*. México: Continental.
  
- Fernandez, P. (2002). *Energía Eólica*. Madrid: Universidad de Cantabria.
  
- González, J. (2009). *Energías Renovables*. Barcelona: Reverte.
  
- Hewson, E. (1975). *Generation of power form the wind Vol 56*. Alemania.
  
- McCorcmaç, J. (1991). *Diseño de Estructuras Metálicas*. México: Alfaomega.
  
- Mott, R. L. (2005). *Mecànica de Fluidos Aplicada*. México: Pearson Education.
  
- Nuñez, J. A. (2004). *Diseño y Construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
  
- OLADE. (1983). *Aerogeneración de Energía 2da Edición*. Quito.

- Puig, M. (1986). *El poder del Viento*. Barcelona: Ecotopía.
  
- Shigley, J. M. (2002). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: McGrawHill.