

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN
ATMOSFÉRICA DE AGUA (AWG) ACCIONADO MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA.**

**HÉCTOR FERNANDO PARRADO CONTRERAS.
JUAN ANDRÉS DÍAZ RIVERO.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN
ATMOSFÉRICA DE AGUA (AWG) ACCIONADO MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA.**

**HÉCTOR FERNANDO PARRADO CONTRERAS.
JUAN ANDRÉS DÍAZ RIVERO.**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico.

**Director
OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios por darme claridad y fuerza en los momentos difíciles.

A mi familia Nora Contreras, Héctor Parrado, Viviana Parrado, Juan David Parrado y Juanito Parrado, por brindarme el apoyo más incondicional, por sus valiosos consejos y todo su amor y cariño.

A Ángela Castro por su apoyo y hermosa compañía.

Héctor Fernando Parrado Contreras.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía, mi fortaleza y regalarme la sabiduría en todo este camino profesional.

A mis padres Albenis Mercedes y Jaime Alberto, por ser los pilares fundamental de mi vida, y brindarme todo el amor y el apoyo incondicional.

A mi hermana Majo, por estar siempre presente acompañándome en el trayecto de mi carrera.

A mi Tío Gustavo, una gran motivación en todo este cuento de la mecánica.

A mi amigo y compañero de tesis Fercho, con quien hicimos que este sueño se hubiera hecho realidad.

A mis amigos de batalla Camilo, Turqui, Raúl, Cheche, Oscar, Beto, Hernesto, Varo, el parce, Fonseca.

Juan Andrés Díaz Rivero

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Omar Armando Gelvez Arocha por sus consejos, correcciones, conocimientos y aportes que fueron fundamentales para la realización de esta tesis.

A nuestros compañeros de escuela por su compañía durante nuestra formación como profesionales.

A quienes de alguna manera contribuyeron al desarrollo de esta tesis.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	23
OBJETIVOS.....	25
OBJETIVOS GENERALES.....	25
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
1. GENERALIDADES DEL SISTEMA.....	27
1.1 ENERGÍA EÓLICA.....	28
1.1.1 Parámetros representativos de la energía eólica.....	29
1.1.2 Aspectos importantes acerca del viento.....	31
1.1.3 Tratamiento estadístico de los datos del viento.....	41
1.1.4 Tipos de aerogeneradores.....	44
1.1.5 Componentes principales del aerogenerador savonius.....	49
1.2 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	51
1.2.1 Función dentro del prototipo.....	51
1.2.2 Regulador o controlador de corriente.....	52
1.2.3 Inversor de corriente.....	53
1.2.4 Batería.....	53
1.3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	53
1.3.1 Ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por compresión de vapor.	54
1.3.2 Componentes principales.....	57

1.4 CONDICIONES FÍSICAS Y CLIMATICAS EN LA REGIÓN DE LA MESA DE LOS SANTOS.....	60
1.4.1 La mesa de los santos.....	60
1.4.2 Municipio de los santos.....	61
1.4.3 Hacienda vivero la fuente.....	62
1.4.4 Análisis físico de la región.....	63
2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO.....	68
2.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA POR DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE.	69
2.1.1 Función del subsistema generador de agua.....	70
2.1.2 Componentes del subsistema generador de agua.....	70
2.1.3 Principio de operación.....	76
2.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.....	77
2.2.1 Función del subsistema generador de energía.....	77
2.2.2 Componentes del subsistema generador de energía.....	78
2.2.3 Principio de funcionamiento.....	81
2.3 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	82
2.3.1 Función del subsistema de almacenamiento de energía.....	82
2.3.1 Componentes del subsistema de almacenamiento de energía.....	82
3. DISEÑO DETALLADO.....	85
3.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA POR DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE.	85
3.1.1 Diseño de la unidad manejadora.....	86
3.1.2 Índices energéticos del sistema productor de agua.....	103

3.1.3 Variación del calor y generación de agua con respecto a la temperatura de entrada.	107
3.1.4 Selección de los componentes.....	109
3.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.....	113
3.2.1 Dimensionamiento del rotor.	113
3.2.2 Diseño del eje del aerogenerador.	117
3.2.3 Selección de rodamientos.....	122
3.2.4 Distancia entre centros de las poleas.	126
3.3 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.	126
3.3.1 Batería	127
3.3.2 Controlador.	128
3.3.3 Inversor de corriente.	128
4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	129
4.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA POR DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE.	129
4.1.1 Fabricación e instalación de los componentes.....	129
4.1.2 Unión de los elementos del deshumidificador.....	133
4.1.3 Prueba de barrido.	135
4.1.4 Vacío del circuito.....	135
4.1.5 Carga del refrigerante.	136
4.1.6 Prueba piloto.....	137
4.1.7 Estado final del deshumidificador.	138
4.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.....	138
4.2.1 Rotor del aerogenerador.....	139
4.2.2 Eje de transmisión.	140

4.2.3 Alternador.	142
4.2.4 Transmisión de potencia.	143
4.2.5 Bastidor.	144
4.2.6 Instalación del aerogenerador.	145
4.3 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.	145
4.3.1 Batería.	145
4.3.2 Controlador.	146
4.3.3 Inversor de corriente.	146
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	147
5.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA.	147
5.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.	153
5.2.1 Caracterización del alternador.	153
5.2.2 Aerogenerador.	156
5.3 COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE: EFECTO PELTIER Vs SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.	160
5.3.1 Humedad relativa del ambiente Vs. Producción de agua.	161
5.3.2 Consumo energético.	162
5.3.3 Costo de la producción de agua de cada uno de los métodos.	163
6. CONCLUSIONES.	165
7. RECOMENDACIONES.	167
BIBLIOGRAFÍA.	170
ANEXOS.	172

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Capacidad de energía eólica total mundial entre 1996-2011.....	29
Figura 2. Variación del coeficiente de potencia con respecto al TSR y el tipo de turbina.....	31
Figura 3. Esquema de formación de brisas de mar y de tierra.	34
Figura 4. Esquema de formación de brisas de mar y de tierra	34
Figura 5. Perfil vertical de velocidad del viento con la altura.	35
Figura 6. Efectos de un obstáculo sobre el flujo del viento.	39
Figura 7. Anemómetro con veleta.....	40
Figura 8. Esquema de la Rosa de los vientos, ejemplo de frecuencia del viento. .	41
Figura 9. Distribución de velocidad del viento en un año. Ley de weibull.	43
Figura 10. Disposición del eje. (Horizontal y vertical)	45
Figura 11. Clasificación de los tipos de aerogeneradores.	46
Figura 12. Componentes aerogenerador de eje horizontal.....	47
Figura 13. Alabes excéntricos, rotor savonius.	48
Figura 14. Savonius y Darrieus.....	49
Figura 15. Componentes del subsistema de almacenamiento de energía.	52
Figura 16. Temperatura del punto de rocío en un diagrama T-s.....	54
Figura 17. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.	55
Figura 18. Diagrama P-h y Variación de la capacidad COP con respecto a Tcondensación.....	56
Figura 19. Compresor hermético tipo pistón alternativo.....	58
Figura 20. Condensador.	58
Figura 21. Elementos de expansión.....	59
Figura 22. Mesa de los Santos.	61

Figura 23. Casco urbano del municipio de Los Santos.....	62
Figura 24. Ubicación geográfica de la Hacienda Vivero la Fuente.....	63
Figura 25. Hacienda Vivero la Fuente.....	63
Figura 26. Precipitación y evapotranspiración en la región.....	67
Figura 27. Esquema general de todo el prototipo.	68
Figura 28. CAD, Sistema de Refrigeración.	69
Figura 29. Función del subsistema generador de agua.	70
Figura 30. Evaporador. Vista isométrica, lateral y frontal respectivamente.	71
Figura 31. Condensador. Vista isométrica, frontal y lateral respectivamente.	72
Figura 32. Compresor. Vista isométrica, lateral y posterior respectivamente.	74
Figura 33. Tubo capilar. Vista isométrica y frontal respectivamente.	76
Figura 34. Rotor.....	78
Figura 35. Eje del aerogenerador.	79
Figura 36. Sistema de transmisión por poleas.	80
Figura 37. Estructura de sujeción.	81
Figura 38. Regulador o controlador de corriente.....	83
Figura 39. Inversor de corriente DC a AC.....	83
Figura 40. Batería.	84
Figura 41. Sistema productor de agua.....	85
Figura 42. Modelo matemático para la unidad manejadora.	87
Figura 43. Balance de energía entre ambiente y superficie.....	88
Figura 44. Transferencia de calor entre la superficie y el refrigerante.	89
Figura 45. Resistencias desde el aire húmedo hacia el refrigerante.....	90
Figura 46. Resistencias en el evaporador.....	90
Figura 47. Configuración geométrica escalonada del evaporador.	94
Figura 48. Procedimiento de cálculo.....	97
Figura 49. Equivalencia de la constante característica del evaporador.	98
Figura 50. Cálculos en el evaporador.	101
Figura 51. Deshumidificación. Calor latente y calor sensible.....	102
Figura 52. Resultados cálculos evaporador.....	102

Figura 53. Diagrama P-h.....	104
Figura 54. Cálculo del COP y EER.	106
Figura 55. Gráfica AGUAprod Vs Tentrada y Qtotal Vs Tentrada. Para RH 90%	107
Figura 56. Gráfica AGUAprod Vs Tentrada y Qtotal Vs Tentrada. Para RH 80%	108
Figura 57. Gráfica AGUAprod Vs Tentrada y Qtotal Vs Tentrada. Para RH 70%	108
Figura 58. Evaporador seco.....	111
Figura 59. Evaporador sobre alimentado.....	111
Figura 60. Selección del tubo capilar.	112
Figura 61. Subsistema generador de energía.....	113
Figura 62. Coeficiente de potencia en turbinas eólicas.....	114
Figura 63. Densidad de la potencia eólica disponible.	115
Figura 64. Configuración geométrica del rotor.	116
Figura 65. Diagrama de Cortante y Momento Flector, plano X-Y	119
Figura 66. Diagrama de Torque y Fuerza axial. Plano X-Z.....	119
Figura 67. Diagrama de fuerza axial.	119
Figura 68. Diagrama de torsión.....	120
Figura 69. Cargas en los soportes de brida	123
Figura 70. Factor de transmisión por correa.	124
Figura 71. Dimensiones del soporte de brida Tipo FY.	125
Figura 72. Sistema de almacenamiento de energía.....	127
Figura 73. Evaporador del deshumidificador.	130
Figura 74. Compresor seleccionado.	131
Figura 75. Condensador y ventilador seleccionado.	132
Figura 76. Filtro secador.	132
Figura 77. Tubo capilar.	133
Figura 78. Soldadura de los componentes.	133
Figura 79. Tubería utilizada para la conexión de los elementos.	134
Figura 80. Procedimiento de vacío.	136
Figura 81. Carga del gas refrigerante.	136
Figura 82. Prueba piloto en el evaporador.	137

Figura 83. Estado final del generador atmosférico de agua.....	138
Figura 84. Construcción del rotor.....	139
Figura 85. Unión mediante discos de aluminio.	140
Figura 86. Eje de transmisión.	141
Figura 87. Alternador seleccionado.	142
Figura 88. Polea grande.	143
Figura 89. Ensamblaje completo del aerogenerador.	144
Figura 90. Batería seleccionada.	145
Figura 91. Controlador seleccionado.	146
Figura 92. Inversor de corriente seleccionado.	146
Figura 93. Instrumentos de medición.....	147
Figura 94. Gráfica de producción de agua, %HR y Tamb.....	148
Figura 95. Temperatura de condensación, evaporación y del compresor.	149
Figura 96. Consumo energético del sistema.....	150
Figura 97. Gráfica de producción de agua, %HR y T amb.....	151
Figura 98. Temperaturas de condensación, evaporación y del compresor.....	152
Figura 99. Consumo energético del sistema.....	152
Figura 100. Parámetro de operación del alternador.....	154
Figura 101. Caracterización del alternador.	155
Figura 102. Caracterización, valores de corriente y voltaje.	155
Figura 103. Sitio de análisis al aerogenerador.....	156
Figura 104. Curva de potencia del subsistema de generación de energía.	157
Figura 105. Coeficiente de potencia y par con respecto a la velocidad del viento.	158
Figura 106. Coeficiente de par y potencia con respecto al CPR.....	159
Figura 107. Histograma en horas de la velocidad del viento.	159
Figura 108. %RH Vs Prod de agua. S.T.R y efecto peltier.	161
Figura 109. Consumo energético. S.T.R y efecto peltier.	162
Figura 110. Desfase de corriente producido por el factor de potencia.....	168
Figura 111. Diseño del inversor de corriente para cargas inductivas.....	169

Figura 112. Segunda opción para la solución del problema.169

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Escala de longitud consideradas para el estudio del viento.....	32
Tabla 2. Escala de Beaufort.....	36
Tabla 3. Rugosidad para diferentes espacios.....	37
Tabla 4. Especificación del compresor (Torque).....	73
Tabla 5. Especificación de compresor de acuerdo a temperatura de evaporación.	74
Tabla 6. Ventajas y desventajas del tubo capilar.....	75
Tabla 7. Ventajas y desventajas de la válvula de expansión.....	75
Tabla 8. Constantes de la correlación de Sukauskas.....	96
Tabla 9. Factor de corrección F para el número de Nusselt.....	96
Tabla 10. Método para el desarrollo de unidades evaporadoras.....	97
Tabla 11. Especificaciones del compresor.....	109
Tabla 12. Determinando el área del aerogenerador.....	115
Tabla 13. Valores de los puntos de análisis.....	121
Tabla 14. Energía aproximada que debe almacenar la batería.....	127
Tabla 15. Propiedades del acero SAE 1045.....	141
Tabla 16. Potencia entregada por el alternador.....	160

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Especificaciones técnicas del compresor.....	172
ANEXO B. Adquisición de datos, velocidad del viento.....	176
ANEXO C. Planos del aerogenerador.....	181
ANEXO D. Códigos de los calculos en detalle.....	187

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN ATMOSFÉRICA DE AGUA (AWG) ACCIONADO MEDIANTE ENERGÍA EÓLICA*

AUTORES: HÉCTOR FERNANDO PARRADO CONTRERAS¹.
JUAN ANDRÉS DÍAZ RIVERO.

PALABRAS CLAVES: Energía eólica, sistema de refrigeración, renovable, deshumidificación, generación de agua.

DESCRIPCIÓN

La industrialización y la alta demanda de los recursos no renovables han puesto en aumento la contaminación y en consecuencia el deterioro de las fuentes de recursos naturales. Las fuentes hídricas no son la excepción, debido a esto se busca implementar un sistema que mitigue la escasez del agua y que a su vez este sistema se alimente de una fuente de energía renovable como la energía eólica.

Preponderando la idea de energía renovable y generación de agua, se presenta prototipo que encamine soluciones al problema del agua de una manera limpia y sostenible. Este proyecto contempla el diseño de dos sistemas, estos sistemas trabajan en conjunto para realizar el proceso de generación del agua mediante un sistema térmico y generación de energía eléctrica mediante una turbina eólica de baja potencia de eje vertical. La propuesta de diseño del prototipo contiene aspectos teóricos y físicos de ingeniería los cuales nos brindaran las características, comportamiento y funcionamiento de cada uno de los componentes y requerimientos que el sistema presente. Lo anterior a su vez conlleva a un análisis de los resultados generados por la máquina; Con el fin de evaluar los parámetros de operación y presentar las respectivas conclusiones y observaciones. También cabe destacar que para los procesos de manufactura se emplearon diferentes materiales, debido a que se estaba trabajando bajo condiciones del ambiente que requerían materiales adecuados, livianos y operacionales.

* Trabajo de grado.

¹ Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Omar Armando Gelvez Arocha, Ingeniero Mecánico

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE OF ATMOSPHERIC GENERATION OF WATER (AWG) ACTUATED ACROSS EOLIC ENERGY²

AUTHORS: HÉCTOR FERNANDO PARRADO CONTRERAS
JUAN ANDRÉS DÍAZ RIVERO³

KEY WORDS: Eolic Energy, Refrigeration System, Renewable, dehumidification, water generation.

DESCRIPTION:

The industrialization and the high demand of the non-renewable resources have put in increase the contamination and in consequence of it the deterioration of the sources of natural resources. The hydric sources aren't the exception, for this reason it seeks to implement a system that mitigates the shortage of water and that at the same time this system feeds on from a source of renewable energy like the Eolic energy.

Preponderating the idea of renewable energy and generation of water, it presents a prototype that brings solutions to the problem of water in a clean way and sustainable. This project has on mind the design of two systems, this systems works together to realize the process of generation of water across a thermal system and generation of electric energy across an Eolic turbine of low power of vertical axis. The purposes of design of the prototype have theoretic aspects and physicals of engineering which will bring the characteristics, behavior, and performance of each of the components and requirements that the system presents. The above, at the same time entails to an analysis of the results generated by the machine; with the purpose of evaluate the parameters of operations and present the respective conclusions and observations. It is also noteworthy that for the manufacturing process different materials were used, because it was working under ambient conditions requiring adequate lightweight and operational materials.

² Degree Project.

³ Faculty of engineering Physical Mechanical. School of Mechanical Engineering. Director: Omar Armando Gelvez Arocha, Mechanical Engineer

INTRODUCCIÓN.

Actualmente, el uso desmedido de los recursos energéticos no renovables ha provocado un impacto ambiental que obliga a buscar y crear nuevos métodos de obtención de energía y recursos naturales vitales para el ser humano de manera limpia y sostenible.

En regiones apartadas donde la disponibilidad de agua es reducida debido a la falta de fuentes hídricas como ríos, pozos subterráneos, lagunas, poca precipitación etc., se deben buscar nuevas alternativas y métodos para su obtención. La condensación del vapor de agua que contiene el aire del ambiente es uno de los métodos, utilizando un sistema térmico de refrigeración de vapor simple (Compuesto por: evaporador, compresor, condensador y dispositivo de control). La baja temperatura del refrigerante al pasar por el evaporador posibilita la condensación del vapor de agua contenido en el aire.

En el momento que el aire húmedo entra en contacto con una superficie a menor temperatura que la del punto de rocío, se produce un intercambio de energía que permitirá el cambio de fase de las moléculas de H₂O permitiendo su condensación.

Parte de la energía eléctrica que se requiere para el proceso de condensación de humedad es proporcionada por una turbina eólica que aprovechará un porcentaje de la energía cinética que tiene el viento, esta se convertirá en un movimiento rotacional en el eje del rotor y mediante un sistema de transmisión con una alta relación de velocidades se dará movimiento al eje de un generador de corriente que producirá parte de la potencia eléctrica requerida.

Se presentará inicialmente una reseña acerca de la región y sus principales características geográficas y meteorológicas, posteriormente se presentará el

modo en el que se deben tratar los datos estadísticos correspondientes al viento. Se mencionarán aspectos teóricos y principios físicos del funcionamiento del aerogenerador y de un sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor. Se mencionarán y desarrollarán los aspectos concernientes de diseño en los aerogeneradores de baja potencia de eje vertical y los sistemas térmicos de refrigeración por compresión de vapor.

Finalmente se explicarán los procesos de diseño de cada uno de los subsistemas del prototipo y las variables que intervienen en los procesos de construcción, operación y evaluación del mismo. Se analizarán los datos correspondientes a las pruebas y análisis de resultados arrojados por el prototipo. Se darán las conclusiones correspondientes a todo el proceso, se plantearán observaciones y recomendaciones acerca de este tema para quienes quieran desarrollar proyectos afines con el presentado.

OBJETIVOS.

OBJETIVOS GENERALES.

Fomentar y contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, mediante la aplicación de un nuevo método de obtención de agua que permita mitigar los problemas de escasez que tiene la comunidad de la mesa de los santos, aprovechando los recursos naturales de una manera limpia y sostenible por medio de un sistema no convencional de generación de energía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Diseñar y construir un prototipo de generación atmosférica de agua (AWG) accionado mediante energía eólica, para implementarlo en la hacienda “vivero la fuente”, ubicada en la mesa de los santos. El cual contará con los siguientes subsistemas.

- Sistema de producción de agua: Encargado de condensar la humedad del ambiente y obtener 4 Litros de agua por día. Se compone por: Compresor, evaporador, condensador y válvula de expansión o tubo capilar.
- Sistema generador de energía: Compuesto por un sistema de rotación de eje vertical tipo savonius y generador eléctrico de corriente continua que sea capaz de entregar 100 W de potencia.
- Sistema de almacenamiento de energía. Encargado de regular, almacenar y convertir la energía eléctrica entregada por el generador de potencia, con una autonomía de $\frac{1}{4}$ de día (6 horas). Se compone por un regulador de corriente, una batería y un convertidor de corriente DC a corriente AC.
- Estructura del sistema: Bases en la cual estarán fijos todos los sistemas pertenecientes al conjunto, que sea capaz de dar soporte y estabilidad.

Comparar dos métodos de condensación: Un sistema de refrigeración termoeléctrico (Efecto Peltier) y un sistema de refrigeración por compresión de vapor, realizando las siguientes gráficas para observar el comportamiento de los métodos.

- Humedad relativa del ambiente Vs. Producción de agua.
- Consumo energético de cada método Vs. Producción de agua.
- Análisis financiero del uso e implementación de cada sistema.

1. GENERALIDADES DEL SISTEMA.

En la actualidad en el planeta se presenta la necesidad de crear nuevos métodos para generar recursos naturales de una manera limpia y sostenible y evitar la escasez de los mismos ya que son vitales para nuestra supervivencia.

La escasez de agua es uno de los principales retos que tiene nuestra sociedad por superar, por lo tanto se presenta un sistema que es capaz de producir agua a partir de la humedad contenida en el ambiente utilizando un sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor. Parte de la energía eléctrica utilizada por este sistema es energía limpia y sostenible (Energía eólica), para obtenerla se utiliza un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, este aprovecha el flujo de aire que pasa por sus alabes para provocar un giro en su rotor que solidario a un eje convierte la velocidad del viento en energía rotacional, este movimiento, a su vez se transmite a través de un sistema de transmisión por poleas con una alta relación de velocidades a un generador de corriente que producirá parte de la potencia eléctrica requerida para la generación de agua.

A continuación se presentan los aspectos generales concernientes al prototipo.

- Energía eólica.
- Almacenamiento de energía.
- Sistema de refrigeración por compresión de vapor.
- Condiciones físicas y climáticas en la región de la mesa de Los Santos.

1.1 ENERGÍA EÓLICA

La energía que provee el viento se ha utilizado como fuerza motriz para diferentes aplicaciones, inicialmente utilizada para el bombeo de agua, el movimiento de los barcos en el mar y los molinos de viento. La energía eólica sigue recuperando un papel importante en la generación de energía junto con su principal característica, limpia y sostenible. Este tipo de energía no convencional ha venido evolucionando de un modo que resulta eficiente, económica y técnicamente viable para poder implementarse.

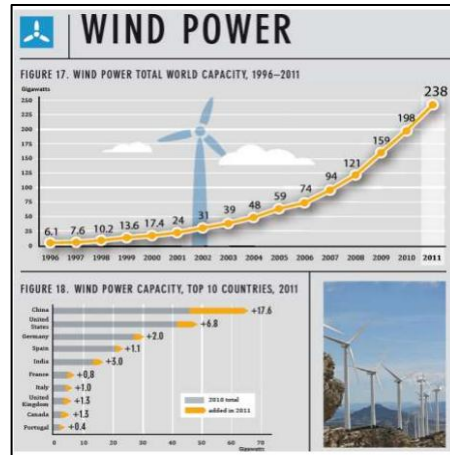
La energía eólica ha avanzado durante los últimos años a grandes pasos, con una proyección como gran generador de energía. Según el informe presentado por Tetra Tech ES INC, titulado “Procesos y proyectos de apoyo a la inserción de las ER en Colombia”, la tasa de crecimiento anual acumulativo de generación de energía eólica entre los años 2006 - 2011 aumentó un 27%, con una capacidad instalada de 40 GW en 2006 pasó en 2011 a tener 238 GW de capacidad instalada en todo el planeta.

En Colombia, según la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), se espera que para el año 2028 la cobertura energética por parte de energías limpias (eólica y solar) represente el 10% de la capacidad total instalada del país, para lograr ese objetivo ya están en marcha tres proyectos que aportarían 474 MW a la red interconectada del país. Actualmente solo hay una planta eólica ubicada en La Guajira y hace parte de un proyecto piloto de las EPM en donde se generan 19,5 MW de potencia nominal.

En América del sur se ha presentado un mayor crecimiento de energía eólica en países como Brasil, Chile, Argentina, Honduras y México⁴. A continuación se muestra el avance de la energía eólica a nivel mundial.

⁴ TORRES, J. Procesos y proyectos de apoyo a la inserción de las ER en Colombia. Tetra Tech ES INC.

Figura 1. Capacidad de energía eólica total mundial entre 1996-2011



Fuente: Procesos y proyectos de apoyo a la inserción de las ER en Colombia.

Los aspectos relacionados con la energía eólica que se tratan en esta sección son los siguientes:

- Parámetros representativos de la energía eólica.
- Aspectos importantes acerca del viento.
- Tratamiento estadístico de los datos del viento.
- Tipos de aerogeneradores.
- Componentes principales del aerogenerador Savonius.

1.1.1 Parámetros representativos de la energía eólica.

Es prudente conocer que no se puede obtener toda la potencia eólica disponible que ofrece el viento si se desea instalar un aerogenerador y esto es porque a la salida del rotor el viento conserva un movimiento a baja velocidad, es decir que un porcentaje de la energía cinética inicial la conserva el viento y otro porcentaje se gasta en pérdidas por fricción aerodinámica y mecánica entre viento y rotor.

Algunos coeficientes representativos cuando se habla de energía eólica y los aspectos importantes que se deben conocer acerca del viento y su tratamiento estadístico se describen a continuación.

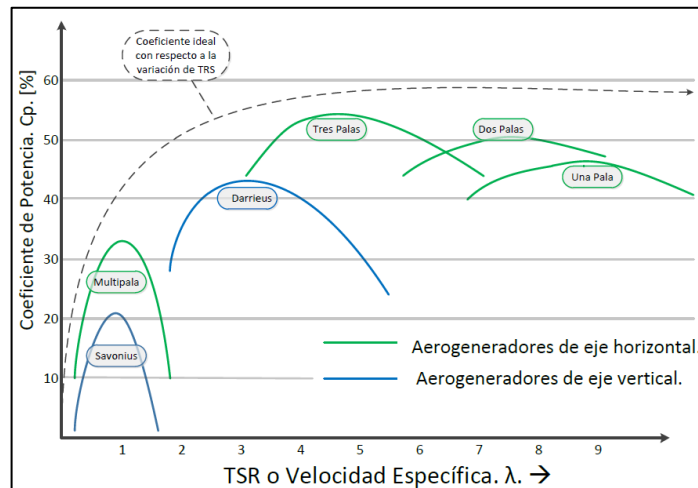
- **Límite de Betz:** Indica el porcentaje máximo de energía cinética que se puede extraer a un flujo de viento con velocidad v , a través del rotor de un aerogenerador con área de barrido A . Este límite indica que solo es posible extraer el 59,3% del total de la energía cinética del viento. En la figura 2, se observa el comportamiento de este límite⁵.
- **Coefficiente de potencia (C_p):** Representa la cantidad de energía cinética o eólica que una turbina (de cualquier tipo) puede extraer y convertir en energía mecánica rotacional. También se conoce como la eficiencia de la turbina o rotor.
- **Coefficiente de par (C_m):** Es el coeficiente que determina el momento generado en el rotor del aerogenerador. Este término está en función del coeficiente de potencia y de la velocidad específica.
- **Velocidad específica (TSR o λ):** Es un parámetro que relaciona la velocidad tangencial en el extremo de los alabes del aerogenerador y la velocidad del viento. Determina el comportamiento aerodinámico de una turbina eólica y la velocidad óptima del viento para obtener el mayor par en el eje de la turbina.

Como se observa en la **figura 2**, el TSR, la disposición del eje de giro en el rotor del aerogenerador y el número de palas o alabes son los factores influyentes que le permiten a una turbina eólica obtener un mayor coeficiente de potencia y por tanto la potencia disponible en el eje.

⁵ LÓPEZ, Miguel Villarrubia. Ingeniería de la energía eólica. Marcombo. 2012.

Las turbinas eólicas que tienen los mayores coeficientes de potencia son las de eje horizontal de una, dos y tres palas y de eje horizontal. La turbina eólica de eje vertical con el coeficiente de potencia más alto es la Darrieus. El aerogenerador tipo savonius tiene uno de los coeficientes de potencia más bajos, haciéndola especial para la generación de baja potencia y aplicaciones donde el par requerido sea elevado. En la siguiente figura se muestra la gráfica del coeficiente de potencia con respecto al TSR y el tipo de turbina.

Figura 2. Variación del coeficiente de potencia con respecto al TSR y el tipo de turbina.



1.1.2 Aspectos importantes acerca del viento.

El viento es aire en movimiento. A escala global se debe a las diferencias de temperatura que provoca la radiación solar sobre las distintas partes del globo terrestre. Las diferencias de densidad y presión originadas por estas variaciones de temperatura son la causa del movimiento de las masas de aire.⁶

⁶ Ibid., p. 32.

Las fuerzas que intervienen en el movimiento de las masas de aire son producidas por la gravedad, gradientes de presión, coriolis y rozamiento. Todas estas son tenidas en cuenta al momento de definir o clasificar la intensidad del viento⁷. La clasificación a los vientos globales dependiendo de la magnitud se da tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Escala de longitud consideradas para el estudio del viento.

Escasa	Dimensiones (Km)	Ejemplos.
Planetaria	5.000	Celda de hadley.
Macroescala o Sinóptica	1.000	Ciclones de latitudes medias
Mesoescala	100	Tormentas y brisas
Microescala	5-10	Turbulencias.

Fuente: Ingeniería de la energía eólica, Miguel López. P. 32.

En el movimiento del viento intervienen cuatro fuerzas que provocan los fenómenos, estas fuerzas son: Fuerza debida al gradiente horizontal de presión F_p , fuerza debida a la rotación de la tierra F_d , fuerza centrífuga debida a la curvatura de las isobaras F_c y la fuerza debida al rozamiento entre las corrientes de aire F_r ⁸. Estas fuerzas mencionadas provocan las diferentes características del viento, que se mencionan y describen a continuación.

- Tipos de vientos.
- Características del viento con respecto a la altura del terreno.
- Escala de Beaufort.
- Rugosidad del terreno.
- Influencia de los obstáculos.
- Medición de la magnitud de la velocidad del viento.
- Rosa de los vientos.

⁷ Ibid., p. 32.

⁸ Ibid., p. 34.

1.1.2.1 Tipos de vientos.

Dependiendo de las fuerzas que intervienen en el movimiento del viento se pueden encontrar varios tipos.

- **Viento geostrófico:** Este tipo de corrientes de viento son generadas, por el cambio de temperatura y presión, es una aproximación física al viento real, las fuerzas que provocan este tipo de viento son resultado de la acción conjunta de las fuerzas debidas al gradiente de presión y Coriolis⁹.

- **Viento de gradiente:** En este tipo de viento intervienen las fuerzas debidas al gradiente de presión, coriolis y fuerza centrífuga. Este tipo de viento junto con el geostrófico representan bien al viento real por encima de los 1000 m de altura desde el suelo. Por debajo de esta distancia el viento es influenciado en gran medida por el perfil geográfico de la superficie terrestre¹⁰.

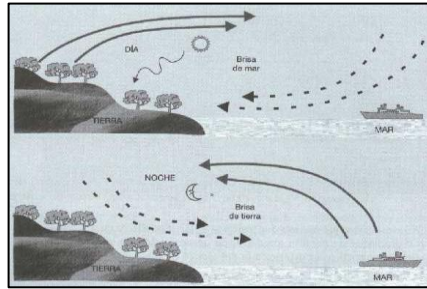
- **Vientos locales:** Ciertas condiciones geográficas presentan algunos tipos particulares de viento que se apartan de los fenómenos globales a Macroescala.
 - **Brisas de mar y brisas de tierra:** En el día la tierra se calienta más rápido que la superficie del mar, provocando una corriente ascendente en tierra y una depresión que inicia la circulación del aire desde el mar. En la noche se invierte el efecto debido a la perdida de calor lenta por parte del mar (brisa terrestre)¹¹.

⁹ Volkemmen. Disponible en: www.windpower.org

¹⁰ LÓPEZ, Op. cit., p. 35.

¹¹ Ibid., p.37.

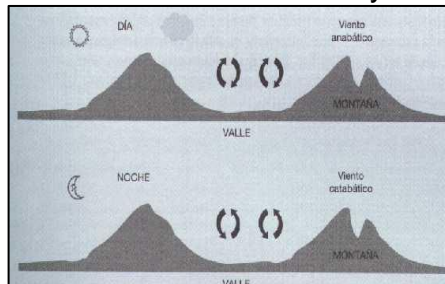
Figura 3. Esquema de formación de brisas de mar y de tierra.



Fuente: Libro: "Energía Eólica", Autor: Miguel Villarrubia, Editorial: Ediciones CEAC, 2004.

- **Brisas de valle y de montaña:** Durante la noche el aire que se encuentra en contacto con la parte alta de la montaña se enfría más rápido y las corrientes de aire tienden a descender durante la noche generalmente con carácter suave. Durante el día el efecto es el contrario¹².

Figura 4. Esquema de formación de brisas de mar y de tierra



Fuente: Libro: "Energía Eólica", Autor: Miguel Villarrubia, Editorial: Ediciones CEAC, 2004.

1.1.2.2 Características del viento con respecto a la altura del terreno.

Las características de la velocidad del viento se deben a las turbulencias que se presentan por las irregularidades del terreno, como es el caso de la rugosidad, el relieve, la época y los obstáculos.

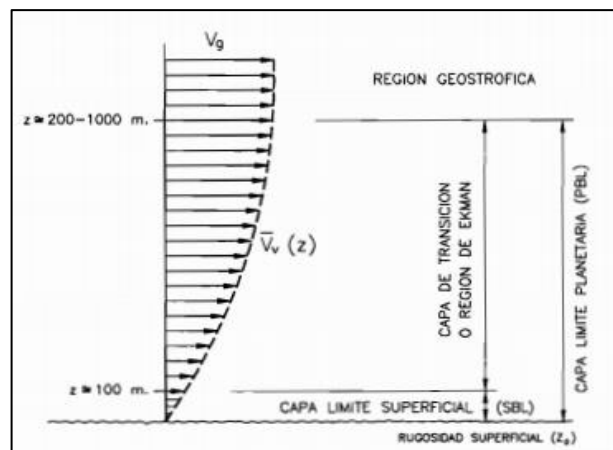
¹² Ibid., p. 37.

De igual manera su variación también se ve influenciada por los mantos que se presenta en la tierra, como resultado de un calentamiento por gradientes de temperatura, en la cual los mantos de tierra más calientes provocan el ascenso y los más fríos (densos) se hunden, lo cual crean movimientos de circulación llamados corrientes de convección en la atmósfera, el agua y la tierra.

A medida que el viento se acerca a la superficie de la tierra este se ve influenciado por su superficie geográfica, la velocidad disminuye debido al rozamiento y constantemente cambia de dirección debido a los obstáculos. La influencia de la superficie puede estar dentro de 1000 m – 2000 m, esto sucede cuando la radiación solar es fuerte y se provocan momentos de convección que hacen ascender el aire hasta esas alturas

El perfil de velocidad es afectado ampliamente por la rugosidad de la geografía, en la **tabla 3** se muestra una clasificación y la influencia que tiene.

Figura 5. **Perfil vertical de velocidad del viento con la altura.**



Fuente: Caracterización del viento. Disponible en:

http://www.abcpuertos.cl/documentos/Rom_04/rom_04_95_2_Caracterizacion_del_viento.pdf

1.1.2.3 Escala de Beaufort.

La escala de Beaufort permite una estimación de la intensidad del viento o su clasificación en esta escala de acuerdo a la velocidad que este lleve, se estableció de acuerdo al estado del mar, de sus olas y de las fuerza del viento. A continuación se presenta la tabla.

Tabla 2. Escala de Beaufort.

Grados Beaufort	V(Km/h)	V(m/s)	V(nudos)	Descripción.
0	1	0 – 0,4	1	Calma
1	1 – 5	0,5 – 1,5	1 – 3	Brisa muy ligera
2	6 – 11	1,3 – 3,4	4 – 6	Brisa ligera
3	12 – 19	3,5 – 5,5	7 – 10	Pequeña brisa
4	20 – 28	5,5 – 8	11 – 16	Moderado
5	29 – 38	8,1 – 10,9	17 – 21	Fresco
6	29 – 49	11,4 – 13,9	22 – 27	Fuerte (Bonancible)
7	50 – 61	14,1 – 16,9	28 – 33	Fuerte (Muy fresco)
8	62 – 74	17,4 – 20,4	34 – 40	Duro (Golpe de viento)
9	75 – 88	20,5 – 23,9	41 – 47	Muy duro
10	89 – 102	24,4 – 28	48 – 55	Tempestad (Temporal)
11	103 – 117	28,4 – 32,5	56 – 63	Fuerte tempestad.
12	118 – 133	32,6 – 35,9	64 – 71	Huracán.
13	134 – 149	36,9 – 40,4	72 – 80	
14	150 – 166	40,1 – 45,4	81 – 89	
15	167 – 183	45,1 – 50	90 – 99	
16	184 – 201	50,1 – 54	100 – 108	
17	202 - 220	54,1 - 60	109 - 118	Ciclón

Fuente: Ingeniería de la energía eólica. LÓPEZ, Miguel.

1.1.2.4 Rugosidad del terreno.

Este aspecto tiene una significativa influencia en el movimiento del viento, su tipo de irregularidad o rugosidad afecta el perfil de velocidad con respecto a la altura para cada tipo de viento.

Tabla 3. Rugosidad para diferentes espacios.

Clase de rugosidad	Long de rugosidad (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje.
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Solo colinas suavemente redondeadas.
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con algunas casas y arbustos, o setos resguardantes de 8 metros de distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual.
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos.
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

Fuente: *Master Europeo en Energías Renovables y Eficiencia Energética. CURSO DE ENERGÍA EÓLICA. Disponible en: <http://www.windygrid.org/manualEolico.pdf>*

Este tipo de parámetros para la rugosidad del viento, ha sido aprobado en Europa y es conocida como la ley del perfil logarítmico del viento, indicada en la siguiente ecuación:¹³

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\text{Ln} \frac{H}{z_0}}{\text{Ln} \frac{H_0}{z_0}} \quad (1.1)$$

En donde:

z_0 : rugosidad del terreno m . ; v, v_0 : son respectivamente las velocidad a las altura H, H_0 , en $\frac{m}{s}$.

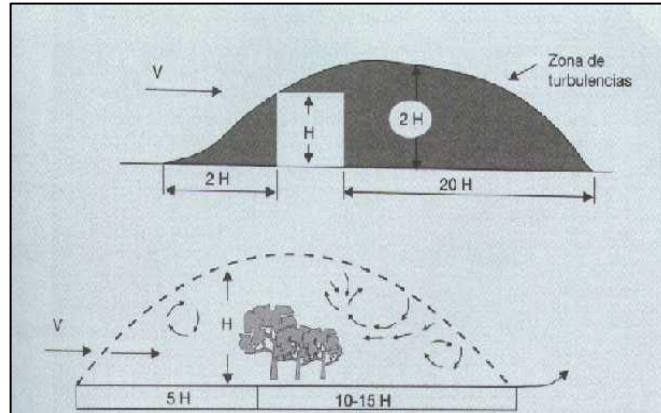
1.1.2.5 Influencia de los obstáculos.

En los terrenos donde hay gran cantidad de obstáculos conviene tener en cuenta la dirección dominante del viento debido a que se debe evitar la ubicación de las turbinas en las zonas donde se producen los efectos negativos por turbulencias (en las estelas) y por tanto el mal aprovechamiento de las corrientes del viento.

Como lo muestra la imagen, los obstáculos pueden generar grandes estelas de turbulencias una vez que el aire pasa por alguno. Es evidente que un aerogenerador de cualquier tipo debe estar por fuera de estas estelas ya que el aire fluye de manera irregular y desordenada, las corrientes de aire deben ser lo más uniformes posible para que se presenten mejores rendimientos.

¹³ BAÑUELOS R. CAMACHO A. SERRANO A. y MUCIÑO M. Análisis y validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento. Instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Figura 6. Efectos de un obstáculo sobre el flujo del viento.



Fuente: Libro: "Energía Eólica", Autor: Miguel Villarrubia, Editorial: Ediciones CEAC, 2004.

1.1.2.6 Medición de la magnitud de la velocidad del viento

Para establecer el comportamiento de la velocidad y dirección del viento se debe contar con las herramientas adecuadas para obtener todos los datos que permitan establecer las características del sector. Se deben conocer los valores instantáneos de la velocidad, para ello se utiliza un anemómetro que mide y registra la información en intervalos de tiempo de manera instantánea.

Para ciertos tipos de aerogeneradores es necesario registrar la dirección del viento, generar una base de datos y armar una representación gráfica conocida como **Rosa de los vientos**. El elemento que hace esta medida es una veleta que se acomoda a la dirección en la que fluye el viento

El aire que fluye por estos elementos de medida debe estar libre de turbulencias y obstáculos que impidan su libre transición. Estos elementos generalmente se sitúan en partes altas para evitar perturbaciones, se deben hacer calibraciones periódicas para garantizar su correcto funcionamiento

Figura 7. Anemómetro con veleta.



Fuente: Disponible en: <http://energiaeolica.files.wordpress.com/2008/02/anemometro.jpg>

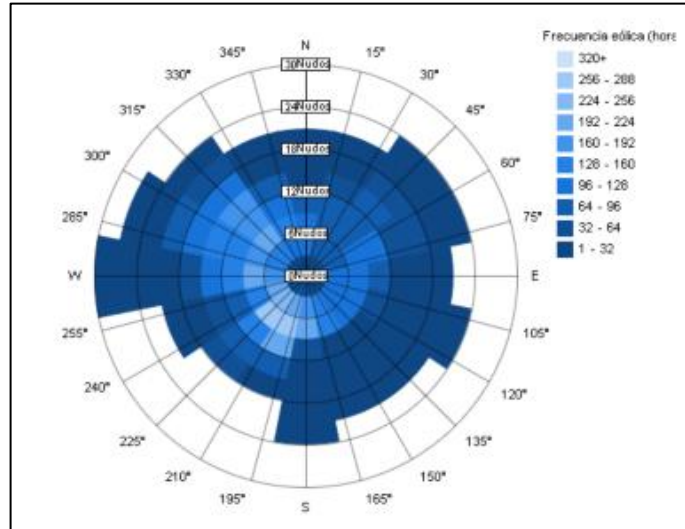
1.1.2.7 Rosa de los vientos

Este tipo de representación gráfica permite definir la dirección dominante del viento, la intensidad con la cual el aire fluye y el tiempo aproximado del tiempo con esos determinados valores. Este diagrama consiste en un cuadro polar cuyos puntos cardinales se acostumbran a ser de 8, 12 y 16 rumbos; en el cual se relacionan los distintos valores de velocidad y dirección del viento¹⁴.

Para acertar en la correcta colocación de los aerogeneradores, es importante hacer un análisis cuidadoso de este diagrama debido a que se presentan aspectos importantes a tener en cuenta. Generalmente, las direcciones dominantes de los vientos no coinciden con la dirección dominante de mayor intensidad, esto debido a que en la mayoría de los casos los vientos más intensos no son los que soplan más horas del año procedentes de una determinada dirección.

¹⁴ LÓPEZ, Op. cit., p. 54.

Figura 8. Esquema de la Rosa de los vientos, ejemplo de frecuencia del viento.



Fuente: Disponible en: <http://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ESP/Revit-Analyze/files/GUID-2AACFEA1-16BD-4A01-BD75-81B12E56A57C-htm.html>

1.1.3 Tratamiento estadístico de los datos del viento.

Para tener resultados representativos acerca de una determinada región, se necesitan históricos de los datos del viento en un rango de 25 a 30 años para que los análisis que se hagan proporcionen resultados significativos. Si no se dispone de tal cantidad de años, el rango mínimo aceptado es de 5 a 10 años¹⁵.

La campaña de comprobación de los datos obtenidos se debe hacer con una duración no inferior a un año. Se deben registrar todos los datos que arroje el anemómetro y verificar que concuerden con los análisis teóricos obtenidos.

Los histogramas de velocidad de viento, presentan frecuencia, velocidad de viento y valores puntuales de históricos del viento. La ley que representa el tratamiento estadístico de los datos del viento y su uso para determinar el potencial energético son las siguientes y se describen a continuación.

¹⁵ LÓPEZ, Op. cit., p. 62.

- Ley de Weibull.
- Potencial energético del viento.

1.1.3.1 Ley de Weibull.

Esta ley permite calcular el potencial energético y la energía anual que puede producir un tipo de aerogenerador. Como se mencionó, este método requiere de datos históricos entre 30 y 25 años para obtener resultados confiables, aunque con históricos de 10 a 5 años los resultados son de igual manera aceptables. En caso de no tener el tipo de información mencionada, la ley de Weibull permite un límite no inferior a un año en datos históricos, pero se debe tener presente que los resultados obtenidos no son totalmente confiables.

El método expresa el comportamiento de las velocidades para determinado periodo, tiene en cuenta la presión atmosférica y la altura sobre el nivel del mar del sitio al que se le va a aplicar el estudio¹⁶.

La ecuación (1.2) representa la densidad de la probabilidad de weibull.

$$p v = \frac{k}{c} \frac{v}{c}^{(k-1)} e^{-\frac{v}{c}^k} \quad (1.2)$$

En donde:

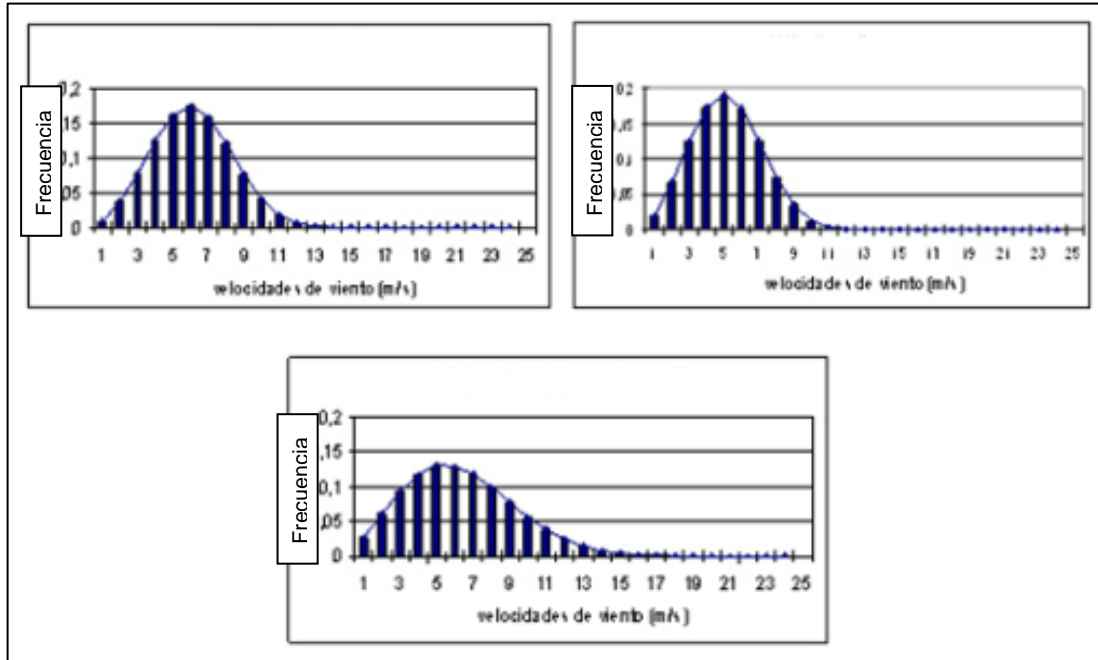
v: velocidad del viento (m/s); p(v): función de densidad de probabilidad de weibull.

C: factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media anual.

K: factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función p (v).

¹⁶ ¹⁶ LÓPEZ, Op. cit., p. 66.

Figura 9. Distribución de velocidad del viento en un año. Ley de weibull.



Fuente: Ingeniería Mecánica, Deivis Ávila.

Con la ley de Weibull se puede determinar un histograma anual de las velocidades del viento, en este se observa la velocidad del viento, la densidad de weibull y la velocidad media anual.

1.1.3.2 Potencial energético del viento.

El potencial energético que posee el viento hace referencia a la cantidad de energía cinética que la masa de aire contiene, a mayor velocidad del flujo de aire mayor es la energía cinética o el potencial energético del flujo.

La **ley de Weibull** proporciona la velocidad media de un determinado lugar, esta velocidad ayuda a determinar el potencial eólico disponible del lugar en donde se están haciendo los estudios o el tratamiento estadístico de los datos. La potencia

eólica del viento antes de incidir en el rotor se conoce como potencia eólica disponible y se representa a partir de las ecuaciones (1.3) y (1.4).

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 \quad \frac{W}{m^2} \quad \mathbf{1.3}$$

$$P_d = \frac{1}{2} \rho * A * v^3 \quad W \quad \mathbf{(1.4)}$$

La relación de la potencia disponible (Pd) con la potencia del eje del aerogenerador está dada por el coeficiente de potencia (Cp). La ecuación de potencia en el eje del aerogenerador es la siguiente:

$$P_{eje} = C_p * \frac{1}{2} * A * \rho * v^3 \quad W \quad \mathbf{(1.5)}$$

En donde:

Pd: Potencia eólica disponible. (W); Peje; Potencia en el eje del rotor del aerogenerador. (W).

Cp: Coeficiente de potencia; ρ : Densidad del aire (Kg/m³); v: Velocidad del viento (m/s)

La velocidad v, es determinada a partir del tratamiento estadístico de los datos del viento que se toman en una determinada región y mediante estos, se puede encontrar el potencial energético de cualquier lugar.

1.1.4 Tipos de aerogeneradores.

Los aerogeneradores pueden clasificarse de acuerdo a varios criterios, pero son dos los más usados.

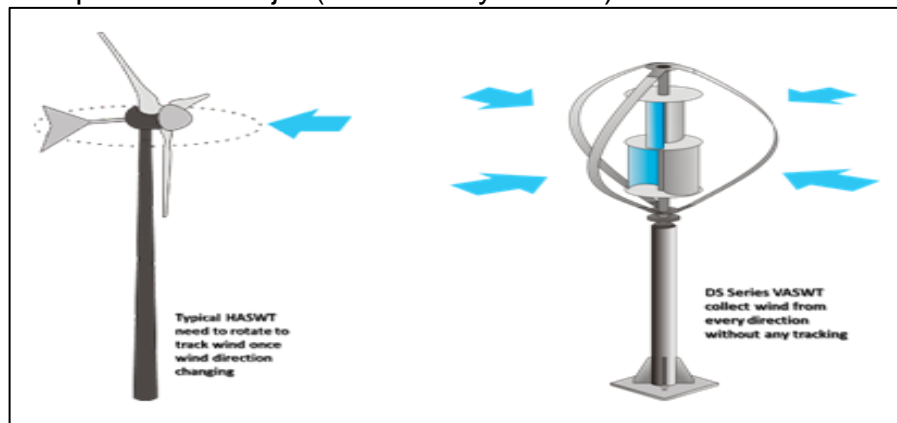
- **Basado en su principio de funcionamiento:** De acuerdo a este criterio se pueden encontrar dos clasificaciones; La primera es basado en su fuerza de arrastre o resistencia (drag), tienen una velocidad específica pequeña y un

elevado torque de arranque, en esta clasificación se encuentran los aerogeneradores de eje vertical tipo savonius y de eje horizontal de multipala; La segunda se basa en la fuerza de sustentación (lift), tienen velocidades específicas más grandes y un par de arranque pequeño, se usan principalmente para la producción energética a gran escala debido a su alto coeficiente de potencia¹⁷.

- **Basado en la disposición de su eje:** También se encuentran dos clasificaciones; En los aerogeneradores de eje horizontal el viento entra al rotor de manera paralela al eje, este tipo de aerogeneradores son usados comúnmente para la generación de energía eléctrica; En los aerogeneradores de eje vertical el viento entra al rotor de manera perpendicular al eje del rotor¹⁸.

En la **figura 10** se observa la dirección del viento y la disposición del eje de acuerdo al tipo de turbina y en la **figura 11** una clasificación de acuerdo a la disposición del eje.

Figura 10. Disposición del eje. (Horizontal y vertical)

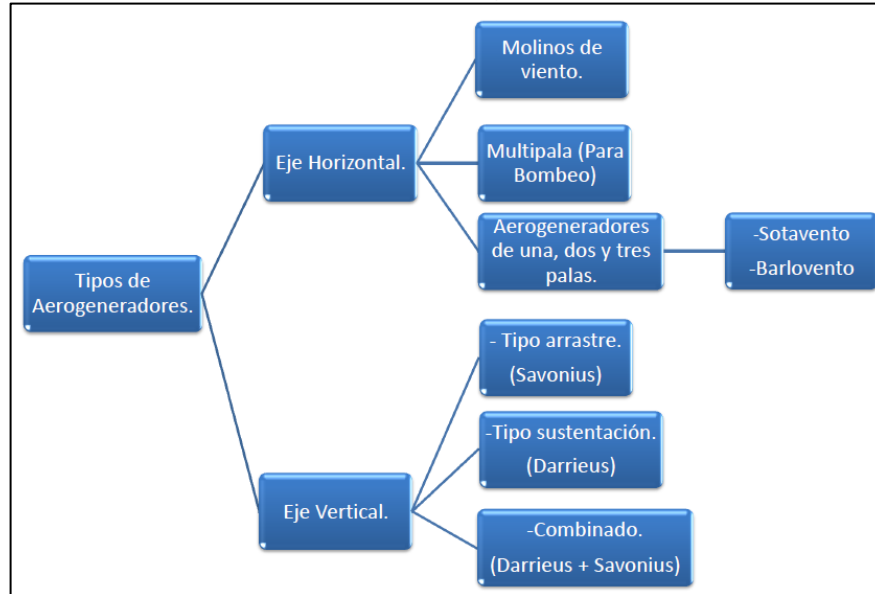


Fuente: Disponible en: <http://www.e-vawt.es/style/por-que-1.png>

¹⁷ Ibid., p. 132.

¹⁸ Ibid., p. 132.

Figura 11. Clasificación de los tipos de aerogeneradores.

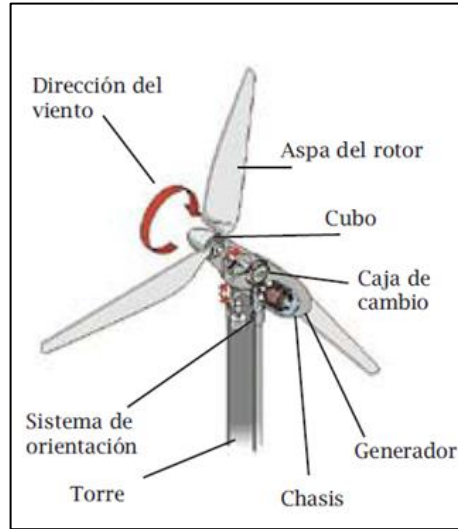


1.1.4.1 Aerogeneradores de eje horizontal.

Estos aerogeneradores también tienen la denominación HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine), la disposición de su eje de rotación esta de manera paralela a la dirección del viento, son el tipo de turbina más utilizado para la producción de energía eléctrica a gran escala.

Los componentes principales que hacen parte de este tipo de aerogenerador son la torre de sustentación, el sistema de orientación del rotor hacia el viento, la góndola, el generador eléctrico, los sensores (anemómetro y veleta), la caja multiplicadora de velocidad y las palas o alabes del rotor.

Figura 12. Componentes aerogenerador de eje horizontal.



Fuente: Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos94/sistema-fotovoltaico-y-aerogenerador/image002.png>

Este tipo de turbinas ofrece ventajas como mayores coeficientes de potencia para intervalos de λ más amplios, debido a esto se presentan mejores rendimientos para diferentes valores de velocidad. Actualmente este tipo de turbina produce en un alto porcentaje de la totalidad de la energía eólica producida en el planeta, al permitir construirse con mayores áreas de barrido se hacen ideales para desarrollar grandes potencias que los aerogeneradores de eje vertical¹⁹.

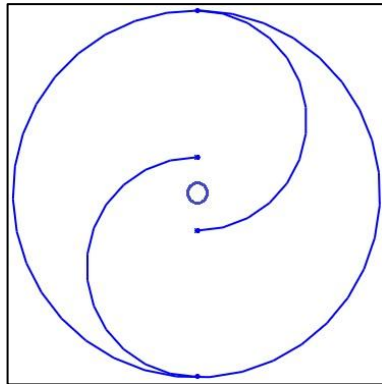
1.1.4.2 Aerogeneradores de eje vertical.

Este tipo de aerogeneradores no son utilizados para la generación de energía eléctrica a gran escala. Como se mencionó, este tipo de aerogeneradores tiene una clasificación interna de acuerdo a su principio de funcionamiento.

¹⁹ Ibid., p. 133.

- **Rotor de arrastre diferencial tipo Savonius:** Su rotor está formado por dos semicilindros, sus ejes se desplazan entre si dejando una pequeña excentricidad que le permite al aire circular y aprovechar mejor la cantidad de movimiento que este lleva. Se le denomina de arrastre diferencial debido a que gira por la diferencia de fuerzas que ejerce el aire sobre una superficie cóncava y una convexa de las cuales se conforma el rotor del aerogenerador tipo Savonius.

Figura 13. Alabes excéntricos, rotor Savonius.



Este tipo de rotor es especial para generar bajas potencias y para mover cargas en donde el torque de arranque sea elevado, en algunas configuraciones en donde se quiere facilitar el arranque del aerogenerador se puede disponer de configuraciones de dos pisos, en donde los rotores están desplazados entre si un ángulo de 90°.

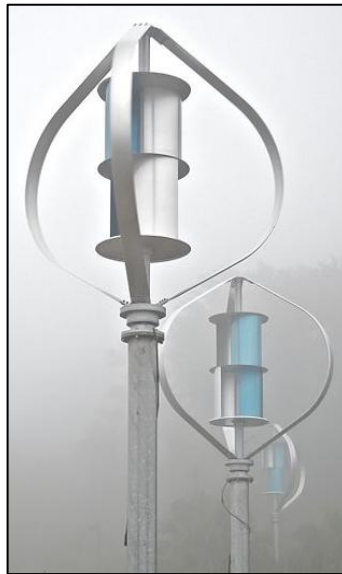
El principio de funcionamiento es de arrastre, es decir, que su movimiento es provocado por la diferencia de fuerzas que ejerce el aire sobre una superficie convexa y una superficie cóncava.

- **Rotor de variación cíclica tipo Darrieus:** Este tipo de aerogenerador utiliza como fuerza motriz la fuerza aerodinámica que se produce debido a la forma de sus alabes.

Es un rotor de eje vertical y sus alabes giran en torno a su eje, dependiendo de la forma de los alabes estos pueden presentar formas cilíndricas, circulares, parabólicas, etc, cuando están girando alrededor del eje.

El par de arranque de este aerogenerador no es elevado, por lo tanto es común encontrar configuraciones mixtas como las que se muestran en la siguiente imagen en donde se utiliza el par de arranque del savonius para iniciar el movimiento de rotación y la mayor eficiencia del Darrieus para generar la energía eléctrica.

Figura 14. Savonius y Darrieus.



Fuente: Darrieus wind turbine. Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

1.1.5 Componentes principales del aerogenerador Savonius.

A pesar de tener bajos coeficientes de potencia, llama la atención en el aerogenerador Savonius su fácil construcción, la carencia de partes complejas y partes móviles y el hecho de ser muy útil para proporcionar bajas potencias.

- **Rotor:** El rotor es el componente más importante dentro del aerogenerador, se encarga de extraer la energía cinética del viento mediante sus palas, formado principalmente por dos semicilindros que generalmente consta de dos palas y dos tapas circulares.

- **Eje principal:** Este elemento permite conectar el conjunto principal de componentes del aerogenerador, formado por el rotor, el sistema de transmisión y los rodamientos que están colocados en la parte superior e inferior del eje a la estructura de sujeción.

- **Sistema de Transmisión:** Permite aumentar la relación de velocidad entre el eje del aerogenerador y el eje del generador de corriente. Generalmente para el diseño de los aerogeneradores tipo Savonius se utilizan dos tipos de sistemas:
 - Sistemas de transmisión por correas.
 - Sistemas de transmisión por engranajes.

- **Generador Eléctrico:** Es el componente que realiza la conversión de la energía mecánica impuesta por el viento en energía eléctrica. Hay varias opciones para generar corriente eléctrica entre ellas el alternador de los automóviles, los motores de corriente continua utilizados de manera inversa y la fabricación de un alternador de corriente, cualquiera de las opciones nombradas se constituye por dos elementos principales:
 - Rotor: es la parte móvil que está conformado por dos discos, uno en la parte inferior y el otro en la parte superior, donde se colocan los imanes permanentes.
 - Estator: Es el componente que se encuentra fijo en el generador en donde se aloja el embobinado. Estos dos componentes producen corriente en

estado alterno, pero al mismo tiene diodos de rectificación para que la corriente final entregada este en estado continuo.

- **Estructura de sujeción del aerogenerador Savonius:** Es el elemento que permite sostener y mantener estable todos los componentes del sistema. Proporciona soporte y equilibrio al aerogenerador y dependiendo del peso a soportar se puede construir con tubería de diferente calibre.

1.2 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

Subsistema encargado del almacenamiento de la energía eléctrica, de su regulación y conversión. A continuación se describe su función principal y cada uno de sus componentes.

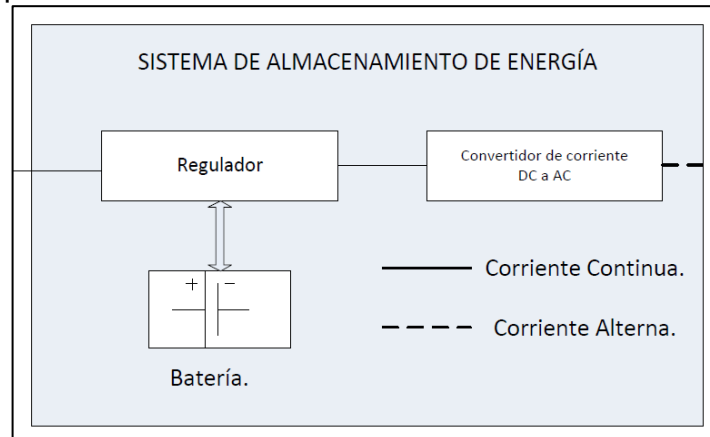
- Función dentro del prototipo.
- Regulador o controlador de corriente.
- Inversor de corriente.
- Batería.

1.2.1 Función dentro del prototipo.

Es importante saber que posiblemente el deshumidificador y el aerogenerador no funcionarán al mismo tiempo. En las horas del día, cuando el ambiente está a mayor temperatura, las corrientes de aire se hacen más fuertes y por tanto el aerogenerador estará en constante funcionamiento, por el contrario, posiblemente en las horas de la noche la humedad relativa del aire será más alta y el deshumidificador tiene oportunidades de condensar más humedad que durante el día.

En la siguiente figura se muestra el esquema del subsistema de almacenamiento de energía.

Figura 15. Componentes del subsistema de almacenamiento de energía.



Es por lo anterior que debe existir un elemento que almacene la energía eléctrica que produce el aerogenerador, un elemento que cambie de corriente continua a corriente alterna para que los componentes del sistema térmico de refrigeración funcionen correctamente y un controlador o regulador que proteja los componentes eléctricos de sobrecargas y descarga en exceso de la batería. La descripción del papel que cumplen dentro del prototipo se da en las siguientes secciones.

1.2.2 Regulador o controlador de corriente.

Este elemento se encarga del nivel de descarga y carga que llega de la batería, permite suministrar la cantidad de energía necesaria. Su función principal es controlar el flujo de corriente para extender la vida útil de la batería.

1.2.3 Inversor de corriente.

El generador de corriente, al ser accionado, proporciona corriente continua, estado en el cual esta debe llegar a la batería para su almacenamiento. Los componentes eléctricos del deshumidificador comúnmente son conectados a la red eléctrica convencional, por lo tanto, están diseñados para funcionar con corriente alterna. La función del inversor es cambiar el estado de la corriente, llevarla de un estado continuo a un estado alterno.

1.2.4 Batería.

La batería es el elemento que acumula la energía eléctrica generada por el alternador, esta se acumula en estado continuo. La batería esta protegida por el controlador y la corriente que esta entrega es cambiada de continua a alterna por el inversor de corriente.

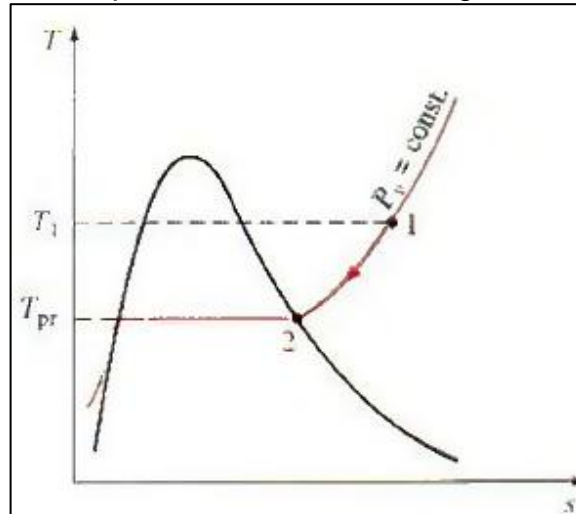
1.3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

Su objetivo es producir el cambio de fase en la humedad que contiene el aire del ambiente. Para ello se utiliza un sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante que circula y que cumple el ciclo termodinámico extrae el calor del aire del ambiente, lo satura y condensa la humedad contenida.

La temperatura del punto de rocío es la temperatura en donde se inicia la condensación de la humedad contenida en el ambiente si este es enfriado a una presión constante, tal y como se observa en la **figura 16**. A medida que en el aire desciende la temperatura también pierde la capacidad de almacenar humedad, después de cierto tiempo el aire estará 100% saturado y cualquier descenso en la temperatura provocará la condensación de la humedad. Usando este principio

termodinámico se garantiza la condensación de la humedad contenida en el ambiente.

Figura 16. Temperatura del punto de rocío en un diagrama T-s



A continuación se expone:

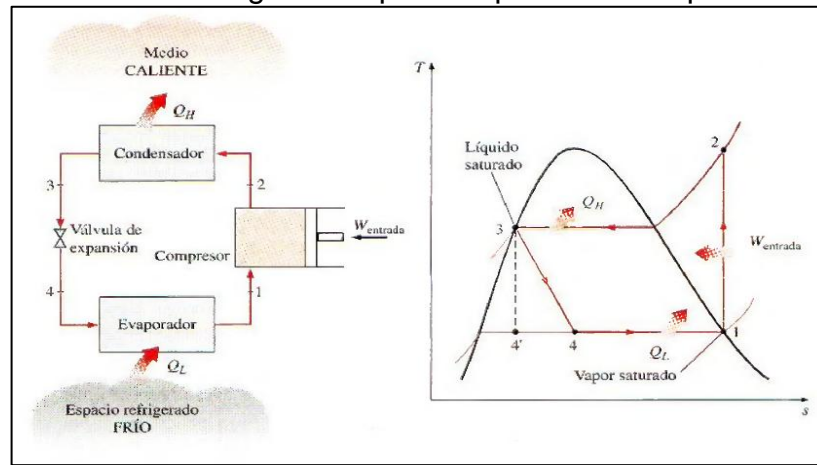
- Ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por compresión de vapor.
- Componentes principales.

1.3.1 Ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por compresión de vapor.

El ciclo termodinámico de refrigeración por compresión de vapor es el más utilizado en refrigeración comercial, sistemas de aire acondicionado y bombas de calor. La función de este ciclo es retirar el calor de un espacio o cuarto refrigerado, disminuir la capacidad que tiene el aire para contener humedad, saturarlo, generar el cambio de fase y obtener el fluido en estado líquido.

Para lograr lo anterior, la temperatura en la superficie del evaporador debe ser inferior a la temperatura de rocío del ambiente y así garantizar la condensación de la humedad. Su principio de funcionamiento es a partir de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Este ciclo en su forma ideal se compone de cuatro procesos tal y como se observa en la figura 17.

Figura 17. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.



Fuente: *Termodinámica de Cengel. Sexta edición. 621 p.*

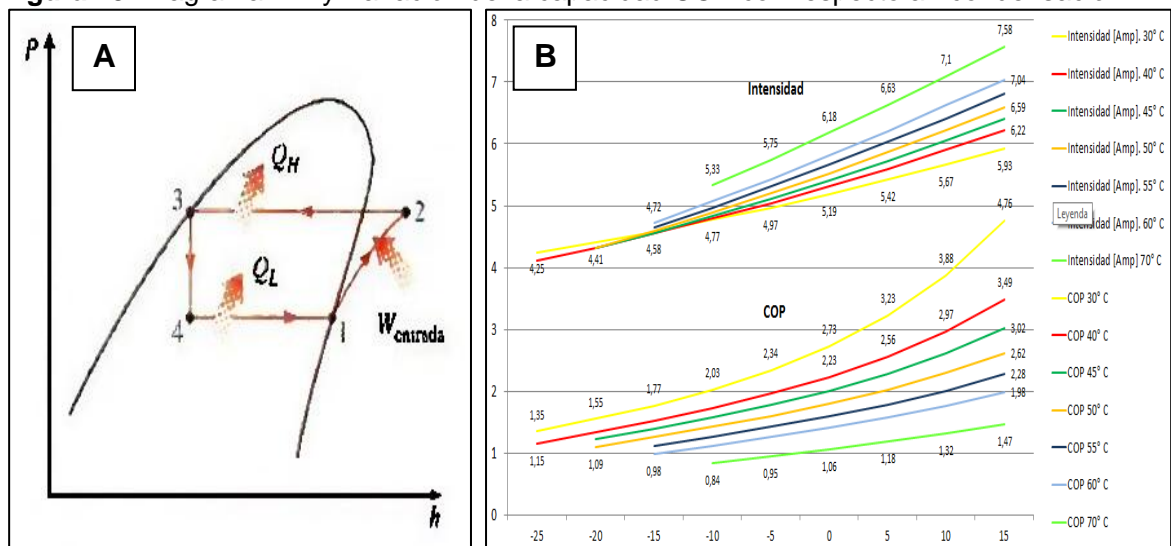
- **1-2:** Compresión isentrópica en un compresor.
- **2-3:** Rechazo de calor a presión constante en un condensador.
- **3-4:** Estrangulamiento en un dispositivo de expansión.
- **4-1:** Absorción de calor a presión constante en un evaporador.

1-2: El refrigerante inicia su ciclo como vapor saturado, en este estado entra al compresor quien comprime al refrigerante de manera isentrópica, elevando su temperatura y presión. **2-3:** El refrigerante sale del compresor y entra al condensador en el estado de vapor sobrecalentado, desde elemento se rechaza calor hacia los alrededores a una presión constante provocando que a la salida del condensador el estado del refrigerante sea líquido saturado. **3-4:** Una vez que sale del condensador, el refrigerante se estrangula hasta la presión del evaporador, en este proceso la temperatura del refrigerante desciende por debajo de la

temperatura del espacio refrigerado. **4-1**: El refrigerante entra al evaporador como vapor húmedo de baja calidad y se evapora por completo absorbiendo por completo el valor del espacio refrigerado²⁰.

Los diagramas utilizados con frecuencia para análisis del ciclo termodinámico son el **T-s** y el **P-h**. El diagrama **T-s** se muestra en la **figura 17**. En la siguiente figura se muestra en ciclo termodinámico en un diagrama **P-h**; en este diagrama 3 de sus líneas aparecen en forma recta. En **4-1** su proceso de absorción de calor se hace de manera constante, en **3-4** se produce una caída de presión debido al estrangulamiento del vapor manteniendo la entalpía constante, en **2-3** el rechazo de calor del condensador hacia los alrededores también se hace a presión constante y en **1-2** el compresor aumenta la presión y temperatura del refrigerante²¹.

Figura 18. Diagrama P-h y Variación de la capacidad COP con respecto a Tcondensación.



Fuente: *Termodinámica de Cengel. Sexta edición. 622 p y autores.*

²⁰ ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinámica*. Sexta edición. México: McGraw-Hill, 2003.

²¹ *Ibid.*, p. 622.

La función de un deshumidificador es simplemente producir agua. Para mejorar la capacidad del sistema, se puede circular el aire frío que sale de la unidad evaporadora a través del condensador y darle condensación a una menor temperatura y mayor capacidad. En la **figura18 B** se observa que a menor T_{cond} para una determinada T_{evap} , el sistema tiene más capacidad y el compresor es sometido a un menor trabajo y consumo energético.

1.3.2 Componentes principales.

En los sistemas de refrigeración más sencillos que se pueden encontrar, se tienen como elementos principales al compresor, condensador, evaporador y elemento de expansión. En este tipo de sistemas cada uno debe cumplir su función de manera adecuada para que el ciclo termodinámico tenga lugar y de forma eficiente²².

A continuación se explica la función de cada elemento dentro del sistema de refrigeración.

- **Compresor:** Se pueden encontrar dependiendo de la forma o categoría de compresión entre los cuales se encuentran tipo alternativo, giratorio, scroll y tornillo. Este componente se encarga de recibir el fluido refrigerante que sale de la unidad manejadora en forma de vapor saturado, elevar la presión y temperatura del mismo de manera isentrópica hasta la presión y temperatura de condensación.

²² BRASIL, TECUMSEH DO BRASIL LTDA.

Figura 19. Compresor hermético tipo pistón alternativo.



Fuente: Tecumseh do Brasil LTDA.

- **Condensador:** Su función es liberar el calor absorbido por el evaporador y la energía en forma de trabajo que introdujo el compresor al refrigerante. El refrigerante se encuentra a una alta temperatura y presión; A su paso por el condensador el refrigerante cambia de estado, pasa de estar como vapor sobrecalentado a la entrada del condensador a estar como líquido saturado a la salida del mismo, este cambio de estado se produce debido al rechazo de calor hacia los alrededores manteniendo la presión constante²³.

Figura 20. Condensador.



Fuente: Disponible en: <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbnANd9GcRDbtAC276ZLcseNPFnQWcqdcN89tVRPp4FUg86YwxFfjdzD8AV>

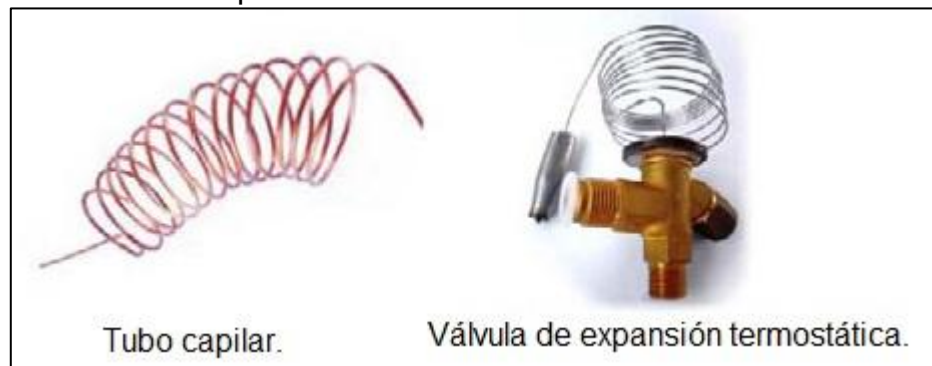
<https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbnANd9GcRDbtAC276ZLcseNPFnQWcqdcN89tVRPp4FUg86YwxFfjdzD8AV>

²³ Ibid., p. 5.

- **Evaporador:** El fluido refrigerante entra al evaporador como vapor húmedo de baja calidad y se evapora completamente gracias al calor que este extrae del espacio refrigerado. Este efecto acarrea la reducción de la temperatura en el espacio donde se encuentre instalado el evaporador. El fluido refrigerante retorna al compresor a través de la línea de succión del mismo para iniciar nuevamente el ciclo²⁴.
- **Elementos de expansión:** El elemento de expansión es el encargado de reducir la presión y de regular el caudal del fluido refrigerante que entra al evaporador, este elemento separa el lado de alta presión con el lado de baja presión del sistema. La reducción o pérdida de la presión se da por el rozamiento del refrigerante con las paredes del tubo capilar y por la alta aceleración que se da dentro del mismo.

Los elementos de expansión más comunes son la válvula de expansión termostática y el tubo capilar. En la siguiente imagen se muestran los elementos mencionados²⁵.

Figura 21. Elementos de expansión.



Fuente: Tecumseh do Brasil LTDA.

²⁴ Ibid., p. 8.

²⁵ Ibid., p. 7.

1.4 CONDICIONES FÍSICAS Y CLIMÁTICAS EN LA REGIÓN DE LA MESA DE LOS SANTOS.

En este capítulo se hace una reseña acerca de la región, se expondrán los parámetros importantes que deben tenerse en cuenta y que influyen directamente en las características físicas de las región como la hidrología, geología y el clima tal y como se describe enseguida.

- La mesa de los santos.
- Municipio de Los Santos.
- Hacienda vivero la fuente.
- Análisis físico de la región.

1.4.1 La mesa de los santos.

Esta es una meseta situada en la cordillera oriental de Colombia, gran parte de su extensión es jurisdicción del municipio de Los Santos, su altura promedio es de 1602 m.s.n.m. Su temperatura media es de 21 °C. Es un sitio de gran acogida por los habitantes de la zona metropolitana de Bucaramanga ya que se ha convertido en un gran atractivo turístico y de descanso para sus visitantes, cuenta con actividades recreativas, actividades turísticas, fincas y cabañas de descanso.

La mesa de los santos presenta grandes extensiones de espacios áridos y poca presencia de bosques, aspectos que influyen en gran medida a la escasez de agua especialmente en temporadas de verano.

Figura 22. Mesa de los Santos.



Fuente: Google Maps. Los Santos, Santander, Colombia.

1.4.2 Municipio de los santos.

La cabecera municipal del municipio de Los Santos se encuentra geográficamente a 6° 45' latitud norte y 73° 06' de longitud al oeste con respecto al meridiano de Greenwich. Su cabecera municipal está a 62 kilómetros de la ciudad de Bucaramanga. Sus límites son: Al norte con Girón y Piedecuesta, Al Sur con Jordán y Villanueva, Al Oriente con Aratoca y al Occidente con Zapatoca. Los principales ríos que conforman la red hidrográfica son: el río Chicamocha y el río Sogamoso, los cuales pertenecen a la gran cuenca del Magdalena. Tiene una extensión urbana de 183 Km² y una extensión rural de 284 Km², la altitud de su cabecera municipal es de 1310 m.s.n.m. Su temperatura media es de 21 °C. Su población es de 8283 habitantes²⁶. En la siguiente imagen se puede observar el casco urbano del municipio de los Santos.

²⁶Alcaldía de Los Santos Santander. Disponible en: <http://www.lossantos-santander.gov.co/index.shtml#5>

Figura 23. Casco urbano del municipio de Los Santos.



Fuente: Google Maps. Los Santos, Santander Colombia.

1.4.3 Hacienda vivero la fuente.

La hacienda se encuentra ubicada en el área rural perteneciente al municipio de los santos, aproximadamente a 1 hora y 41 minutos desde la Universidad Industrial de Santander (UIS) hasta la desviación en la carretera principal, desde allí se encuentra a 2 km de distancia de la hacienda por un camino sin pavimento.

Sus coordenadas geográficas son 6° 48' 56,6" latitud norte y 73° 04' 37,6" de longitud al oeste. Está a una altura de 1602 m.s.n.m. La mayoría del territorio de la Mesa de los Santos es árido, se erosiona con facilidad, no posee suelos húmedos y escasean los bosques, provocando que los afluentes superficiales y la humedad que el suelo pueda captar sea muy poca.

En las figuras se muestra la ubicación geográfica de la Hacienda Vivero la Fuente con respecto a la ciudad de Bucaramanga.

Figura 24. Ubicación geográfica de la Hacienda Vivero la Fuente.



Fuente: Google Maps, Los Santos, Santander Colombia.

Figura 25. Hacienda Vivero la Fuente.



Fuente: Google Maps, Los Santos, Santander, Colombia.

1.4.4 Análisis físico de la región.

En el análisis físico de la región se tienen en cuenta los parámetros que definen las condiciones climáticas, la hidrología y geología de la región de la mesa de los santos, estos parámetros definen las características ambientales de la región.

- Distribución temporal de la precipitación.
- Índice de aridez en la región.
- Evapotranspiración de la región.
- Disponibilidad hídrica de la región.

Estos parámetros mencionados y que se describen a continuación son los responsables de que la región de la mesa de los santos tenga las siguientes características.

- “Precipitación menor a 1.200 mm al año por m².
- Temperatura; Oscila entre 20 y 26 grados centígrados.
- Humedad relativa; Oscila entre 65% y 78%.
- Evapotranspiración potencial alta; 920,3 mm/m² (Anual aprox)
- Evapotranspiración real; 861,4 mm/m² (Anual aprox)
- La forma del relieve varía entre quebrado y escarpado”²⁷

1.4.4.1 Distribución temporal de la precipitación.

La precipitación en la mesa de los santos está formada por lluvias, lloviznas y en algunas ocasiones por granizo. Este fenómeno es la condensación del vapor de agua contenido en el aire y la deposición del vapor de agua contenido en el mismo, esto se da cuando las masas de aire son obligadas a elevarse y a reducir su temperatura (enfriarse), lo que reduce la capacidad del aire de contener humedad, producir condensación y por tanto de generar estos fenómenos.

El comportamiento de la precipitación en la mesa de los santos es muy similar al comportamiento de la mayor parte de la región Andina Colombiana, tiene un

²⁷ Ibid., p. 18.

periodo seco en diciembre, enero y febrero; Los meses lluviosos del primer semestre del año son abril y mayo; el periodo seco de mitad de año abarca los meses de junio, julio y agosto y aproximadamente desde mediados de septiembre comienza el segundo periodo lluvioso del año que dura hasta noviembre²⁸.

La precipitación en el municipio de Los Santos varía entre 950 mm anuales en la parte sur occidente y mayor a 1000 mm en la parte centro y norte del municipio, disminuyendo hacia la hoya del río Chicamocha. Presenta dos temporadas lluviosas y dos secas²⁹.

1.4.4.2 Índice de aridez en la región.

El índice de aridez es una medida que determina la cantidad de agua que el suelo puede contener. Este depende de la temperatura del ambiente promedio de la región, la precipitación de la zona y las características del suelo, entre otras propiedades.

Para el municipio de Los Santos, el índice de aridez se encuentra entre los más altos de Santander, (entre 0,25% y 0,10% porcentaje con respecto a la precipitación de la cantidad de agua que se queda en el suelo), lo que aumenta el déficit de agua en el suelo de tres a seis meses del año. Al tener un índice de aridez alto se hace necesaria la dotación de riego mediante la utilización de embalses³⁰.

²⁸ CARACTERIZACIÓN COMPONENTE FÍSICO-BIÓTICO MUNICIPIO DE LOS SANTOS-SANTANDER. IDEAM. 5 p.

²⁹ Ibid., p. 20.

³⁰ Ibid., p. 17.

Por lo tanto para los habitantes de la zona es importante un manejo adecuado de las cuencas, deforestación de los bosques, el uso excesivo de los suelos pueden generar cambios microclimáticos que alteran significativamente el ecosistema de la zona³¹.

1.4.4.3 Evapotranspiración de la región.

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos o fenómenos naturales, el agua o humedad contenida en el suelo se evapora (evaporación) y el agua contenida en las plantas se transpira (transpiración) hacia la atmósfera en forma de vapor. Estos procesos requieren de cierta energía para poder cambiar el estado de las moléculas de agua de líquido a vapor, esta energía es obtenida a de la radiación solar y en menor medida de la temperatura del ambiente³².

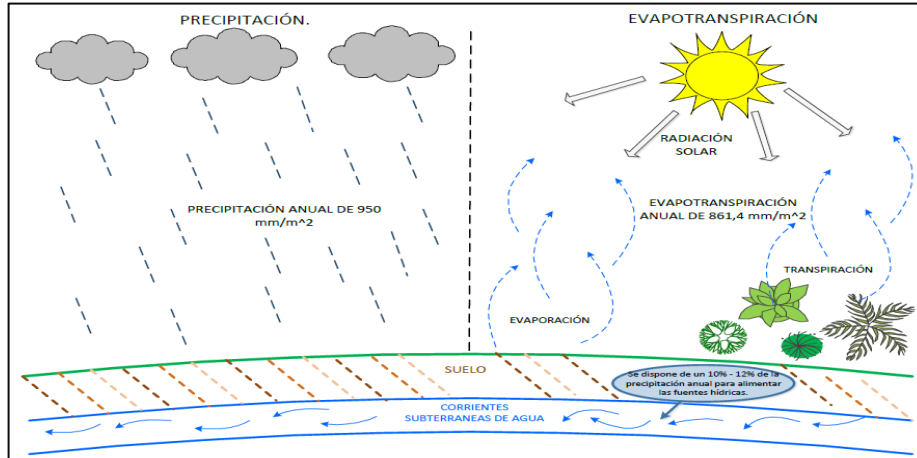
Según el informe de esquema de ordenamiento territorial para el municipio de Los Santos, la evapotranspiración Real es de 861,4 mm (anual)³³ y teniendo en cuenta que la precipitación anual en la región es de 950 mm, se dispone solo de un 10 % a un 12 % (aproximadamente) de la precipitación anual en la zona para alimentar corrientes superficiales de agua, pozos y ríos con agua dulce, tal y como se muestra en la siguiente figura.

³¹ Ibid., p. 18.

³² ALLEN, Richard G, *et al. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food & Agriculture Org., 2006. p.1.

³³ CARACTERIZACIÓN COMPONENTE FÍSICO-BIÓTICO MUNICIPIO DE LOS SANTOS-SANTANDER. IDEAM, Evapotranspiración Potencial, p.11

Figura 26. Precipitación y evapotranspiración en la región.



1.4.4.4 Disponibilidad hídrica en la región.

Debido a la alta evapotranspiración en la mesa de Los Santos, es muy poca la cantidad de precipitación que se puede aprovechar para alimentar las fuentes hídricas. La zona de la meseta de los santos no presenta una buena disponibilidad de agua a lo largo del año, esta debe ser racionada y acumulada en embalses para su correcto uso a lo largo del año. Cerca de un 88% de precipitación se pierde a causa de la alta evapotranspiración de la zona³⁴.

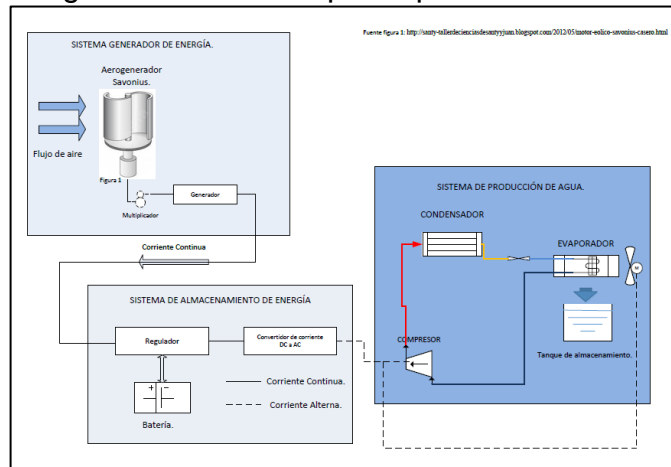
³⁴ Ibid., p. 19.

2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO.

El prototipo se compone por tres subsistemas, tal y como se observa en la **figura 27**. En este capítulo se expondrá la función de cada subsistema dentro del prototipo, sus componentes principales y su principio de funcionamiento con el orden mencionado a continuación.

- Subsistema generador de agua por deshumidificación de aire.
- Subsistema generador de energía.
- Subsistema de almacenamiento de energía.

Figura 27. Esquema general de todo el prototipo.



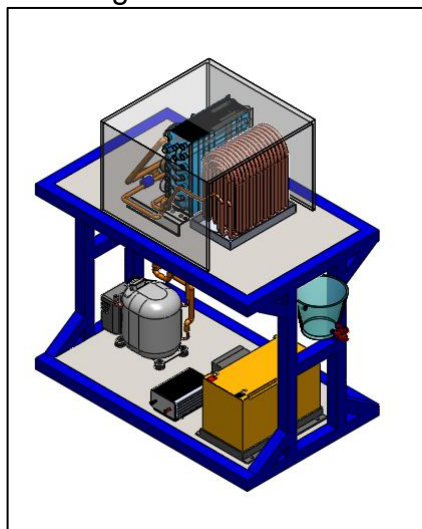
El deshumidificador se encargará de la condensación de la humedad contenida en el ambiente, parte de la energía requerida por este subsistema será suministrada por un aerogenerador tipo Savonius. En caso de que los dos subsistemas (generador de agua y energía) no funcionen en el mismo tiempo, la energía eléctrica deberá ser almacenada en la batería del prototipo. Para garantizar la condensación de la humedad, la temperatura en la superficie del evaporador debe estar por debajo de la temperatura del punto de rocío del ambiente.

2.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA POR DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE.

El sistema seleccionado para condensar la humedad es un sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor, se encarga de generar el agua a partir de la condensación de la humedad que hay en el ambiente, este deberá producir 0,75 Lt/hora, bajo las condiciones ambientales más severas, es decir, cuando la humedad del ambiente sea baja y la temperatura del ambiente alta. Este sistema es ampliamente utilizado en refrigeración comercial y en refrigeración para el hogar.

El evaporador del sistema debe estar hecho de un material con alta conductividad térmica para que facilite la transferencia de calor entre el aire y el refrigerante. El objetivo es que el refrigerante entre al evaporador a una temperatura por debajo de la temperatura de rocío, de modo que cuando se haga fluir el aire por el evaporador la humedad contenida en el ambiente cambie de fase y se condense.

Figura 28. CAD, Sistema de Refrigeración.

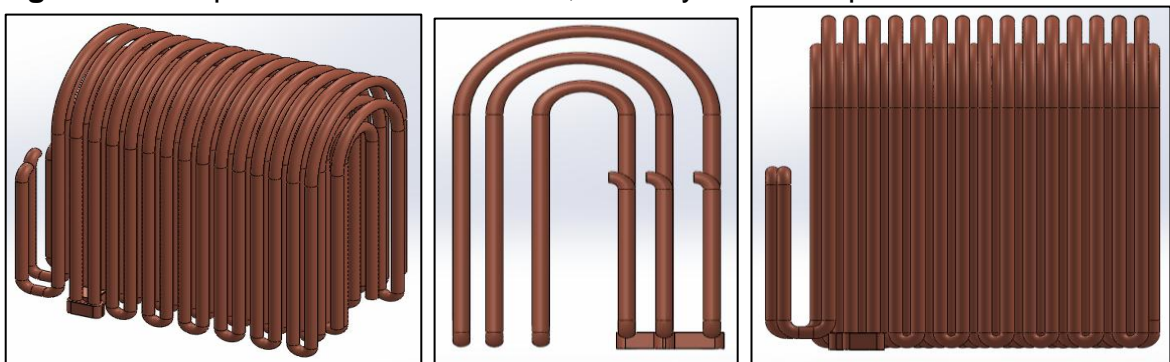


componentes principales que intervienen en el proceso, **el evaporador, condensador, compresor y un elemento de control**. Se explicaran a continuación:

- **Evaporador o unidad manejadora:** Como se mencionó, este elemento se encarga del cambio de fase de las moléculas de agua. Transfiere el calor absorbido del espacio refrigerado al refrigerante que circula por el sistema. En este elemento el refrigerante sale como vapor a baja presión y temperatura y entra al compresor para ser nuevamente comprimido e impulsado hacia el condensador. Para maximizar la transferencia de calor, el evaporador esta hecho de materiales con una alta conductividad térmica.

Un aspecto a tener en cuenta en su implementación es evitar la formación de capas de hielo en la superficie, esta capa actúa como una resistencia térmica que impide una interacción más directa entre fluido refrigerante y el aire, otro aspecto es evitar la circulación de aire contaminado ya que este puede tener partículas que se adhieren a la superficie del evaporador y por tanto pueden afectar su buen funcionamiento³⁵.

Figura 30. Evaporador. Vista isométrica, lateral y frontal respectivamente.



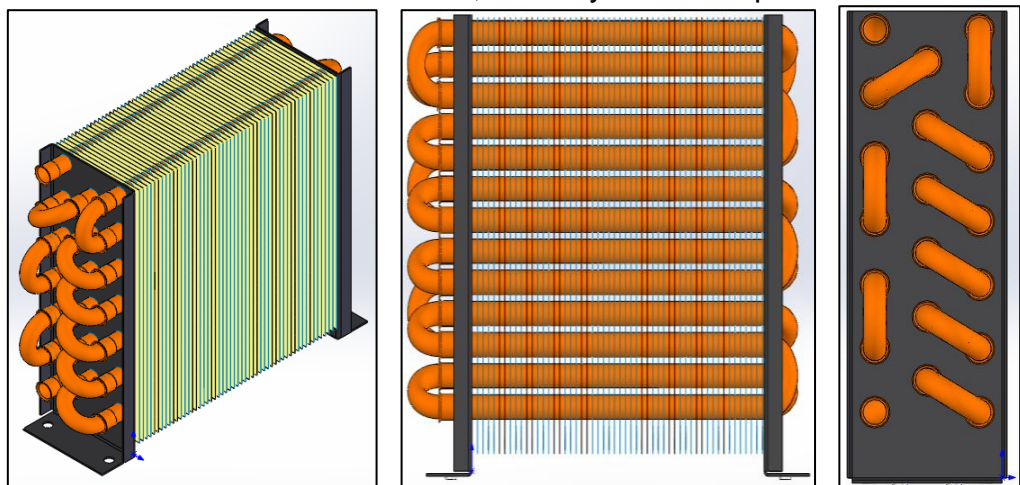
³⁵ EMBRACO. Revista Club de la Refrigeración. Evaporador. [En línea]. [Consultado el 10 Enero de 2015], Disponible en < <http://www.clubedarefrigeracao.com.br/es/downloads/evaporador-donde-el-fluido-refrigerante-pasa-al-estado-gaseoso>>

- **Condensador:** Este elemento se encarga de disipar el calor del sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor que fue absorbido por el evaporador y la energía en forma de trabajo que fue introducida al sistema mediante el compresor. El proceso de condensación se da en tres partes o etapas: enfriamiento del gas sobrecalentado a la temperatura de condensación, condensación del fluido y subenfriamiento del fluido.

Los materiales en los cuales viene construido generalmente son tubos de cobre y aletas de aluminio. Estos dos materiales son de alta conductividad térmica y facilitan la transferencia de calor hacia el ambiente.

La selección inadecuada del condensador puede causar consecuencias que se traducen en presiones excesivas, pérdidas en la capacidad de refrigeración, temperaturas no deseadas y consumos energéticos adicionales.³⁶ Estas causas pueden llegar a ser comunes si no se corrigen los problemas. Un intercambiador de calor comercial enfriado por aire luce tal cual como en la **figura 31**.

Figura 31. Condensador. Vista isométrica, frontal y lateral respectivamente.



³⁶EMBRACO. Revista Club de la Refrigeración. Condensador. [En línea]. [Consultado el 10 Enero de 2015], Disponible en < <http://www.clubedarefrigeracao.com.br/es/downloads/condensador>>

- **Compresor:** Este elemento mantiene en marcha el sistema de refrigeración, funciona como una bomba para mantener la circulación del gas refrigerante a través de todo el circuito y es parte fundamental al ser el encargado de aumentar la presión y temperatura del refrigerante de forma isentrópica.

Un aspecto importante en la selección del compresor, es el elemento de control que se utilice dentro del sistema. “Cuando se utiliza un tubo capilar las presiones entre la descarga y la succión se ecualizan antes de la partida del compresor, esto produce que el torque de partida para el nuevo arranque del compresor sea bajo”³⁷, es decir, se puede utilizar un compresor con especificación LST (Low Starting Torque).

Si el elemento de control es una válvula de expansión, el torque necesario del compresor para su nuevo arranque debe ser más elevado, “ya que en el momento que el compresor es apagado el refrigerante deja de fluir, por lo tanto, para el nuevo comienzo, el compresor debe vencer la diferencia de presión entre la descarga y la succión”³⁸. La especificación de compresor que debe ser usado es HST (High Starting Torque).

Tabla 4. Especificación del compresor (Torque)

Elemento de control.	Especificación de compresor.
Tubo capilar.	LST (Low Starting Torque) y HST
Válvula de expansión.	HST (High Starting Torque)

³⁷EMBRACO. Revista Club de la Refrigeración. Los secretos de los compresores. [En línea]. [Consultado el 10 Enero de 2015], Disponible en < EMBRACO. Revista Club de la Refrigeración. Condensador. [En línea]. [Consultado el 10 Enero de 2015], Disponible en < <http://www.clubedarefrigeracao.com.br/es/downloads/condensador>>

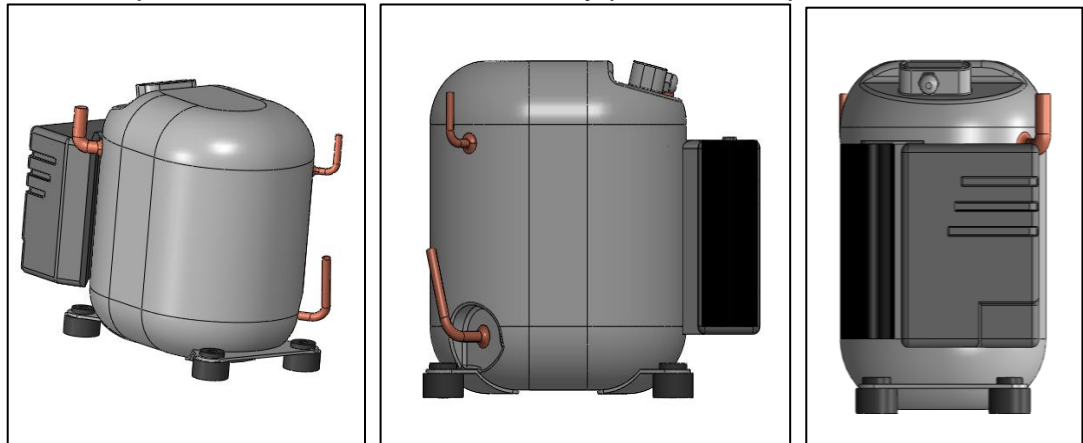
³⁸ Ibid., p.1.

El rango de la temperatura de evaporación es también una condición. Entre más alta sea la temperatura de evaporación mayor será la potencia requerida por el motor del compresor para aumentar la presión y temperatura del refrigerante y la capacidad o COP que debe tener el compresor, por lo tanto, dependiendo de la temperatura de evaporación y del COP también se clasifican los compresores. En la siguiente tabla se muestra el rango de temperaturas y tipo de compresor indicado para la aplicación requerida. En la **tabla 5** se muestra el rango de temperatura de evaporación.

Tabla 5. Especificación de compresor de acuerdo a temperatura de evaporación.

Rango de la T° de evaporación.	Tipo de compresor.
-35 ° C hasta -10° C	LBP (Low Back Pressure)
-35°C hasta -5°C	LBP / MBP (Medium Back Pressure)
-5°C hasta 15°C	HBP (High Back Pressure)

Figura 32. Compresor. Vista isométrica, lateral y posterior respectivamente.



- **Elementos de control:** Su función es mantener la diferencia de presión en la zona de alta (condensador) y la zona de baja (evaporador) dentro del sistema. Este elemento crea una resistencia al flujo del refrigerante que “se paga” con la pérdida de presión y por tanto generando la caída dentro del tubo capilar. A la

hora precisar el elemento de control que va a hacer parte del sistema de refrigeración se deben tener en cuenta las especificaciones, el tipo de aplicación y el objetivo que se quiere lograr. El control se puede lograr con dos elementos, un tubo capilar o una válvula de expansión. Las ventajas y desventajas de los elementos se muestran en las **tablas 6 y 7**.

Tabla 6. Ventajas y desventajas del tubo capilar.

Elemento de control: Tubo capilar.	
Ventajas.	Desventajas.
Permite la ecualización de presiones, permitiendo utilizar un compresor de bajo torque de arranque, lo que traduce en menor consumo de potencia.	La determinación del tubo capilar puede tornarse un poco complejo, la presión y temperatura deseada dependen del diámetro y longitud del capilar. Es decir prueba y error. Tarda cierto tiempo en iniciar el intercambio de calor.

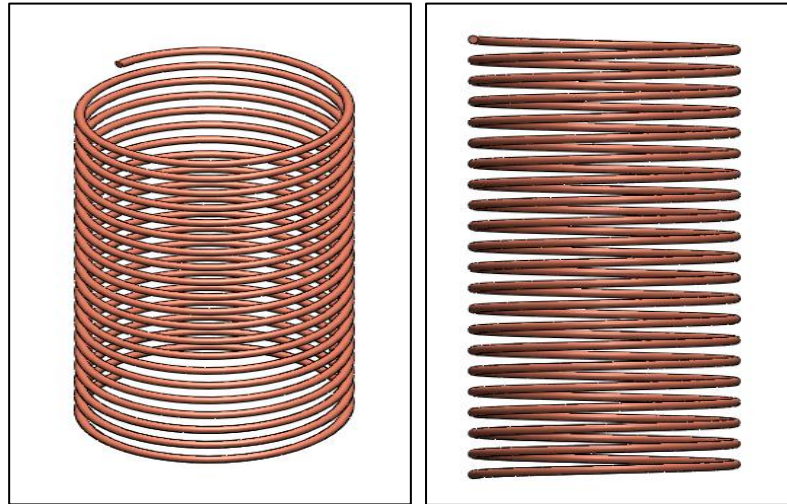
Fuente: EMBRACO, Revista Club de la refrigeración, Elementos de control.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de la válvula de expansión.

Elemento de control: Válvula de expansión.	
Ventajas.	Desventajas.
Está diseñada para mantener un sobrecalentamiento en el evaporador. Permite que se mantenga el diferencial de presión entre paradas, permitiendo que al momento del arranque el intercambio de calor inicie al instante.	Requiere de un compresor de alto torque de arranque, ya que este debe vencer la diferencia de presión entre la descarga y la succión.

Fuente: EMBRACO, Revista Club de la refrigeración, Elementos de control.

Figura 33. Tubo capilar. Vista isométrica y frontal respectivamente.



2.1.3 Principio de operación.

El método que usa el deshumidificador es la compresión mecánica de vapor en la cual se realiza un proceso cíclico de transferencia de calor. Consiste en cuatro etapas en donde el papel principal lo cumple el refrigerante que se evapora a baja temperatura y presión y se condensa a alta temperatura y presión.

En la primera etapa el refrigerante se evapora por completo en el elemento denominado evaporador, en este se da un primer intercambio de calor ya que el refrigerante debe absorber el calor del aire que circula para poder evaporarse por completo y entrar al compresor. En la segunda etapa el compresor comprime el gas aumentando su temperatura y presión, dejándolo como vapor sobrecalentado. En la tercera etapa se da un segundo intercambio de calor entre el refrigerante y el ambiente, esto sucede en el condensador, allí él refrigerante pasa de estar como vapor sobrecalentado a líquido saturado. La última etapa la cumple el elemento de control, este elemento aprovecha su capilaridad para reducir la presión y por tanto la temperatura del refrigerante, retornando a las condiciones iniciales del ciclo.

Utiliza principios termodinámicos y de transferencia de calor para retirar el calor de un determinado espacio con el fin de mantener una cierta temperatura para conservación o en otras aplicaciones como en este caso para deshumidificación del aire.

Se basa y utiliza las leyes de la termodinámica y conceptos como la entropía, la entalpia, resistencias térmicas, evaporación y condensación, temperaturas de rocío, humedad relativa, cambio de fase etc., para cumplir con el objetivo y su ciclo de refrigeración que mantendrá el sistema en constante funcionamiento.

2.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.

Este subsistema se encarga de generar parte de la energía eléctrica que requiere el deshumidificador, lo hace aprovechando la energía cinética que proveen las corrientes de aire y se desea que el rotor pueda extraer una potencia no inferior a 100 W de potencia eléctrica bajo las condiciones habituales. Su principio de funcionamiento se basa en la extracción de la energía cinética que contiene un flujo de aire en movimiento, el rotor es el elemento mecánico encargado de este suceso, una vez extraída, se produce un movimiento rotacional en su eje, que a su vez, es transmitido mediante un juego de poleas hacia un alternador de corriente continua

2.2.1 Función del subsistema generador de energía.

La función de este subsistema es aprovechar el flujo de las corrientes de aire que se dan en la superficie de la tierra, extraer la energía cinética de estos flujos para generar un movimiento rotacional en el eje del rotor, el cual mediante un sistema de transmisión por poleas se transmite al alternador de corriente que se encarga de generar la corriente eléctrica.

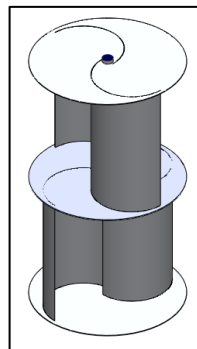
2.2.2 Componentes del subsistema generador de energía.

Los componentes principales que hacen parte del subsistema generador de energía a partir de la extracción de la energía cinética del viento son, **el rotor, el eje del rotor, la transmisión del movimiento rotacional por poleas, el alternador de corriente y la estructura de sujeción.**

- **Rotor:** El rotor es el elemento mecánico encargado de la extracción de la energía cinética, aprovecha el diferencial de fuerzas que se produce en una superficie cóncava y en una superficie convexa para generar el movimiento rotacional.

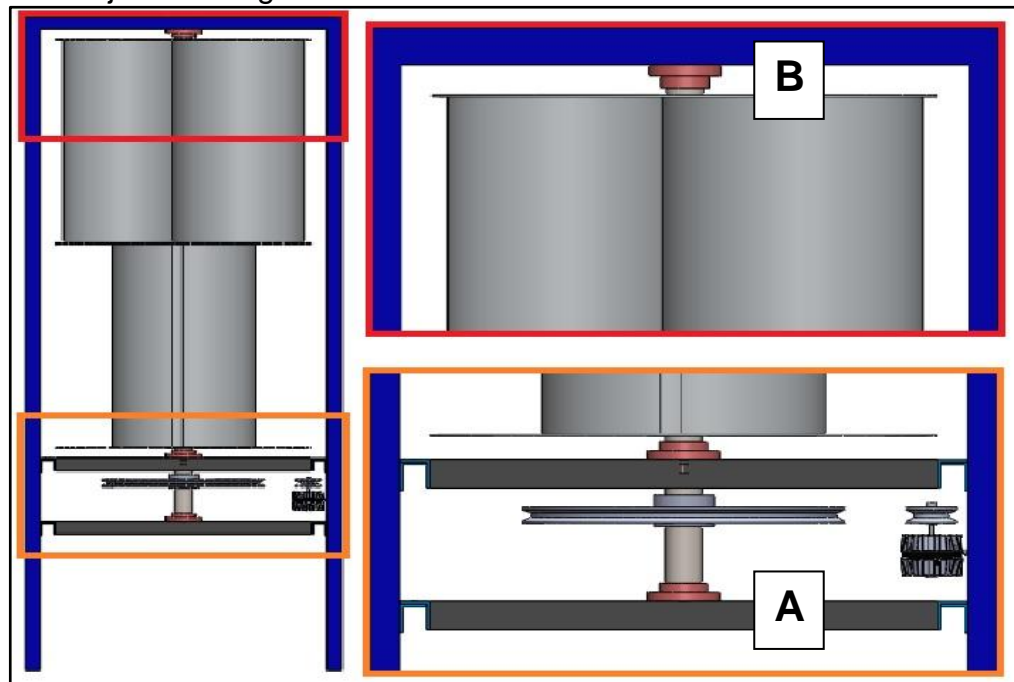
Es el componente que más ocupa espacio dentro de la estructura, por lo cual, es esencial que su peso sea el menor posible. Se puede fabricar en materiales livianos como fibra de vidrio, fibra de carbono o metales como láminas de aluminio. Para facilitar el cambio de dirección y aprovechar la cantidad de movimiento del viento dentro del rotor los ejes de los semicilindros deben estar desplazados entre sí. Debido a que no generan grandes cantidades de potencia, el tamaño del rotor debe ser lo más grande posible para que la cantidad de potencia generada sea aceptable.

Figura 34. Rotor.



- **El eje:** Este componente del aerogenerador va unido al rotor en la parte inferior y en la parte superior, es el encargado de transmitir el movimiento del rotor al sistema de transmisión.

Figura 35. Eje del aerogenerador.

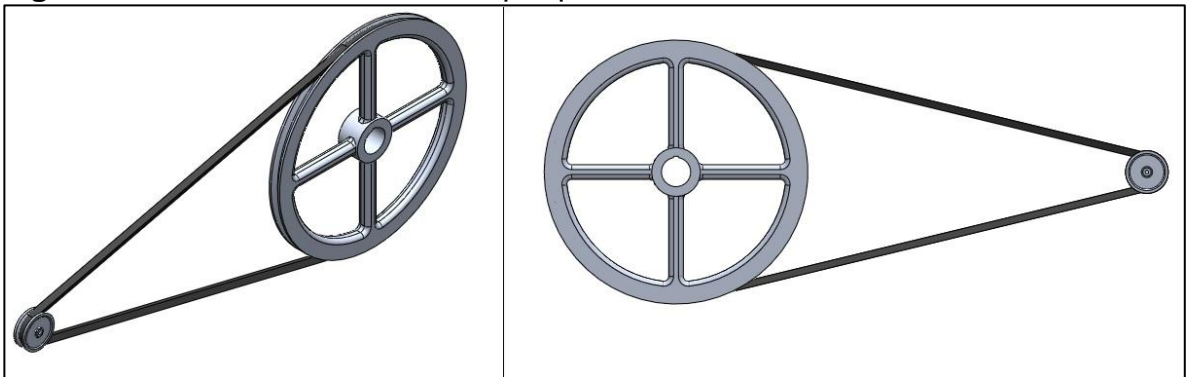


El eje se divide en dos partes con el objetivo de facilitar el cambio de movimiento del aire dentro del rotor y permitirle mayor flujo en la excentricidad de los alabes. El eje principal se encuentra en la parte inferior (Figura 35A), transmite el movimiento rotacional hacia el alternador mediante un juego de poleas. En la figura 35B se observa el eje superior, no transmite movimiento pero si da soporte al rotor en la parte superior.

- **Transmisión por poleas:** Se encarga de transmitir el movimiento rotacional del eje del rotor al eje del alternador, se fabrican completamente en aluminio para disminuir la inercia de rotación y el peso de todo el conjunto. Los parámetros a tener en cuenta son la relación de velocidades y la distancia entre centros de las

poleas. Los alternadores utilizan altas velocidades de rotación para poder generar el voltaje que permita el paso de corriente hacia la batería, por lo tanto, la relación entre los diámetros de las poleas debe ser la mayor posible.

Figura 36. Sistema de transmisión por poleas.



- **Alternador de corriente:** El movimiento de piezas dentro del prototipo finaliza en este elemento. A su eje llega un alto movimiento rotacional debido a la relación de diámetros entre la polea del rotor y la polea del alternador.

Este alto movimiento rotacional se debe a que los alternadores requieren altas revoluciones para generar el voltaje y por tanto el amperaje que corresponda a la velocidad de rotación.

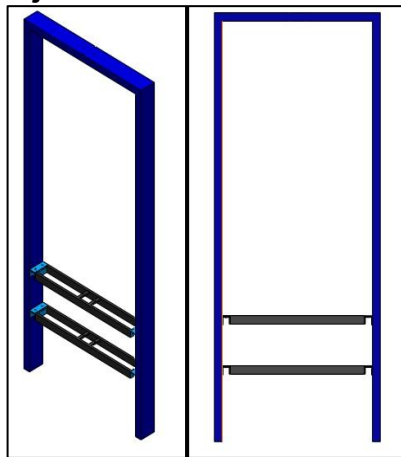
- **Estructura de sujeción:** La estructura de sujeción no cumple una función específica dentro del funcionamiento del prototipo. Su objetivo es dar soporte, estabilidad y seguridad a todos los elementos que estén soportados y anclados en él.

La estructura debe ser lo suficientemente rígida para aguantar el peso de todos los componentes y al mismo tiempo se deben poder acomodar sin ningún inconveniente. La estructura no puede mantener el equilibrio por sí sola, de

manera que son requeridos cables tensores que son anclados al suelo y sujetos en la parte superior de la estructura para darle equilibrio.

Estos cables tensores deben anular todas las fuerzas horizontales que intenten sacar del equilibrio la estructura de sujeción, al mismo tiempo todo debe estar sobre una superficie completamente horizontal para garantizar la correcta alineación entre ejes, rotor, rodamientos y chumaceras.

Figura 37. Estructura de sujeción.



2.2.3 Principio de funcionamiento.

Este rotor está compuesto por semicilindros con superficies cóncavas y superficies convexas, también recibe el nombre de arrastre diferencial ya que su movimiento no se produce por el efecto de las fuerzas aerodinámicas sino porque aprovecha la diferencia de fuerzas o de presiones que se generan en este tipo de superficies para iniciar su movimiento rotacional. La diferencia de fuerzas generada produce un movimiento de rotación de los alabes alrededor del eje del rotor (esta diferencia que produce el movimiento se hace más grande a medida que aumenta la velocidad del viento y por tanto habrá más velocidad de giro), en este mismo eje también se encuentra una polea (de diámetro mayor) que mediante una correa se conecta a la polea (de diámetro menor) del alternador y mediante la correa

mencionada transmite el movimiento rotacional al eje del alternador produciendo el giro necesario y generando la corriente eléctrica deseada.

2.3 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

Este subsistema se compone de tres (3) elementos que se encargan de la regulación, almacenamiento y conversión de la energía eléctrica. La batería debe poder almacenar la energía suficiente para que el subsistema generador de agua por deshumidificación de aire trabaje en régimen 6 horas sin que esta reciba potencia eléctrica.

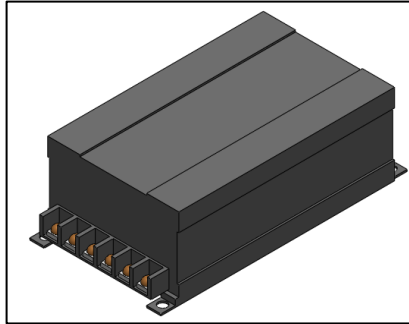
2.3.1 Función del subsistema de almacenamiento de energía.

Debe cumplir con tareas importantes dentro del funcionamiento de todo el conjunto. Allí se almacena la energía que requiere el deshumidificador, se regula la corriente eléctrica que proviene del generador de corriente protegiendo a la batería de sobrecargas y sobre descargas y su posterior conversión de corriente continua DC a corriente alterna AC cuando sea utilizado por los componentes eléctricos del generador de agua.

2.3.1 Componentes del subsistema de almacenamiento de energía.

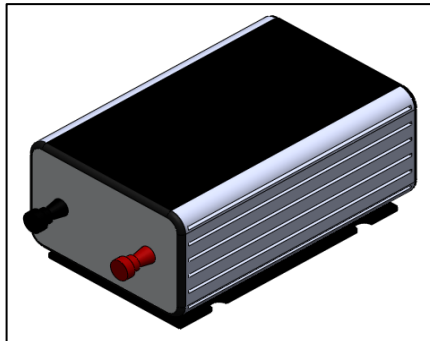
- **Controlador o regulador de corriente:** A su cargo esta evitar sobrecargar y mantener el límite de descarga en la batería. Su función práctica es permitir el paso de corriente cuando el sistema de refrigeración se accione y cortar el flujo de corriente cuando se esté al límite de profundidad de descarga.

Figura 38. Regulador o controlador de corriente.



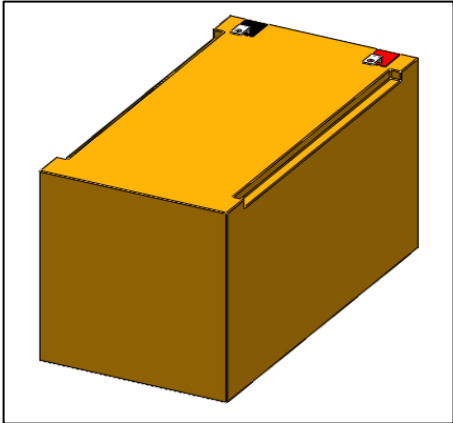
- **Inversor de corriente:** El inversor cambia el estado de la corriente, la pasa de un estado continuo a un estado alterno, debe entregar la corriente en la frecuencia utilizada por los elementos eléctricos del deshumidificador y al mismo tiempo con el voltaje utilizado.

Figura 39. Inversor de corriente DC a AC.



- **Batería:** La batería debe poder acumular la energía eléctrica que le envía el generador de corriente. En caso de que la batería sea el único proveedor de electricidad, esta debe contener la cantidad suficiente para que el deshumidificador cumpla con su objetivo.

Figura 40. Batería.



3. DISEÑO DETALLADO.

En este capítulo se mostrarán los métodos y procesos de cálculo utilizados para diseñar en cada uno de los subsistemas del prototipo.

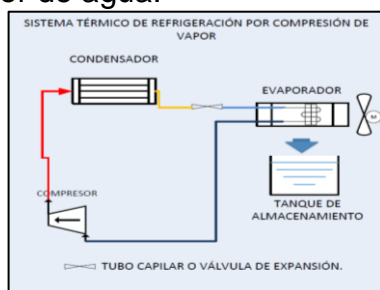
- Subsistema generador de agua por deshumidificación de aire.
- Sistema generador de energía.
- Subsistema de almacenamiento de energía.

3.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA POR DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE.

El subsistema productor de agua se encarga del cambio de fase de las moléculas de agua que se encuentran en el ambiente. Como se muestra en la **figura 41** se compone de un evaporador, un compresor, un condensador y un elemento de control. De los elementos mencionados se diseñará la unidad evaporadora y los elementos restantes se seleccionaran de acuerdo a los resultados obtenidos.

- Diseño de la unidad manejadora.
- Índices energéticos del sistema productor de agua.
- Variación del calor y generación de agua con respecto a la temperatura de entrada.

Figura 41. Sistema productor de agua.



3.1.1 Diseño de la unidad manejadora.

Este elemento extrae el calor del aire que circula a través de él, cambia el estado de las moléculas de agua (de vapor a líquido), de este diseño se obtendrán las condiciones de salida del aire para una unidad manejadora específica y el flujo másico de agua que esta condensara.

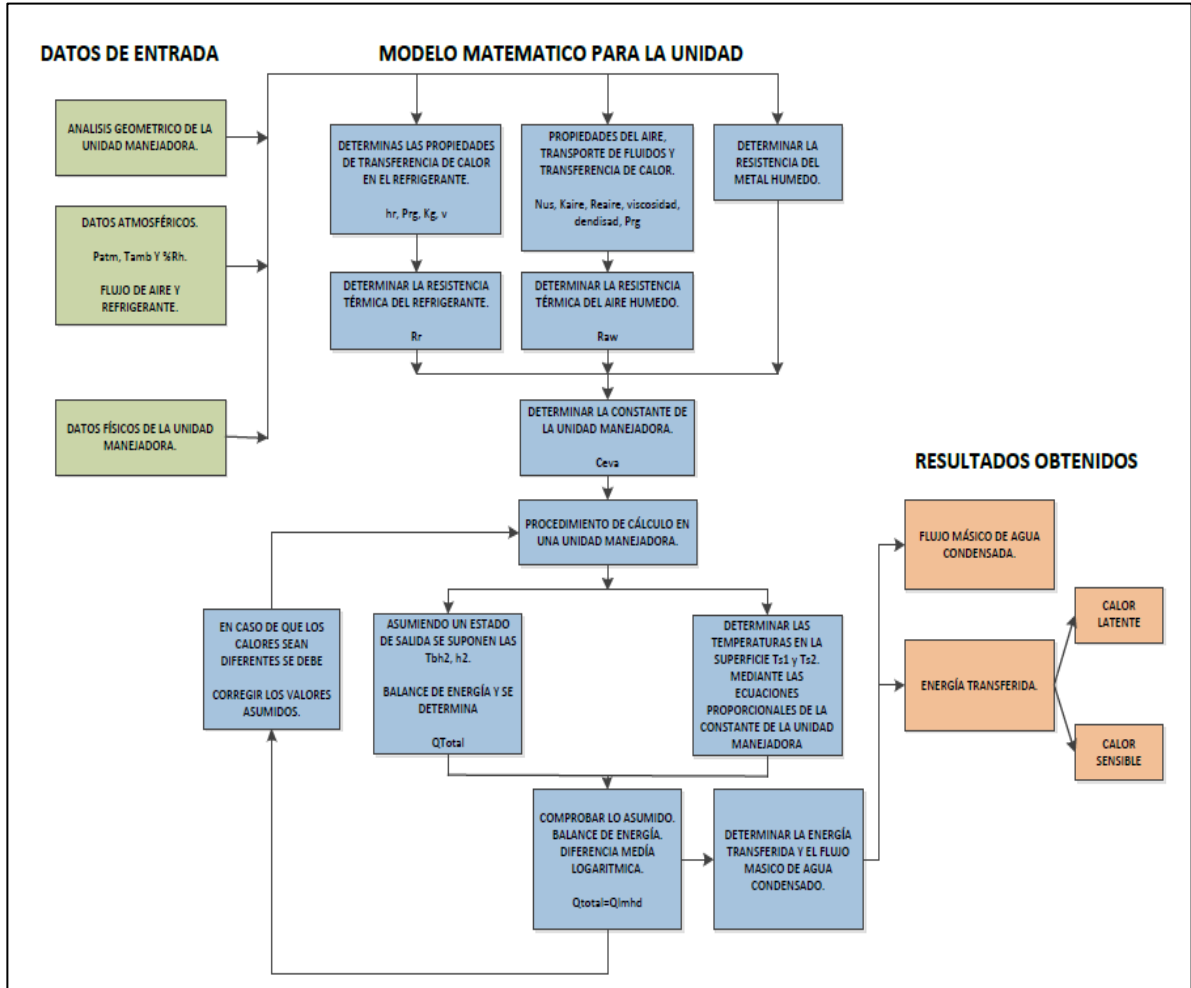
Su diseño contempla las condiciones más adversas del día para las cuales deberá presentar un flujo mínimo de condensación. El aire frío que sale del deshumidificador no tiene otra aplicación, por lo tanto es conveniente hacerlo circular por el condensador del subsistema, este aire ayudará a que el condensador condense el refrigerante a una menor temperatura, aumentando la capacidad del sistema para extraer y retirar calor

- **Modelo para el desarrollo de los cálculos.**

En el análisis de unidades manejadoras de aire se pueden plantear dos tipos de problemas, uno es conociendo las condiciones de entrada y salida del aire, en este tipo de problema se conoce el calor latente (Q_l) y el calor sensible (Q_s) del proceso, el objetivo es conocer el área que me permite tener esa transferencia de energía. Un segundo tipo de problema en el análisis de unidades manejadoras es conociendo el área de transferencia y las condiciones de entrada del aire, en este tipo de problema el objetivo es conocer la cantidad de energía que se transfiere.

La unidad manejadora debe tener la capacidad de responder de manera adecuada a la carga térmica compuesta por calor sensible y calor latente tomada del aire circulante. A continuación se presenta un esquema del desarrollo del modelo matemático que se debe aplicar para el diseño de la unidad manejadora.

Figura 42. Modelo matemático para la unidad manejadora.

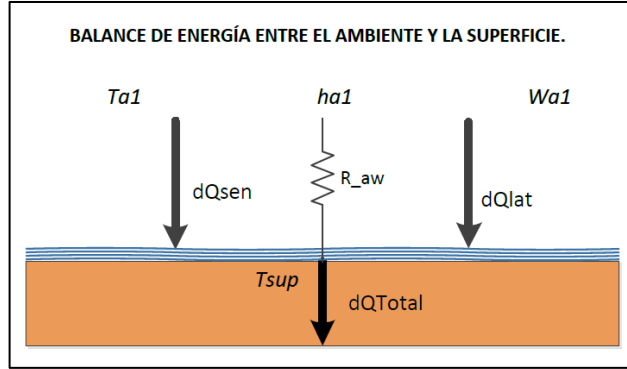


- **Constante característica de la unidad manejadora.**

Determinar un coeficiente característico de la unidad es necesario, debido a que la transferencia de energía se compone de calor y masa, por tanto, es importante determinar una constante característica que permita el diseño y modelar este elemento. A continuación se presenta la deducción de la constante característica de la unidad manejadora y como determinar sus variables.

Balance de energía entre el ambiente y la superficie de la unidad.

Figura 43. Balance de energía entre ambiente y superficie.



$$dQ_{total} = dQ_{lat} + dQ_{sen} \quad (3.1)$$

$$dQ_{sen} = h_o * dA_o * T_a - T_s \quad y \quad dQ_{lat} = \frac{h_o}{C_p} * dA_o * W_a - W_s^* * h_{fg} \quad (3.2)$$

Remplazando sacando como factor común el término $\frac{h_o * dA_o}{C_p}$ obtenemos la siguiente expresión.

$$dQ_{total} = \frac{h_o * dA_o}{C_p} * C_p * T_a - T_s + W_a - W_s^* * h_{fg} \quad (3.3)$$

La entalpía de saturación en la superficie h_s^* y la entalpía del ambiente h_a obedecen a las siguientes expresiones.

$$h_s^* = C_p * T_s + W_s^* \quad 3.4 \quad y \quad h_a = C_p * T_a + W_a \quad (3.5)$$

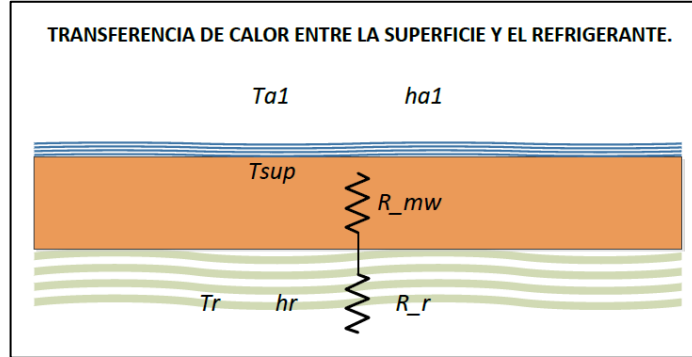
Remplazando las expresiones (3.4) y (3.5) en (3.3) se obtiene.

$$dQ_{total} = \frac{h_o}{C_p} * dA_o * h_a - h_s^* \quad 3.6 \quad ; \text{En donde } h_s^* = h_s$$

$$dQ_{total} = \frac{h_a - h_s}{C_p * \frac{1}{h_o * dA_o}} = \frac{h_a - h_s}{C_p * R_{aw}} \quad (3.7)$$

Transferencia de calor entre la superficie y el refrigerante.

Figura 44. Transferencia de calor entre la superficie y el refrigerante.



Utilizando el método de las resistencias por transferencia de calor entre la superficie y el refrigerante obtenemos la siguiente ecuación.

$$dQ_{total} = \frac{T_{sup} - T_r}{\frac{e}{K * dA_r} + \frac{1}{h_r * dA_r}} \quad (3.8)$$

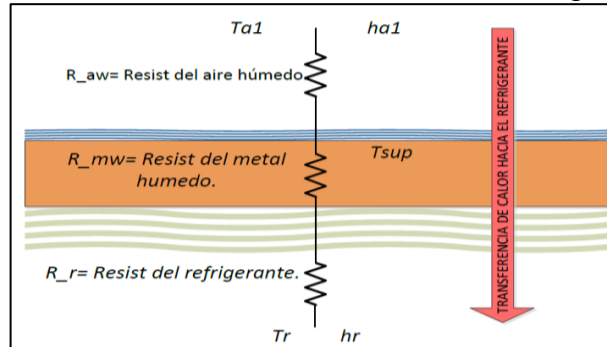
Igualando las expresiones (3.7) y (3.8) y multiplicando por $\frac{1}{dA_o}$ obtenemos la siguiente expresión.

$$\frac{T_{sup} - T_r}{\frac{e * dA_o}{K * dA_r} - \frac{dA_o}{h_r * dA_r}} = \frac{h_a - h_s}{C_p * \frac{1}{h_o}} \rightarrow \frac{T_{sup} - T_r}{R_{mw} + R_r} = \frac{h_a - h_s}{C_p * R_{aw}} \rightarrow \frac{R_{mw} + R_r}{C_p * R_{aw}} = \frac{T_{sup} - T_r}{h_a - h_s}$$

$$C = \frac{R_{mw} + R_r}{C_p * R_{aw}} = \frac{T_{sup} - T_r}{h_a - h_s} \quad 3.9$$

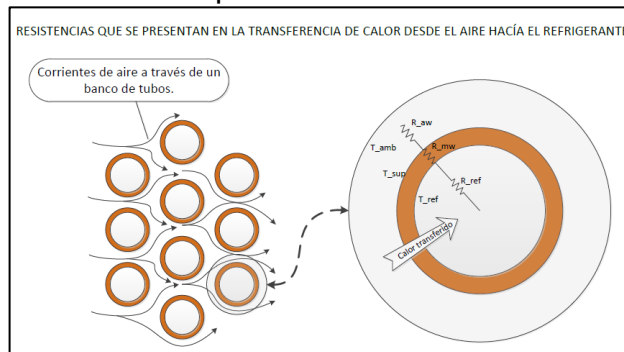
En donde: R_{mw} : Resistencia del metal húmedo, R_r : Resistencia del refrigerante y R_{aw} : Resistencia del aire húmedo.

Figura 45. Resistencias desde el aire húmedo hacia el refrigerante.



La expresión final para la constante de la unidad manejadora se observa en la ecuación (4.9). En la siguiente imagen se observan las resistencias que se oponen a la transferencia de calor desde un flujo de aire hacia el refrigerante.

Figura 46. Resistencias en el evaporador.



A continuación se presentan los métodos y las expresiones para determinar los valores de las resistencias pertenecientes a la constante característica de la unidad manejadora.

- **Resistencia térmica del refrigerante (R_r).**

La resistencia térmica que ofrece el refrigerante al calor se determina por una correlación en donde interviene el área exterior e interior de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia de calor por convección del refrigerante.

El coeficiente de transferencia de calor con convección h_r , a su vez está en función de números adimensionales como el número de Reynolds y el número de Prandtl.

Las expresiones se mencionan a continuación³⁹.

$$R_r = \frac{A_o}{h_r * A_r} \quad (3.10)$$

En donde:

R_r : Resistencia térmica del refrigerante [m^2 -C/KW]; A_o : Área exterior de transferencia de calor [m^2].
 A_r : Área interior de transferencia de calor [m^2]; h_r : Coeficiente de transferencia de calor por convección [KW/ m^2 -C]

$$h_r = \frac{0,023 * Re_r^{0,8} * Pr_g^{0,4} * K_g}{D_i} \quad (3.11)$$

$$Re_r = \frac{G_r * D_i}{\nu_r} \quad 3.12 \quad G_r = \frac{m_r * 4}{\pi * D_i^2} \quad (3.13)$$

En donde:

Re_r : Número de Reynolds del refrigerante; Pr_g : Número de prandtl del refrigerante; K_g : Coeficiente de conductividad térmica de refrigerante; D_i : Diámetro interior de la tubería del evaporador [m];
 ν_r : Viscosidad del refrigerante [Kg/m-seg]; m_r : Flujo másico del refrigerante [Kg/Seg].

³⁹ BLANCO, Laura Isabel y BARRIOS Mauricio. Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de sistemas de acondicionamiento de aire bajo diferentes enfoques de control de confort. Trabajo de grado Ingeniería mecánica. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.

- **Resistencia del material húmedo (R_{mw}).**

Esta resistencia que ofrece el metal húmedo del evaporador está en función de sus características físicas. Estas características son: el espesor de la tubería, el área de transferencia total de calor (Área interior y área exterior) y el coeficiente de conductividad térmica del material.

A continuación se menciona la expresión

$$R_{mw} = \frac{e * A_o}{K_m * A_r} \quad (3.14)$$

En donde:

e: Espesor de la tubería de cobre del evaporador [m];

K_m : Conductividad térmica del material [W/m - °C]; A_o : Área exterior de transferencia [m²]

A_r : Área interior de transferencia [m²]

- **Resistencia del aire húmedo (R_{aw}).**

Esta es la resistencia ofrecida por el aire húmedo que circula hacia el evaporador. Únicamente está en función del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Para encontrar este coeficiente de transferencia de calor, se recurre al modelo de flujo a través de un banco de tubos. El flujo cruzado es común encontrarlo en diferentes aplicaciones de la industria, especialmente en aplicaciones de transferencia de calor.

Se le llama flujo cruzado porque dentro de los tubos se mueve un fluido y por el exterior de los tubos y de manera perpendicular se mueve el otro fluido. En este caso por dentro de la tubería circula refrigerante y por el exterior circula aire húmedo⁴⁰.

A continuación se muestra el proceso de cálculo para encontrar la resistencia ofrecida por el aire húmedo.

$$R_{aw} = \frac{1}{h_o} \quad (3.15)$$

Para encontrar el coeficiente de transferencia por convección se recurre al número de Nusselt.

$$Nus_D = \frac{h_o * D_{ext}}{K_{aire}} \quad (3.16)$$

En donde:

Nus_D : Número de nusselt con factor de corrección; D_{ext} : Diametro exterior de la tubería del evaporador [m]; K_{aire} : Conductividad térmica del aire [W/m-°C]; h_o : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²-°C]

El número de Reynolds es dominado por la velocidad máxima que se produce dentro del banco de tubos en vez de la velocidad de aproximación. Esto es debido a que la velocidad del aire aumenta radicalmente al pasar por las filas de tubos.

$$Re_D = \frac{\rho * V_{max} * D_{ext}}{\mu * 3600} \quad (3.17)$$

⁴⁰ YUNUS. A. Cengel. Traducido por José Hernan Pérez. 2 ed. McGraw-Hill, 2004. 389 p

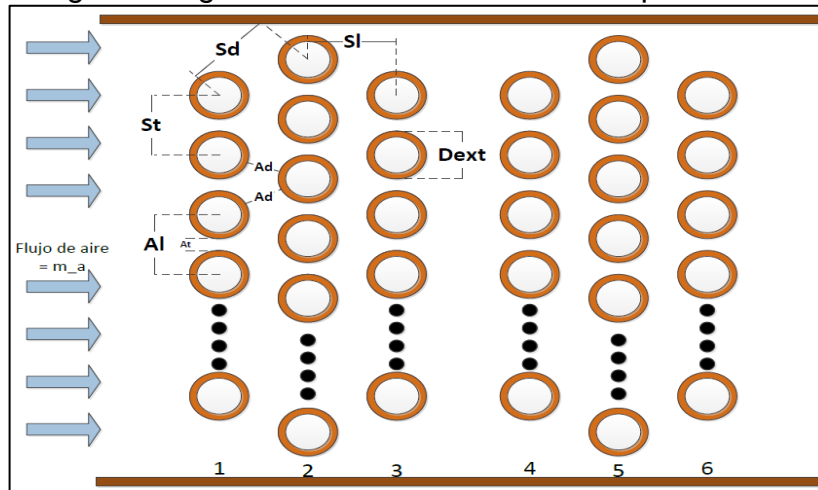
En donde:

ρ : Densidad del aire húmedo [Kg/m³]; μ : viscosidad dinámica del aire. [Kg/m-s]

D_{ext} : Diámetro exterior de la tubería del evaporador [m].

La velocidad máxima se determina dependiendo de la configuración geométrica del evaporador, la configuración puede ser escalonada o alineada. Para el caso de este proyecto la configuración del evaporador es escalonada a 30° tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 47. Configuración geométrica escalonada del evaporador.



Para encontrar la velocidad máxima en un evaporador con configuración geométrica escalonada se tiene dos opciones. Cuando el flujo de aire entra al evaporador la velocidad máxima se puede encontrar en dos puntos; En $2Ad$ o en At . Si $2Ad > At$, la velocidad máxima se encuentra con la ecuación (4.18), pero si $2Ad < At$, entonces la velocidad máxima se puede encontrar con la ecuación (4.19).

$$V_{max} = \frac{S_t}{S_t - D_{ext}} * V \quad 3.18$$

$$V_{max} = \frac{S_t}{2 * S_d - D_{ext}} * V \quad 3.19$$

Unidades: S_t , S_d y D_{ext} en metros. V en metros sobre segundo.

La velocidad de aproximación es la velocidad con la cual llega el aire al evaporador, se toma antes de entrar al banco de tubos. El caudal de aire es determinado por el ventilador que sea seleccionado para la unidad condensadora. A_{proy} es el área proyectada del evaporador.

$$V = \frac{Q}{A_{proy}} \quad (3.20)$$

Unidades: V en metros sobre segundo; A_{proy} en metros cuadrados y Q en metros cúbicos por hora.

Se han propuesto correlaciones para encontrar el número de nusselt basada en datos experimentales para el flujo cruzado. Una de estas correlaciones la ha propuesto Sukauskas, cuya forma general es⁴¹:

$$Nus_{Df} = C * Re_D^m * Pr^n * \frac{Pr}{Pr_g}^{0.25} \quad (3.21)$$

De acuerdo al número de Reynolds se puede encontrar el valor de las constantes C, m y n. Estos valores se encuentran en la siguiente tabla dependiendo del rango en el cual se encuentre el número de Reynolds. Si el número de Prandtl se encuentra en el siguiente rango también se puede encontrar el valor de la constante con la siguiente tabla. Número de Prandtl entre $0,7 < Pr < 500$.

⁴¹ YUNUS. A. Cengel. Transferencia de calor. Traducido por José Hernan Pérez. 2 ed. McGraw-Hill, 2004. 390 p.

Tabla 8. Constantes de la correlación de Sukauskas.

Disposición.	Rango.	Correlación.
Escalonados.	0 – 500	$Nu_{DF}=1.04*Re_D^{0.4}*Pr^{0.35}*(Pr/Pr_g)^{0.25}$
	500 – 1000	$Nu_{DF}=0.71*Re_D^{0.5}*Pr^{0.36}*(Pr/Pr_g)^{0.25}$
	1000 – $2*10^5$	$Nu_{DF}=0.35*(S_T/S_L)^{0.2}*Re_D^{0.6}*Pr^{0.36}*(Pr/Pr_g)^{0.25}$
	$2*10^5$ – $2*10^6$	$Nu_{DF}=0.031(S_T/S_L)^{0.2}*Re_D^{0.8}*Pr^{0.36}*(Pr/Pr_g)^{0.25}$

Fuente: YUNUS. A. Cengel. *Transferencia de calor. 2 ed. 391 p.*

Las correlaciones que han sido expresadas en la tabla anterior hacen referencia a bancos de tubos con 16 o más filas. En caso de que el banco de tubos tenga una cantidad de filas menor a 16, se deberá usar un factor de corrección F que es independiente del número de Reynolds.

$$Nus_D = F * Nus_{Df} \quad (3.22)$$

Tabla 9. Factor de corrección F para el número de Nusselt.

Numero de filas	1	2	3	4	5	7	10	13
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Fuente: YUNUS. A. Cengel. *Transferencia de calor. 2 ed. 391 p.*

- **Procedimiento de cálculo.**

El método para determinar las condiciones de salida del aire, encontrar la energía transferida y el flujo másico de agua que condensa la unidad manejadora se muestra en la siguiente tabla con los pasos a seguir.

En la siguiente imagen se muestra un esquema del ciclo que debe cumplir el refrigerante, las temperaturas en todas las partes del sistema y las líneas de alta y baja.

Figura 48. Procedimiento de cálculo.

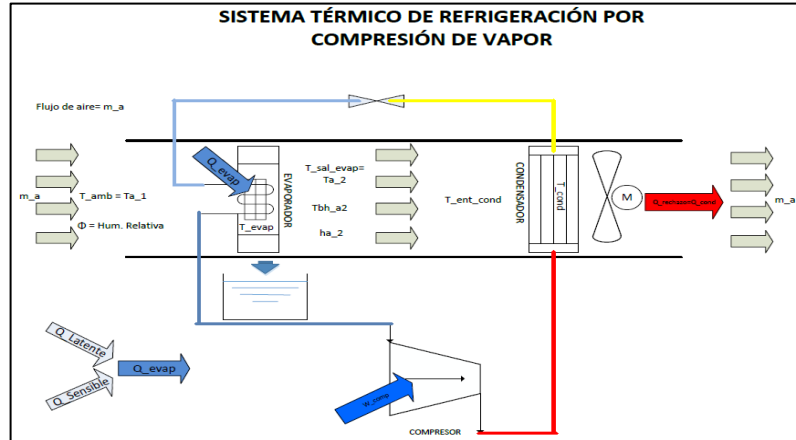


Tabla 10. Método para el desarrollo de unidades evaporadoras.

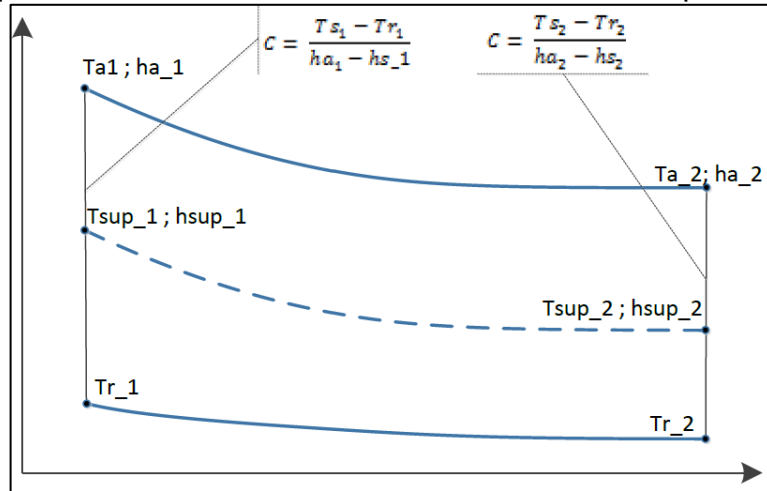
Paso	Proceso	Método.
1	Lectura de datos.	Temperatura y humedad relativa a la entrada: T_{a_1} y ϕ_1 . P_{amt} . C_{p_air} . h_{a_1} .
2	Asumir.	T_{bh_a2} (Temperatura de bulbo húmedo a la salida del evaporador).
3	Calcular.	Encontrar el valor de la entalpia del aire a la salida del evaporador h_{a_2} mediante $h_{a_2} = \text{enthalpy}(\text{airH}_2\text{O}; P = P_{atm}; T = T_{bh_a2}; r = \phi)$
4	Calor total.	Encontrar el calor total transferido. $Q_{total} = m_a * (h_{a_1} - h_{a_2})$
5	T° del refrigerante	Determinar la T° de evaporación del refrigerante en el evaporador. $T_{r1} = T_{r2}$.
6	Calcular la constante del evaporador.	Determinar la constante de la unidad manejadora a partir de la siguiente expresión. $C_{eva} = \frac{R_{mw} + R_r}{C_{p_air} * R_{aw}}$

En la demostración expresada entre las ecuaciones (3.1) y (3.9) en donde se encuentra la constante característica del evaporador, también se encontró una equivalencia que incluye a la temperaturas de superficie, temperatura del refrigerante, la entalpia del aire a la entrada y la entalpia en la superficie del evaporador.

$$C = \frac{T_s - T_r}{h_a - h_s} = \frac{R_{mw} + R_r}{R_{aw} * C_p} \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9) es una ecuación de equivalencia que se mantiene en los puntos de entrada y salida del evaporador.

Figura 49. Equivalencia de la constante característica del evaporador.



Las expresiones de equivalencia en los puntos de entrada y salida son las siguientes:

$$C = \frac{T_{s1} - T_{r1}}{h_{a1} - h_{s1}} \quad 3.23$$

$$C = \frac{T_{s2} - T_{r2}}{h_{a2} - h_{s2}} \quad (3.24)$$

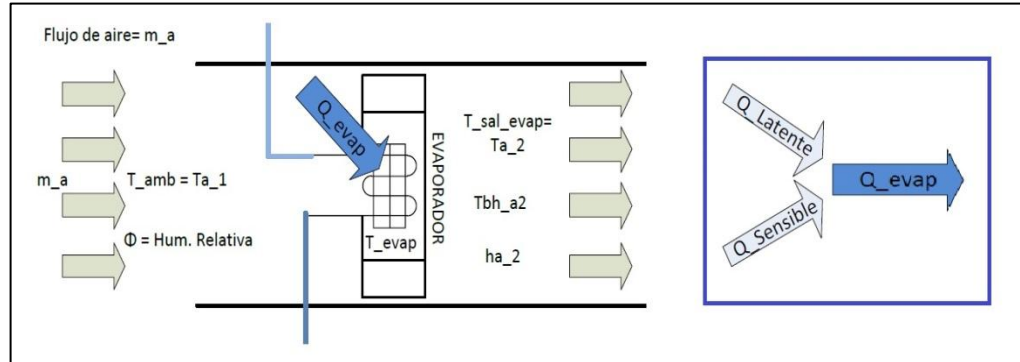
7	Asumir T°.	<p>Asumir la T° de la superficie a la entrada del evaporador Ts_1 y determinar hs_1 con: $hs_1 = \text{Enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}; T = Ts_1; P = P_{\text{atm}}; R = 1)$ El valor de Ts_1 y hs_1 le deben permitir a la ecuación (3.23) tener el mismo valor que la ecuación (3.9)</p>
8	Asumir T°.	<p>Asumir la T° de la superficie a la salida del evaporador Ts_2 y determinar hs_2 con: $hs_2 = \text{Enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}; T = Ts_2; P = P_{\text{atm}}; R = 1)$ El valor de Ts_2 y hs_2 le deben permitir a la ecuación (3.24) tener el mismo valor que la ecuación (3.9)</p>
9	Comprobación de lo asumido. Método de la entalpía media logarítmica.	<p>Para tener certeza de los valores asumidos, se debe comprobar lo asumido. El calor total que se encontró en el paso 4 debe ser igual o similar al calor que se encuentra con Q_{LMHD}.</p> $Q_{LMHD} = \frac{h_o * A_o}{C_{p_{aire}}} * LMHD$ $LMHD = \frac{ha_1 - hs_1 - (ha_2 - hs_2)}{\ln \frac{ha_1 - hs_1}{ha_2 - hs_2}}$

Es un proceso de prueba y error por el cual se encuentran los valores adecuados para que los calores coincidan. Si estos valores no coinciden, se debe repetir el proceso desde el primer paso.

10	Encontrar la T _{sat} y h _{sat} .	<p>Encontrar h_{s_sat} y T_{s_sat}. Con las siguientes expresiones se determina la h_{sat} del aire en la superficie del evaporador. Conociendo h_{s_sat} también se puede conocer T_{s_sat}.</p> $NTU = \frac{h_o * A_o}{ma * Cp_{aire}}$ $E_e = 1 - e^{-NTU}$ $E_e = \frac{ha_1 - ha_2}{ha_1 - h_{s_{sat}}}$ <p>Una vez se determina h_{sat} se puede determinar T_{s_sat}</p>
11	Calcular la T° a la salida	<p>Encontrar T_{a_2}. Con la siguiente ecuación se determina la temperatura de salida del aire.</p> $E_e = \frac{Ta_1 - Ta_2}{Ta_1 - Ts_{sat}}$

Una vez se determina el estado de salida del aire, se pueden conocer las condiciones de salida del aire, determinar la cantidad de energía transferida y encontrar el valor del flujo másico de agua que teóricamente se condensará.

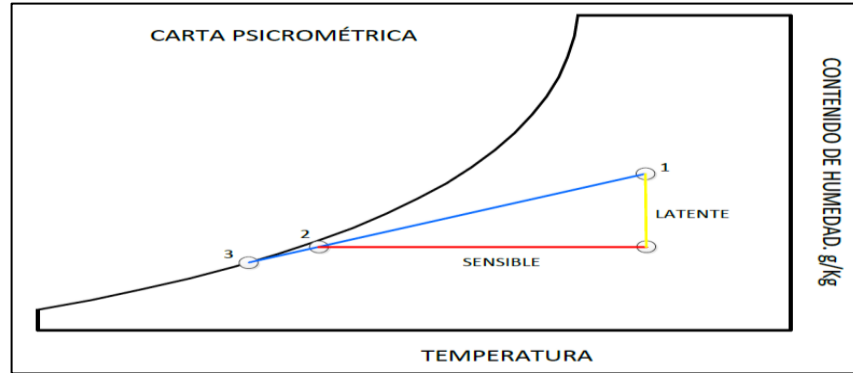
Figura 50. Cálculos en el evaporador.



12	Determinar la energía transferida.	<p>Conociendo el estado de salida del aire se puede determinar la energía total transferida.</p> $Q_{SENSIBLE} = m_a * C_{p_{aire}} * T_{a_1} - T_{a_2}$ $Q_{LATENTE} = m_a * h_{FG} * \omega_1 - \omega_2$
13	Determinar el flujo de agua que se condensa.	<p>El flujo másico de agua se determina a partir de la siguiente ecuación.</p> $Q_{LATENTE} = m_{AGUA} * h_{fg_{AGUA}}$

El calor sensible es quien cambia la temperatura en el aire y el calor latente es quien deshumidifica el aire y cambia el estado de las moléculas de agua. Por lo tanto, con el calor latente se hacen los cálculos para encontrar la cantidad de agua condensada.

Figura 51. Deshumidificación. Calor latente y calor sensible.

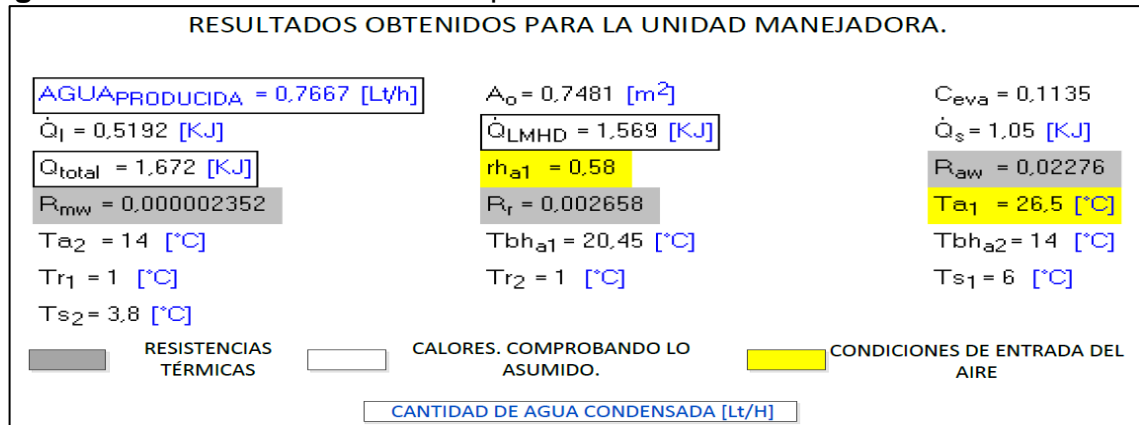


Desarrollando el método mencionado para los cálculos en una unidad evaporadora determinada, y para las condiciones atmosféricas más adversas del día se encontraron los siguientes resultados.

Condiciones de entrada.

- Evaporador con tubería de cobre tipo L, sin aletas.
- Diámetro tubería= 5/16 in; Long tubería= 30 m; Aext=0,7481 m².
- Configuración geométrica= Escalonado a 30° tal en la **figura 46**.
- Temperatura de entrada= 27° C; Humedad relativa= 58% ;
- Masa de agua a obtener 0.75 Lt/h = 2.0833*10⁻⁴ Kg de agua/seg.

Figura 52. Resultados cálculos evaporador.



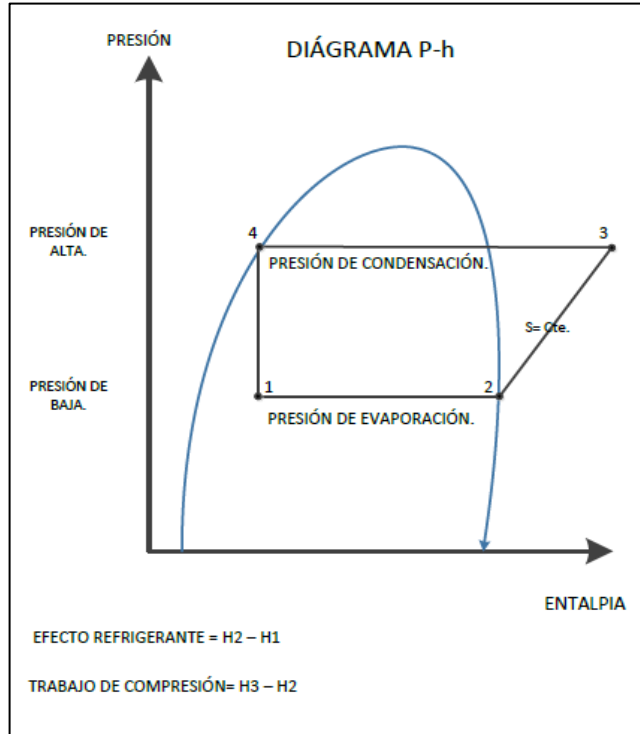
De acuerdo a los cálculos detallados para una unidad manejadora específica y las condiciones atmosféricas más adversas del día, este elemento logra condensar 0.75 litros de agua por hora. Los cálculos en detalle y el desarrollo de esta operación se pueden encontrar en el anexo D.

3.1.2 Índices energéticos del sistema productor de agua.

Los índices energéticos del sistema de refrigeración son indicadores que lo caracterizan, estos indicadores se determinan teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento del sistema.

Los principales indicadores energéticos son los siguientes: Coeficiente de comportamiento (COP), relación de eficiencia energética (EER) y relación de eficiencia energética estacional (SEER)

Figura 53. Diagrama P-h.



- **Coeficiente de comportamiento COP.**

Esta es la forma en la que se expresa la eficiencia de un sistema cíclico de refrigeración, esta eficiencia es determinada por el COP (Coefficient of performance) y tiene en cuenta el efecto refrigerante con respecto al trabajo de compresión requerido.

$$COP = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (4.25)$$

La eficiencia del sistema puede ser mayor a 1, es decir que la cantidad de calor que se elimina puede superar la entrada de trabajo requerido⁴².

⁴² CENGEL, Yunus A. ; BOLES, Michael A. Termodinámica. México: McGraw Hill, 2003. p. 291.

El diagrama P-h, **figura 53**, es la herramienta que proporciona una ayuda visual acerca del rendimiento de un sistema cíclico de refrigeración, en este se pueden ver los puntos característicos del ciclo.

En caso de no tener los valores de la entalpía en cada uno de los puntos del diagrama **P-h** se puede seguir el siguiente procedimiento para el COP de un sistema de refrigeración.

Se toma el calor, de los catálogos ofrecidos por el fabricante, que puede evacuar la unidad de compresión para una determinada temperatura de evaporación y condensación. El objetivo es encontrar el volumen físico de la unidad. Para esos valores de temperatura seleccionados se encuentra el valor de las propiedades que intervienen en las ecuaciones.

$$Q_{evacuado} = \rho_{refrigerante} * V_{fis} * \Omega * eficiencia * h_3 - h_2 \quad (3.26)$$

$$eficiencia = 1 - 0,08 * \frac{P_{cond}^{\frac{1}{n}}}{P_{evap}} - 1 \quad (3.27)$$

Ω en rad/seg.

Una vez encontrado V_{fis} se puede determinar el valor del efecto refrigerante y con ellos el COP del sistema utilizando nuevamente las ecuaciones **(3.26)** y **(3.27)**.

Para efectos de este diseño la temperatura de evaporación es de 1°C y la temperatura de condensación es de 40 °C, los resultados fueron los siguientes.

Figura 54. Cálculo del COP y EER.

COP = 2,249	EER = 1,873	eficiencia ₁ = 0,8628	eficiencia _v = 0,8868
f = 60	h ₁ = 256,7 [KJ/Kg]	h _{1v} = 258,9	h ₂ = 271,3
h ₃ = 108,3	h ₄ = 108,3 [KJ/Kg]	h _{4v} = 108,3	n = 1,21
P _{cond} = 1017 [KPa]	P _{condv} = 1017	P _{evap} = 303,8 [KPa]	P _{evapv} = 349,9
Q̇ _{ext} = 1,044	Q _o = 1,248 [KJ/Seg]	Q _{remov} = 0,8693	ρ ₁ = 14,95
ρ _{rv} = 17,14	RPM _{rad} s = 377	T _c = 40	T _{cv} = 40
T _e = 1	T _{ev} = 5	T _{sc} = 11	T _{scv} = 15
V _{fis} = 0,000001445	Ẇ _{ent} = 0,464 [W]		

- **Relación de eficiencia energética EER.**

Esta relación hace referencia al calor removido por el evaporador con respecto a la potencia eléctrica que consume el sistema, aquí se tiene en cuenta la potencia eléctrica consumida por todos los elementos eléctricos el compresor y el ventilador o ventiladores que tenga el sistema.

$$EER = \frac{\text{Calor removido}}{\text{Potencia eléctrica consumida}} \quad (3.28)$$

En la **figura 54** se encuentra el resultado del EER para el sistema de refrigeración.

- **Relación de eficiencia energética estacional SEER.**

La ecuación de esta eficiencia es similar a la ecuación (3.28), solo que en la eficiencia estacional se toma en cuenta un periodo de tiempo determinado y no se da la eficiencia para un instante.

$$SEER = \frac{\text{Calor removido en un periodo de tiempo dado.}}{\text{Potencia eléctrica consumida.}} \quad (3.29)$$

3.1.3 Variación del calor y generación de agua con respecto a la temperatura de entrada.

La temperatura de entrada, es decir la temperatura del ambiente y la humedad relativa influyen directamente en la cantidad de calor que se puede extraer del aire circulante para unas condiciones establecidas.

A continuación se presenta una serie de gráficas en donde se expone la cantidad de calor que se puede extraer y la cantidad de agua que se puede condensar con respecto a la temperatura de entrada para un valor específico de humedad relativa en el aire.

Las especificaciones son las siguientes: Variación de la temperatura de entrada, $T_{\text{vaporación}}=1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{condensación}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} , y cada variación esta para una humedad relativa específica. Se observa Q_{Total} y $AGUA_{\text{producida}}$.

Figura 55. Gráfica $AGUA_{\text{prod}}$ Vs T_{entrada} y Q_{total} Vs T_{entrada} . Para RH 90%

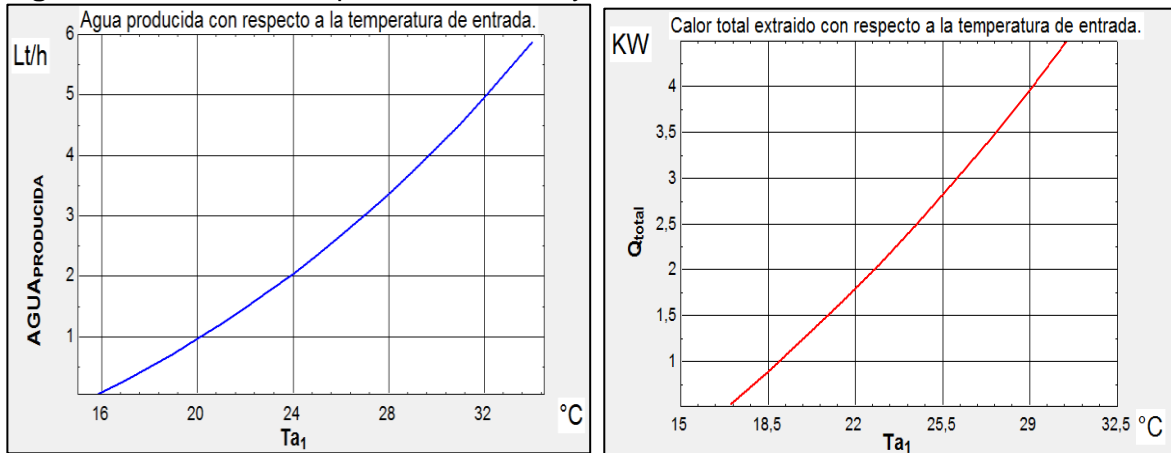


Figura 56. Gráfica AGUApod Vs Tentrada y Qtotal Vs Tentrada. Para RH 80%

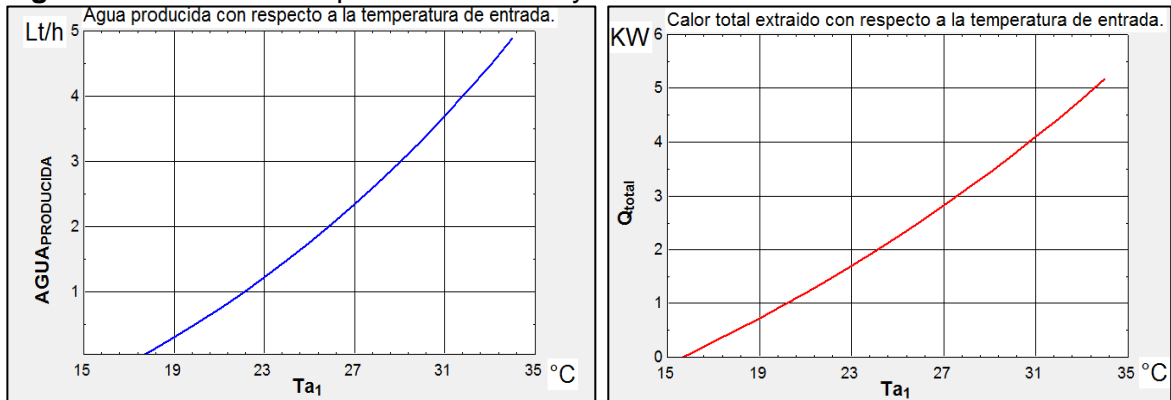
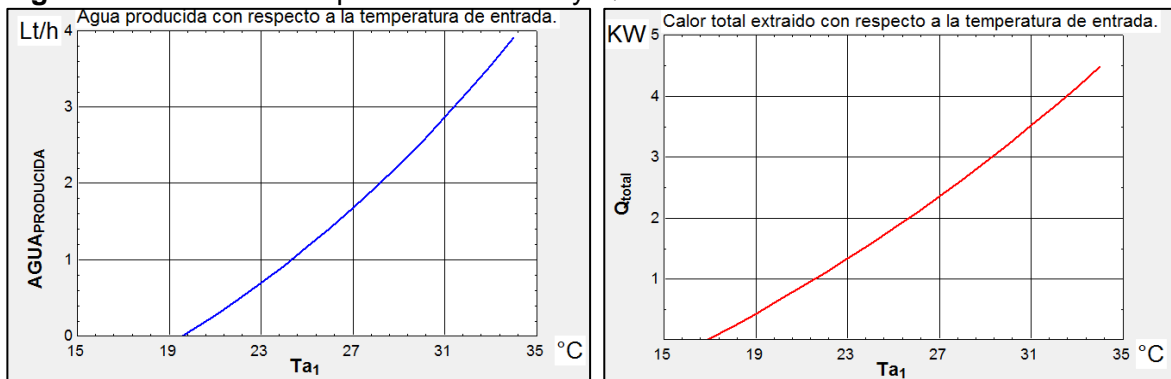


Figura 57. Gráfica AGUApod Vs Tentrada y Qtotal Vs Tentrada. Para RH 70%



En las **figuras 55, 56 y 57** se observa el comportamiento de la cantidad de calor que se puede extraer del aire y la cantidad de agua que se puede condensar teóricamente para diferentes valores de temperatura de entrada del aire al evaporador del sistema de refrigeración.

Todas exponen una conducta afín, entre mayor sea la temperatura de entrada del aire, mayor será el calor a extraer. La humedad relativa que contenga el aire influye de forma directa en la cantidad de agua que se puede obtener, entre mayor sea la humedad y menor sea la temperatura de entrada mayor condensación tendrá lugar en el evaporador. La parametrización se encuentra en el anexo D.

3.1.4 Selección de los componentes.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el diseño de la unidad manejadora, se procede a la selección de los demás componentes que hacen parte del subsistema generador de agua.

- **Selección del compresor.**

El compresor del subsistema generador de energía se selecciona en base a la carga térmica que la unidad manejadora va a recibir por parte del aire que se va a deshumidificar. El compresor debe ser capaz de proveer la refrigeración suficiente de la carga térmica absorbida por la unidad manejadora.

Carga térmica de la unidad manejadora= 1572 (W) @Tc:40°C y Tev: 1°C

Se seleccionó un compresor de referencia **AE4440Y-AA1A** de la marca Tecumseh, manufacturado en Brasil. Las especificaciones del compresor se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 11. Especificaciones del compresor.

Concepto	Especificación.
Rango de refrigeración.	343 (W) @Tc:40°C y Tev:-25°C y 1848 (W) @Tc:40°C y Tev: 15°C.
Potencia Nominal.	1/3 HP
Refrigerante.	R 134 ^a
Tensión.	115V 1 ~ 60 Hz.
Especificación del motor.	HST (High Starting Torque)
Especificación de refrigeración.	HBP (High Back Pressure)

- **Selección del condensador.**

El condensador seleccionado debe poder extraer el calor que el refrigerante absorbió a través del evaporador y de la energía en forma de trabajo que introdujo el compresor.

El condensador se selecciona de acuerdo a la referencia del compresor y a la potencia frigorífica nominal del mismo, para este caso el compresor de referencia **AE4440Y-AA1A** y de potencia nominal 1/3 HP, de acuerdo a esta característica se debe seleccionar el condensador. Condensador seleccionado de 1/3 HP.

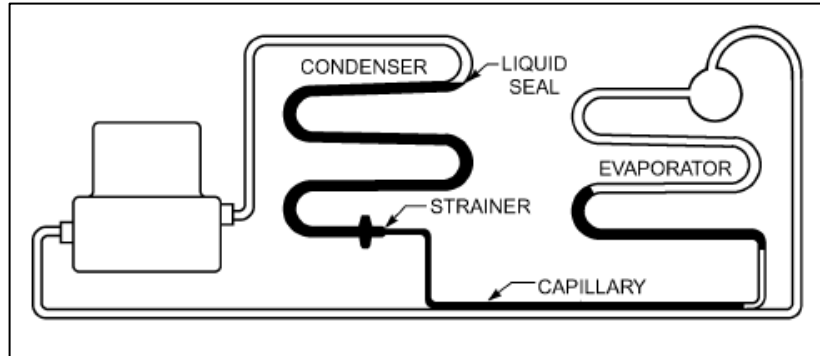
Es un intercambiador con tubos paralelos de cobre rectos y aletas de aluminio unidas al tubo, sus dimensiones 30x28x11 cm. Estos intercambiadores permiten gran variedad de configuraciones en el largo, ancho y alto, haciéndolos adaptables para cualquier tipo de aplicación (HBP, MBP y LBP).

- **Selección del tubo capilar.**

El paso de fluido refrigerante a través del tubo capilar depende del ΔP (Presión en el condensador – Presión en el evaporador) y una característica física del tubo capilar. A menor ΔP , menor será el flujo de fluido a través del tubo capilar. Se pueden producir dos fenómenos dentro del evaporador si el tubo capilar no tiene la longitud adecuada.

Si es largo, el costo por pasar a través del capilar será alto, el flujo de refrigerante en estado líquido a través del evaporador no será el suficiente para llenarlo completamente y por tanto habrá cierta parte del evaporador con refrigerante evaporado, en otras palabras, el evaporador tendrá una parte seca como se muestra en la siguiente imagen.

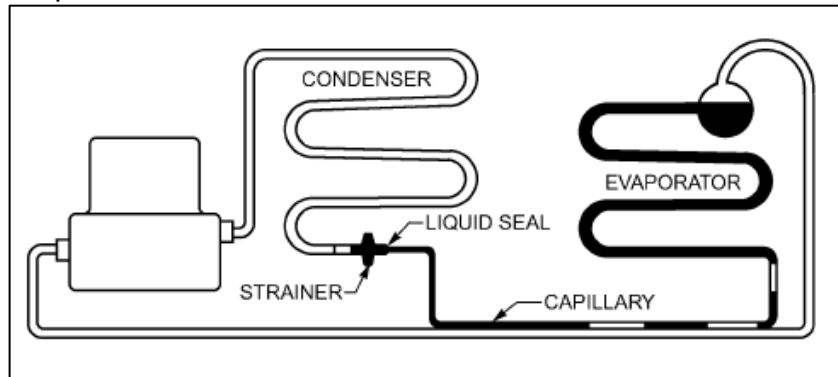
Figura 58. Evaporador seco.



Fuente: Ashrae Handbook, Chapter 44, Dispositivos de control de refrigerante, tubos capilares.

Si el tubo capilar es corto, la diferencia de presión entre la zona de alta y baja será lo suficiente para sobre alimentar el evaporador, si el refrigerante sale en estado líquido del evaporador se pueden originar graves consecuencias para el compresor, ya que este elemento solo debe comprimir únicamente refrigerante en estado de vapor sobrecalentado.

Figura 59. Evaporador sobre alimentado.

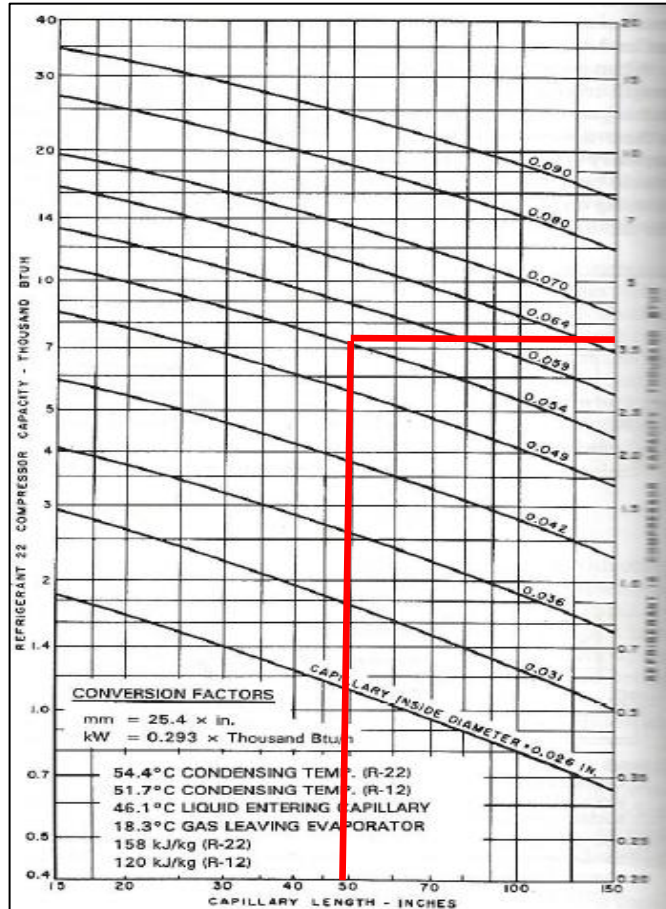


Fuente: Ashrae Handbook, Chapter 44, Dispositivos de control de refrigerante, tubos capilares.

La longitud correcta del tubo capilar se determina en función de la carga de calor que el evaporador absorbe y el diámetro seleccionado del capilar.

Carga evaporador = 1200 W = 4094 Btu h ; Diametro tubo capilar = 0,054 in

Figura 60. Selección del tubo capilar.



Fuente: Ashrae HandBook, Chapter 44, Dispositivos de control de refrigerante, tubos capilares.

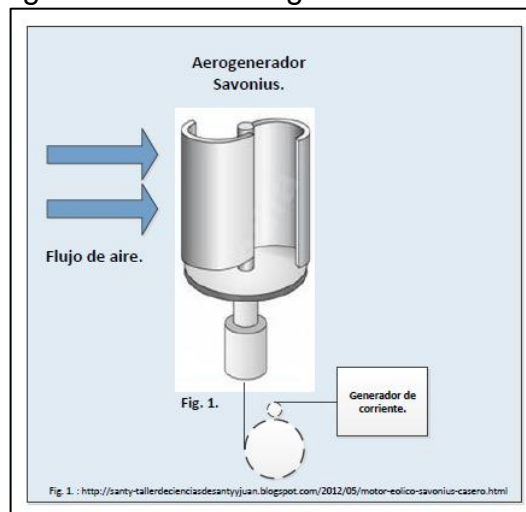
Para los datos de diseño (40 °C en el condensador) la longitud del tubo capilar es de 50 pulg o 130 Cm, pero la gráfica presentada por la ASHRAE esta para diferentes condiciones de funcionamiento 51,7 °C en el condensador, por lo tanto la longitud del tubo debe ser menor o igual a 130 Cm.

3.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.

Este subsistema se encarga de generar parte de la corriente eléctrica que utiliza el subsistema productor de agua. Mediante el rotor del conjunto, el aerogenerador extrae un porcentaje de la energía cinética que llevan las corrientes de aire, se genera un movimiento rotacional que mueve un alternador de corriente que genera la corriente eléctrica. El proceso de diseño se presenta de la siguiente manera:

- Dimensionamiento del rotor.
- Diseño del eje del aerogenerador.
- Selección de rodamientos.
- Distancia entre centros de las poleas.

Figura 61. Subsistema generador de energía.



3.2.1 Dimensionamiento del rotor.

Para encontrar las dimensiones que debe tener el rotor del aerogenerador tipo savonius, se realizó una tabla en donde se encuentra el potencial energético disponible del día.

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir un aerogenerador que pueda entregar una potencia de 100 W, sin embargo, el aerogenerador se va a diseñar

de acuerdo al mejor aprovechamiento del potencial energético y que permita la construcción de un aerogenerador que se encuentre en un rango económicamente aceptable. Lo anterior con el fin de suministrar la mayor cantidad de energía eléctrica al generador de agua, ya que su consumo total es superior a este valor.

El promedio de la energía disponible del viento fue de **1408,11W**. Las tablas con los valores se pueden ver en el anexo B.

$$P_{eólicadisponible} = 1408,11 W \quad (3.30)$$

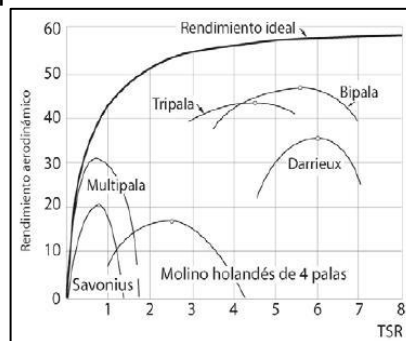
$$\frac{P_{eje}}{A_{barrido}} = Cp * \frac{1}{2} * \rho * V^3 \quad (3.31)$$

$$\frac{P_{eje}}{A_{barrido}} = Cp * P_{eólicadisponible} \quad (3.32)$$

En donde $Cp = 0,21$; Coeficiente de potencia de este tipo de turbina. Ver figura 62.

$$\frac{P_{eje}}{A_{barrido}} = 0,21 * 1408,11 \frac{W}{m^2} \quad (3.33)$$

Figura 62. Coeficiente de potencia en turbinas eólicas.



$$\frac{P_{eje}}{A_{barrido}} = 295,7 \frac{W}{m^2} \quad (3.34)$$

$$P_{alternador} = \eta_{global} * \frac{P_{eje}}{A_{barrido}} \quad (3.35)$$

$$Eficiencia\ global\ \eta_{global} = 0,95$$

$$\eta_{global} = \eta_{mecanica} * \eta_{electrica} ; \eta_{mecanica} = 0,97 ; \eta_{electrica} = 0,98$$

$$\frac{P_{alternador}}{A_{barrido}} = 0,95 * 295,7 = 280,92 \frac{W}{m^2} \quad (3.36)$$

Figura 63. Densidad de la potencia eólica disponible.

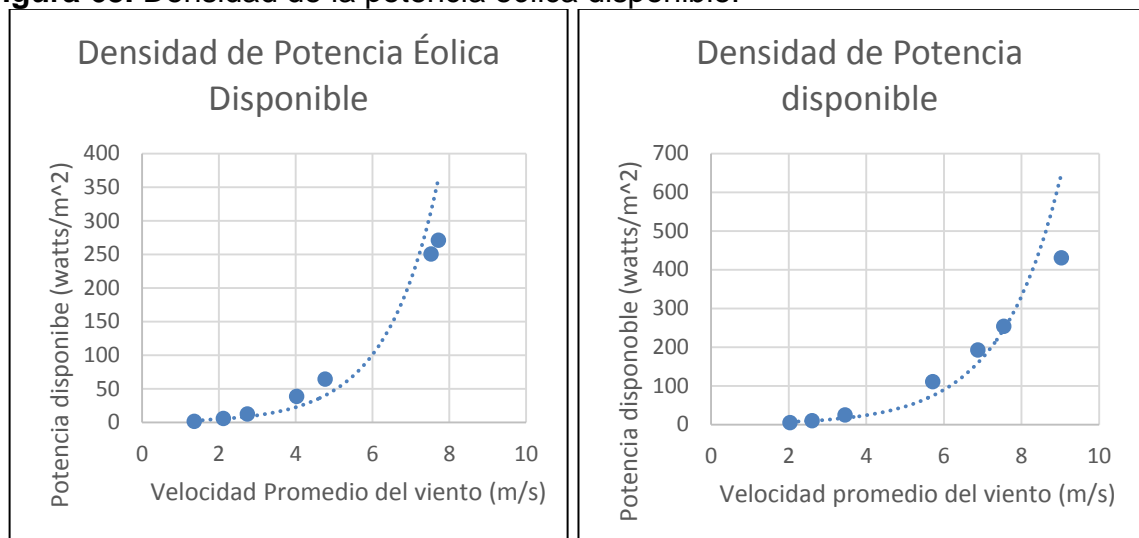


Tabla 12. Determinando el área del aerogenerador.

<i>Prueba de ensayo y error para encontrar el Área adecuada</i>				
Pot_viento/A (Watt/m ²)	A (m ²)	Pot_viento (Watt)	Pot_eje (Watt)	Pot_alter (Watt)
1408,11	1	1408,11	295,7031	272,046852
1408,11	1,5	2112,165	443,55465	408,070278
1408,11	2	2816,22	591,4062	544,093704
1408,11	2,5	3520,275	739,25775	680,11713
1408,11	3	4224,33	887,1093	816,140556
1408,11	3,5	4928,385	1034,96085	952,163982

Un área en el barrido del aerogenerador que se encuentra dentro de un rango para su construcción económicamente aceptable son 2 m².

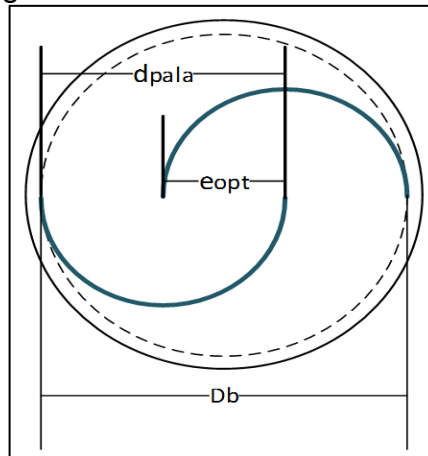
Por lo tanto, la potencia teóricamente aceptada es la indicada en la tabla 10.

Una vez determinada el área de barrido se busca la configuración geométrica óptima para un mejor rendimiento en el rotor del aerogenerador.

$$A_{barrido} = h_{rotor} * D_{rotor} = 2 \text{ m}^2 \quad (3.37)$$

$$h_{rotor} = 2 \text{ m} \quad ; D_b = D_{rotor} = 1 \text{ m}$$

Figura 64. Configuración geométrica del rotor.



$$h_{rotor} = 2 * D_{rotor} \quad (3.38)$$

$$D_{rotor} = 2 * d_{pala} - e_{opt} \quad (3.39)$$

$$e_{opt} = \text{excentricidad optima} = \frac{d_{pala}}{6} \quad (3.40)$$

Remplazando (3.40) en (3.39).

$$D_{rotor} = d_{pala} * 2 - \frac{1}{6}$$

$$d_{pala} = 0,5455 \text{ m} \quad ; \quad e_{opt} = 0,0909 \text{ m}$$

3.2.2 Diseño del eje del aerogenerador.

Esta pieza mecánica facilita el montaje de elementos mecánicos de transmisión de potencia, en este se montan engranajes, poleas, volantes entre otros. Además permiten soportar cargas sometidas a flexión, tensión, compresión o torsión que actúan sobre este siendo estas las consideraciones más importantes para el diseño y el comportamiento del eje.

Un aspecto importante a tener en cuenta en el montaje de los elementos de transmisión, es colocarlos convenientemente cerca de los cojinetes de soporte para reducir los momentos flexionantes, y en consecuencia la deflexión y el esfuerzo por flexión⁴³.

Para determinar el diseño del eje, se han aplicado criterios de fatiga y teorías de falla, un procedimiento desarrollado por el libro "*Fundamentos de elementos de Máquinas de Bernand Hamrock*". y la *Guía de Fatiga del profesor Alfredo Parada*.

El procedimiento se da a continuación.

- Se realiza un diagrama de cuerpo libre, se remplazan los diversos elementos de transmisión en el eje por sus cargas estáticamente equivalentes o componentes de torsión. En este caso los componentes de torsión están representados por el juego de poleas que transmiten el movimiento de rotación.

⁴³ Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley Cuarta Edición.

- Se dibujan los diagramas de momentos flexionantes, en los planos x-y y x-z, y el momento resultante a lo largo del eje, ese momento está dado por la siguiente ecuación.

$$M_x = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2} \quad (3.37)$$

- Se desarrolla un diagrama de los pares de torsión, en este caso estará transmitido directamente por el rotor del aerogenerador hacia el eje del mismo.
- Se identifica la sección más crítica o la localización x donde, el par de torsión y el momento flector son mayores.
- Para materiales dúctiles se usa la teoría del esfuerzo cortante máximo o la teoría de la energía de distorsión.

El aerogenerador es tipo Savonius, el eje de su rotor es vertical, los álabes del rotor están anclados a láminas de aluminio en forma de disco, estos dos elementos (alabes y discos) están unidos mediante remaches. El rotor y el eje se unen con una placa de aluminio, la placa se enrosca con el eje y se une a los discos del rotor mediante pernos.

De acuerdo al ensamble el eje requerido tiene una longitud de 250 [mm] aproximadamente, este eje estará soportado por dos apoyos tipo FY (J) cuadrados con cuatro orificios para los tornillos, cuya separación es de 164 [mm] entre rodamientos. Además la masa del rotor que se asume es de 60[kg], y produce una carga axial sobre el eje cuya magnitud es de 589 [N].

A continuación se muestran los diagramas para los planos X-Y y X-Z.

Figura 65. Diagrama de Cortante y Momento Flector, plano X-Y

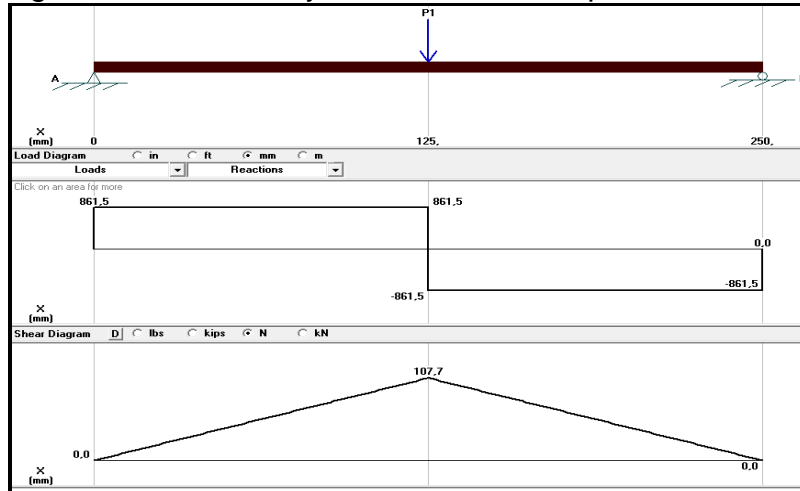


Figura 66. Diagrama de Torque y Fuerza axial. Plano X-Z

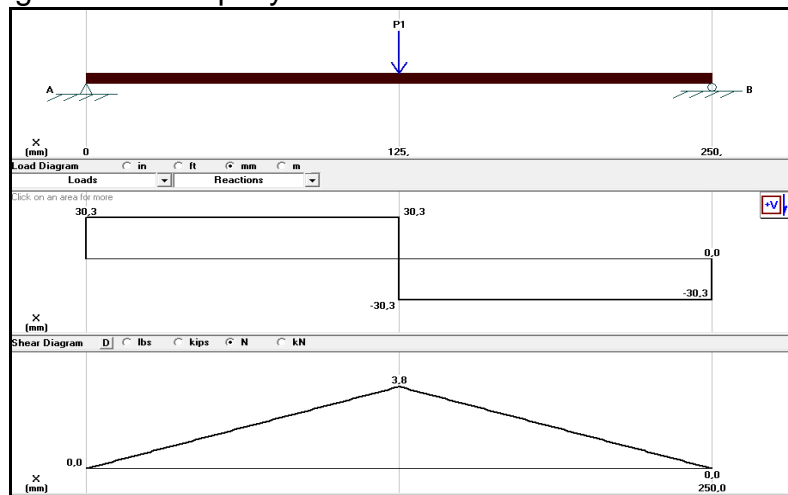
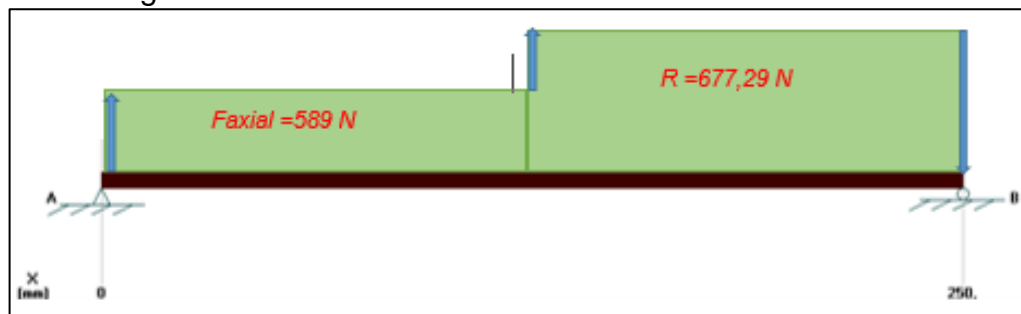


Figura 67. Diagrama de fuerza axial.



Para efectos de diseño del eje, se debe determinar el torque que se produce en el eje del aerogenerador producto de la presión que ejerce el viento sobre los alabes del rotor.

La ecuación que determina la presión en los alabes es la siguiente.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad ; \quad P = 204 \text{ Pa} \quad (3.38)$$

En donde:

ρ = Densidad del aire. [Kg/m³].

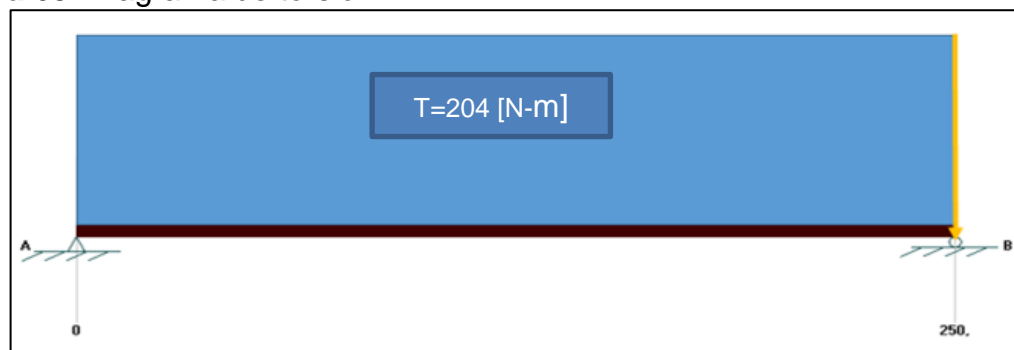
v = Velocidad del viento. [m/seg]

$$\text{Torque} = P * A * R \quad (3.39)$$

$$\text{Torque} = \frac{1}{2} * 1,02 * 20^2 * 2 * 0,5$$

$$\text{Torque} = 204 \text{ [N * m]}$$

Figura 68. Diagrama de torsión.



Los valores de torque y carga axial para los diferentes puntos del eje **A, B y C** se toman de los anteriores diagramas mostrados en las figuras. En el análisis cabe aclarar que el eje es vertical, pero con el fin de tener mayor claridad se hace un estudio asumiendo que el eje estuviera horizontal. En la siguiente tabla se resumen los valores para los puntos de análisis.

Tabla 13. Valores de los puntos de análisis.

PUNTO	TORQUE [N-m]	CARGA AXIAL [N]
A	204	589
B	204	677,29
C	204	98,29

Para el cálculo del diámetro requerido en el eje del aerogenerador se recurre al método del criterio de la teoría de falla de *Soderberg*, *máximo esfuerzo cortante*, con un factor de seguridad de 4. El torque es constante y no hay ningún momento aplicado al eje, quedando la carga totalmente reversible.

$$\frac{1}{N} = \frac{\sigma_m}{S_y} + \frac{k_f * \sigma_a}{S_e}^2 + 4 * \frac{\tau_m}{S_y} + \frac{k_{fs} * \tau_a}{S_{es}}^2 \quad (3.40)$$

En donde:

$$\sigma_a = \sigma_{max} ; \quad \sigma_m = 0 ; \quad \tau_a = 0 ; \tau_m = \tau_{max} \quad \tau_m = \frac{16 * T}{\pi * D_{req}^3} \quad \sigma_a = \frac{32 * M}{\pi * D_{req}^3}$$

σ_m : *esfuerzo normal medio*; σ_a : *esfuerzo normal alterno*; τ_m : *esfuerzo cortante medio*;
 τ_a : *esfuerzo cortante alterno* ; S_y : *Resistencia a la fluencia*; S_e : *Resist a la fluencia modificado*
 k_{fs} : *fact de concent de esfuerzo por fatiga* ; k_f : *fact de concent de esfuerzo modificado*
 D_{req} : *Diametro requerido [m]*; T : *Torque aplicado en la zona de estudio [N]*
 M : *Momento aplicado en la zona de estudio [N – m]*

No hay ningún momento aplicado, por lo tanto se procede a calcular el diámetro del eje, mediante la teoría de falla.

$$M = 0 \qquad T = 204 [N - m]$$

$$\frac{1}{N} = 4 * \frac{16 * T}{\pi * D_{req}^3 * S_y} \quad (3.41)$$

$$D_{req} = 0,02716 \text{ m} \approx 25 [mm]$$

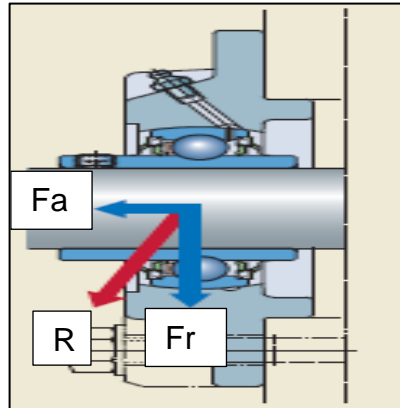
3.2.3 Selección de rodamientos.

Para la selección de los rodamientos, se utilizan diseños con unidades de rodamientos FAG de configuración tipo S ó FJ (Y) SKF, estos constan de rodamientos rígido de bolas con superficie exterior esférica, obturado a ambos lados y de un soporte de fundición gris o de chapa de acero estampada⁴⁴. El cálculo de la carga dinámica y estática equivalente se realiza de la misma manera que los rodamientos rígido de bola.

Debido al diseño de eje vertical del aerogenerador Savonius, los rodamientos deben soportan cargas axiales, a pesar de que la mayoría de los rodamientos no son diseñados para soportar cargas axiales, un nuevo diseño de los mismos con un aro interior que produce una resistencia le permite a los rodamientos soportar cargas axiales. Para ayudar en el soporte de la carga axial, se dispondrá de tres rodamientos similares ubicados en partes diferentes del montaje. La carga axial corresponde al peso de la polea y el rotor, el valor total de la carga 677 N.

⁴⁴ PDF, Catálogo WL 41 520/3 SB de FAG, Unidades de rodamiento tipo S, pág. 511

Figura 69. Cargas en los soportes de brida



Fuente: *Catálogo de rodamientos de NTN*

Cuando se transfiere la potencia mediante correas, se genera una fuerza radial producto de esta transmisión, este movimiento genera una tensión inicial aplicada la cual es una tensión de trabajo constante. Este tipo de cargas radiales que actúan sobre la polea se pueden determinar por la ecuación:

$$K_t = \frac{19,1 \cdot 10^6 \cdot H}{D_p \cdot N} \quad (3.42)$$

En donde:

K_t : Carga tangencial de la polea [N]; H : Potencia transmitida [kW].

D_p : Diámetro de la polea [mm]; N : velocidad de rotación del rotor [r.p.m].

El diámetro de la polea es de 510 mm, y transmite una potencia útil de 1,2 kW y una velocidad de rotación de 160 RPM, el resultado obtenido es el siguiente:

$$K_t = 281 \text{ [N]}$$

Además de la carga tangencial:

$$K_r = f_b \cdot K_t \quad (3.43)$$

En donde:

K_r : Carga radial de la polea [N].; f_b : Factor de Correa.

El factor por correa f_b se puede determinar de la siguiente figura.

Figura 70. Factor de transmisión por correa.

Factor de correa o cadena	f_b
Cadena (sencilla)	1.2~1.5
Correa en V	1.5~2.0
Correa de tiempo	1.1~1.3
Correa Plana (con polea tensora)	2.5~3.0
Correa Plana	3.0~4.0

Fuente: Catalogo de rodamientos de la NTN.

Factor de carga para de un sistema de transmisión por correas tiene un diseño de poleas tipo A en V, entonces, se toma factor de carga de 1,7 teniendo como valor:

$$K_r = 478 [N]$$

Se establecen las condiciones de operación del eje para un ciclo de 30000 horas y un factor de vida de 160 RPM.

$$fh = 3,8 \quad ; \quad fn = 0,65$$

$$fh = fn * \frac{C_D}{P} \quad (3.44)$$

En donde:

fh : Factor de vida⁴⁵ ; fn : Factor de velocidad ; C_D : Carga dinamica equivalente

⁴⁵ Tomado de Escala para el cálculo de la vida nominal básica de los rodamientos, *Catalogo de rodamiento NTN*.

El valor de la carga dinámica equivalente mediante la relación entre la fuerza axial y la carga radial producto de la pretensión de las poleas se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = XFr + YFa \quad (3.45)$$

En donde:

P : carga dinámica equivalente N ; X : Factor de carga radial; Y : Factor de carga axial

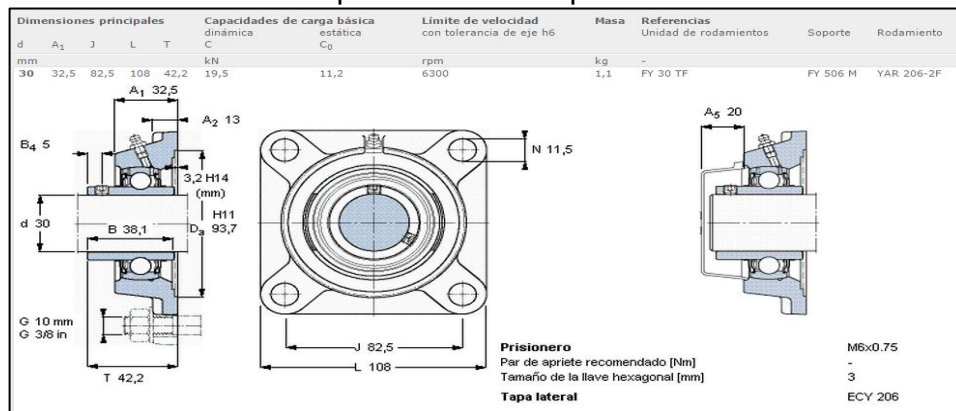
$$P = 1154 [N]$$

Por lo tanto la carga dinámica equivalente se calcula y se selecciona el soporte de brida que debe instalarse en el eje.

$$C_D = 6746 [N]$$

Se normaliza el diámetro del eje con el rodamiento seleccionado por lo tanto las dimensiones son las siguientes:

Figura 71. Dimensiones del soporte de brida Tipo FY.



Fuente: Disponible en: www.skf.com

Se selecciona un rodamiento, tipo FY de 30 [mm] de diámetro con una capacidad de carga dinámica de 19,5 [kN]. La cual se encuentra por encima de los requerimientos del sistema.

3.2.4 Distancia entre centros de las poleas.

Para disminuir las pérdidas en la transmisión de potencia, se realiza un análisis de diseño, tomado bajo el criterio del libro de Diseño de Máquinas I de Hernán Rojas, para que cumpla los requerimientos de la distancia entre centros. El cual se determina con la siguiente ecuación.

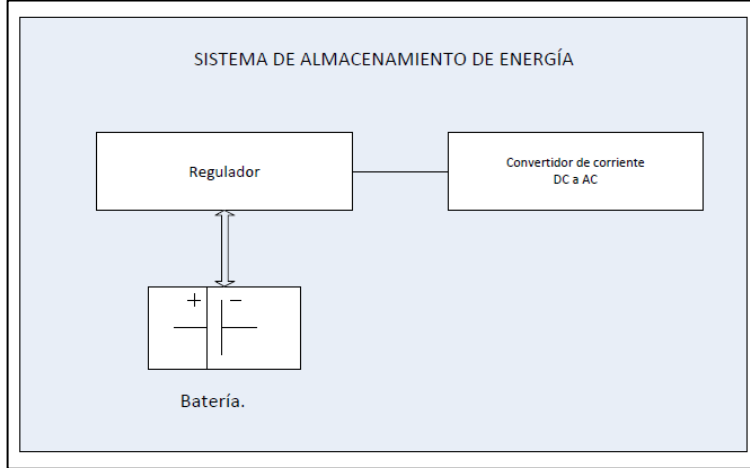
$$1,0 \text{ y } 1,5 * D_2 < C_{centro} < 2 * D_1 + D_2 \quad (3.46)$$

El diámetro de la polea grande ($D_{2 \text{ conductora}}$) es de 60,96 cm y la polea pequeña ($D_{1 \text{ conducción}}$) es de 4 cm. Esta condición del valor de la distancia entre centros la consideramos de 122 [cm], debido a que se encuentra dentro del rango y brinda una mayor sujeción entre las poleas, lo que permite una menor pérdida en la transmisión de la potencia.

3.3 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

Este elemento se encarga del almacenamiento, regulación y conversión de la energía eléctrica del todo el prototipo. Se compone de tres elementos: Regulador o controlador, batería y el inversor de corriente (DC – AC). En la siguiente imagen se observan los componentes. A continuación se presenta la selección de estos tres elementos.

Figura 72. Sistema de almacenamiento de energía.



3.3.1 Batería

En caso de que el deshumidificador y el aerogenerador no funcionen al mismo tiempo, la batería del prototipo debe poder almacenar toda la energía eléctrica y entregarla cuando sea requerido. En la siguiente tabla se observan los amperios hora totales que la batería debe almacenar.

$$I = \frac{P}{V} \quad P = \text{Potencia}; V = \text{Voltaje}; \quad (3.47)$$

Tabla 14. Energía aproximada que debe almacenar la batería.

Elemento	Pot [W]	Voltaje [V]	Amp-H	T [hora]	Pot [W]	Corriente [Amp-h]
Compresor	459	110	4.2	3,2	1468	13,44
Ventilador	14	110	0.2	3,2	44,8	0,64
Total					1512,8	14,08

De acuerdo a la tabla anterior, la batería seleccionada para el almacenamiento de la energía es de la marca **MTEK**, con capacidad para almacenar 105 amperios hora. La referencia es **MT121050** y trabaja con 12V. Sus dimensiones son 33 mm de largo, 171 mm de ancho y 214 mm altura. Tiene un peso aproximado de 32

Kg. El rango de temperaturas en las cuales puede trabajar esta entre -15°C y 50°C . Puede recibir una corriente máxima de carga de 30 amperios.

3.3.2 Controlador.

Los controladores vienen limitados por un máximo de corriente a la que le permiten el paso, para este caso, el controlador debe tener el límite de corriente a la que le permiten el paso en un valor superior 4.4 Amp.

Debido a la anterior especificación el control de corriente que entra y sale de la batería está a cargo de un **Intelligent DC-DC** de referencia **SC-15A**, recibe y entrega la corriente en estado continuo y puede modificarse para recibirla y entregarla en 12 o 24 V. Como se mencionó, el paso de corriente máxima que permite el controlador no debe ser inferior a la corriente que puede entregar el alternador, por esta razón el controlador seleccionado permite una circulación de 15 amperios hora.

3.3.3 Inversor de corriente.

De la misma manera que en los controladores, los inversores (**DC a AC**) tienen un límite máximo de potencia y por tanto de corriente a la cual le cambian el estado. En este caso, el inversor debe tener su límite por encima de 473 W.

Para cambiar el estado de la corriente de continua a alterna, se seleccionó un inversor de marca **Cobra** de referencia [**CPI 480**], recibe la corriente en estado continuo a 12V y sale en estado alterno a 110V con una frecuencia de 60Hz.

4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

En este capítulo se mostrará el proceso de ensamble y construcción del prototipo en el siguiente orden.

- Subsistema generador de agua por deshumidificación de aire.
- Subsistema generador de energía.
- Subsistema de almacenamiento de energía.

4.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA POR DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE.

Los procesos que se describen en esta sección y que corresponden al montaje, soldadura y a la fabricación del generador de agua por deshumidificación del aire son los siguientes:

- Fabricación e instalación de los componentes.
- Unión de los elementos del deshumidificador.
- Prueba de barrido.
- Vacío del circuito.
- Carga del refrigerante.
- Prueba piloto.
- Estado final del deshumidificador de aire.

4.1.1 Fabricación e instalación de los componentes.

- **Fabricación del evaporador:** Se fabricó un intercambiador de calor hecho completamente de cobre, la causa primordial de esta decisión es que todo el flujo

de aire que cruce por el intercambiador tenga contacto con un material que permita una mayor rapidez en la transferencia de la energía. La conductividad térmica del aluminio es 237 [W/m*°C] mientras que la conductividad del cobre es 401 [W/m*°C], es decir, la conductividad térmica del cobre es 1.7 veces más grande en comparación con la conductividad térmica del aluminio.

El uso de aletas pone en juego una eficiencia en la transferencia de energía, por esta razón el intercambiador solo consta de tubos de cobre con un diámetro nominal de 5/16" en donde se procuró al máximo cumplir con las especificaciones geométricas de la unidad. El intercambiador se fabricó con tubería de cobre tipo L, especial para el transporte de fluidos en sistemas de refrigeración. Para su fabricación se utilizaron dos chipas (15 metros) de tubería con un diámetro de 5/16", el área aproximada de transferencia es de 0.75 m².

Figura 73. Evaporador del deshumidificador.



- **Compresor:** El compresor seleccionado de referencia **AE4440Y-AA1A** de la marca Tecumseh, manufacturado en Brasil se instaló en la parte inferior de la estructura. Se atornilló a la base y fueron instaladas incorporadas unas almohadillas de caucho para absorber y minimizar el ruido por vibraciones

generada por el funcionamiento del compresor. La temperatura de evaporación es de 1° C, por lo tanto se seleccionó un compresor de alta (HBP). El elemento de control es un tubo capilar, de modo que no se tuvo en cuenta la clasificación del motor para arranques que requieren alto o bajo torque.

Figura 74. Compresor seleccionado.



- **Condensador:** El condensador seleccionado debe poder extraer el calor que el refrigerante absorbió a través del evaporador y del compresor.

Es un intercambiador con tubos paralelos de cobre rectos y aletas de aluminio unidas al tubo, sus dimensiones 30x28x11 cm. Estos intercambiadores permiten gran variedad de configuraciones en el largo, ancho y alto, haciéndolos adaptables para cualquier tipo de aplicación (HBP, MBP y LBP).

De igual manera y con el objetivo de que la transferencia sea más eficiente se instaló un ventilador de marca **ELCO**, de 1500 RPM con una capacidad de extracción de 250 m³/hora.

Figura 75. Condensador y ventilador seleccionado.



- **Filtro secador:** A pesar del buen procedimiento en el vacío del sistema, se ensambló un filtro secador de mejor calidad que el filtro universal. El filtro secador ensamblado previene los daños por humedad dentro del circuito, atrapa con mayor eficacia la humedad que pueda contener el sistema, fabricado por **Refri Andinos** y de referencia 145, es un secador hecho a base de sílica gel que cuida principalmente el compresor instalado. En la **figura 76** se observa el filtro instalado.

Figura 76. Filtro secador.



- **Elemento de control:** En el elemento de control se instaló un tubo capilar con 0,054 in de diámetro y con una longitud de 1,3 m, este se conectó a la tubería que sale del filtro secador y a la tubería de entrada en el evaporador. En la **figura 77** se observa el tubo capilar instalado.

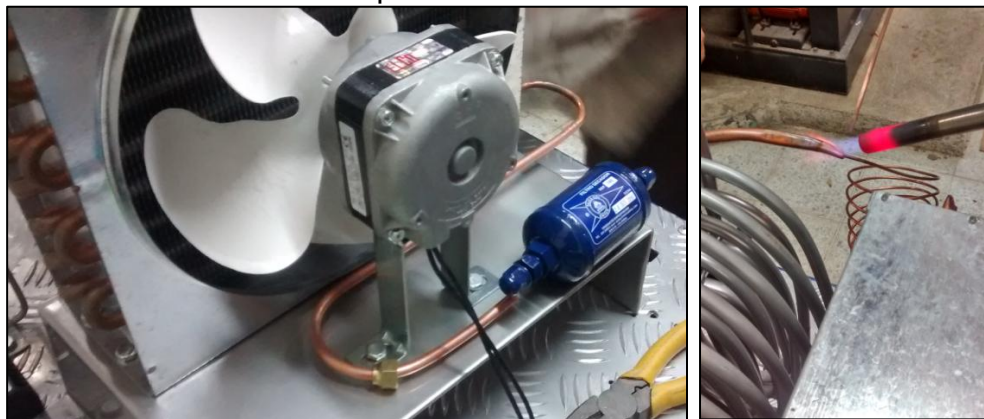
Figura 77. Tubo capilar.

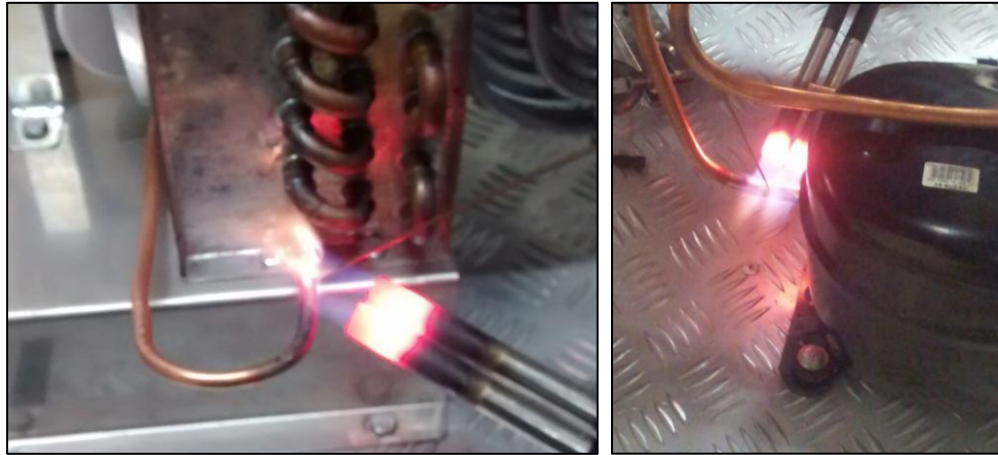


4.1.2 Unión de los elementos del deshumidificador.

Una vez se anclaron los componentes del deshumidificador en el banco de presentación, el siguiente paso fue soldar la tubería para hacer la conexión entre todos los componentes. El diámetro de la tubería de cobre utilizada para la conexión del compresor y condensador fue de 5/16", ese mismo diámetro se utilizó para las conexiones entre condensador-filtro secador y filtro secador-tubo capilar. Y el diámetro de la tubería de cobre de descarga, es decir, evaporador-compresor fue de 3/8".

Figura 78. Soldadura de los componentes.





- Procedimiento de soldadura:** Se lijaron los tubos de cobre en las partes de unión de los tubos donde se iba a aplicar la soldadura con el fin de eliminar el óxido, grasa o particular no deseadas y que pudieran afectar el procedimiento de soldadura o que ingresaran a la tubería. Con una antorcha de gas, fuente de calor que genera temperaturas entre 200° y 260 °C, se calentaron los extremos de la tubería y el fundente, una vez hecho esto se embarro el mismo en la unión cerrando cualquier abertura y evitando cualquier posible fuga. Cuando finalizó el procedimiento, se pasó un paño muy húmedo por el área de trabajo con el fin de evitar fracturas en el fundente recién aplicado.

Figura 79. Tubería utilizada para la conexión de los elementos.

Sección.	Material Tubería	Diámetro de la tubería.
Compresor- Condensador	Cobre	5/16"
Condensador- Filtro Secador	Cobre	5/16"
Filtro secador – Elemento de control	Cobre	5/16"
Elemento de control - evaporador	Cobre	0.054"
Evaporador- compresor.	Cobre	3/8"

4.1.3 Prueba de barrido.

El barrido es una inspección que debe hacerse a las tuberías antes de sellarse completamente. El fin de este procedimiento es encontrar cualquier obstrucción dentro del circuito por donde va a circular el fluido refrigerante, para encontrar cualquier falla se permite la circulación de aire comprimido y se verifica que por los tubos sin soldar salga el fluido que se está haciendo circular.

En este caso, el barrido se hizo permitiendo la circulación de fluido refrigerante debido a la carencia de una pipeta con aire comprimido, forma correcta de hacer el barrido.

En el procedimiento se comprobó que el circuito no presentaba ninguna obstrucción y que por los dos extremos el fluido circulaba sin problemas. El fluido refrigerante que se utilizó para el barrido fue extraído mediante el procedimiento de vacío que se realizó seguidamente.

4.1.4 Vacío del circuito.

Este es uno de los procedimientos más importantes cuando se está construyendo un sistema de refrigeración. La eliminación de humedad y gases no condensables permiten alargar la vida de los componentes, prevenir erosiones, formación de ácidos y aumento de presiones no requeridas. Cuando se utiliza una bomba de vacío, la presión dentro de la tubería se reduce provocando la evaporación de la humedad que se encuentra en el aire, esta humedad y componentes no deseados se extraen a través de la bomba. La deshidratación dentro del sistema se realizó durante 40 minutos, se recomienda hacer esta operación durante 30 minutos. La bomba de vacío se conecta a la válvula de carga de la unidad de compresión,

todos los gases que no pertenezcan al sistema serán retirados a través de esta válvula.

Figura 80. Procedimiento de vacío.



4.1.5 Carga del refrigerante.

La carga del refrigerante se realizó una vez se terminó el procedimiento de vacío que se le hizo a la tubería del sistema de refrigeración. Por medio de la válvula de carga del compresor se hizo la carga del gas refrigerante R-134a.

La conexión para hacer el procedimiento se hace de manera similar, se desconecta la bomba de vacío y se conectan los cilindros con la carga del gas refrigerante, con el manómetro se controla la presión de carga.

Figura 81. Carga del gas refrigerante.



Como se carece de elementos precisos para saber la cantidad exacta de refrigerante que debió introducirse al sistema, con el deshumidificador en funcionamiento se fue cargando en cantidades pequeñas el gas refrigerante hasta llegar a la temperatura deseada. El gas refrigerante R-134a se demora en estabilizar, por lo tanto se daba un espacio de dos minutos para saber la temperatura en la cual se equilibraba el refrigerante en el evaporador.

4.1.6 Prueba piloto.

Una vez se terminó la carga del gas, se procedió a hacer una prueba piloto al sistema de refrigeración con la temperatura adecuada en la superficie del evaporador. La condensación de la humedad en la superficie del evaporador dio una respuesta positiva y de manera rápida. En la siguiente imagen se puede apreciar el goteo que se produjo en el evaporador.

Figura 82. Prueba piloto en el evaporador.



4.1.7 Estado final del deshumidificador.

Para proteger el deshumidificador de agentes externos que pudieran afectar el correcto funcionamiento y el buen cuidado de los elementos que lo conforman, se hizo una cubierta con acero pulido y unas mallas a la entrada y salida del aire. El estado final del deshumidificador quedó como se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 83. Estado final del generador atmosférico de agua.



4.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.

Se menciona el proceso de fabricación y ensamblaje de las piezas que conforman el aerogenerador describiendo cada una de las partes de lo conforman en el siguiente orden.

- Rotor del aerogenerador.
- Eje de transmisión.
- Alternador.

- Transmisión de potencia.
- Bastidor.
- Instalación del aerogenerador.

4.2.1 Rotor del aerogenerador

El peso y rigidez del rotor eran los factores más importantes a la hora de su construcción, por lo tanto, los alabes y discos del mismo se hicieron completamente de aluminio. Tres discos, dos de calibre 18 y uno de calibre 20, le dan la base a los alabes del aerogenerador. Son cuatro los alabes del rotor los que se encargan de extraer la energía cinética que tiene el flujo de aire, los alabes son laminas igualmente de aluminio, a las cuales se les dio la forma en cóncava en la maquina curvadora o roladora. La unión entre los discos y alabes se hizo mediante remaches y una pequeña placa de aluminio, aproximadamente siete remaches y placas por cada línea de contacto entre disco y alabe.

Figura 84. Construcción del rotor.



Los discos de calibre 18 son los más rígidos, debido a esto sobre ellos se atornillarán los discos macizos de aluminio y se posicionarán en la parte superior e inferior del rotor.

Figura 85. Unión mediante discos de aluminio.



Los discos de aluminio fueron cortados con un soplete de plasma, lo que permitió el diámetro requerido de 1 m, las dimensiones de la placa de aluminio (alabes) son de 1 x 0,8 m a la cual se curvó para darle forma de alabe.

4.2.2 Eje de transmisión.

El material usado para el eje de transmisión es acero SAE 1045, tiene las propiedades adecuadas para cumplir con la transmisión del movimiento. El eje se ha maquinado de acuerdo a las especificaciones de diseño, tiene 25 cm de longitud, un diámetro de 40 mm en el espacio en donde va la polea y 30 mm en donde van las chumaceras. En la siguiente tabla se muestran las propiedades del eje.

En la siguiente tabla se encuentran las propiedades del acero SAE 1045.

Tabla 15. Propiedades del acero SAE 1045.

PROPIEDAD MECANICAS	LAMINADO EN CALIENTE
Dureza Brinell (3000 kg)	190
% de elongación	23
% de reducción de área	44
Punto de fluencia [MPa]	413
Resistencia a la tracción [MPa]	655

Fuente: Compañía General de Aceros. S.A.

Figura 86. Eje de transmisión.



El maquinado del eje se hizo de forma simultánea con el maquinado de los discos de aluminio con el fin de que se puedan ensamblar de la manera correcta al roscar.

El aerogenerador tiene dos ejes, uno colocado en la parte de arriba que está unido al disco superior y el otro eje está colocado en la parte inferior, este último eje es el encargado de la transmisión de potencia.

Las roscas de los discos se hicieron de modo que el movimiento del rotor siempre ajustará los elementos cuando se encontraran en rotación. La rosca en el disco del eje inferior es derecha y la del eje superior es izquierda.

4.2.3 Alternador.

Las opciones de generación de energía, que pueden ser adaptables a este tipo de aerogeneradores generalmente son motores de corriente continua de algún tipo de electrodoméstico o alternadores de vehículos pequeños.

Los generadores de corriente eléctrica, en cualquiera de los dos casos, motores y alternadores, requieren altas velocidades de rotación en su eje para que puedan generar la corriente, las velocidades de rotación son similares en los dos casos, la variación se encuentra en el torque de arranque que se debe ejercer para vencer la inercia e iniciar la rotación, la variación de torque en los dos tipos no es significativa. Por tal razón y con la intención de obtener más potencia, se optó por un alternador de automóvil, el de menor amperaje [35 Amp] que se puede encontrar comercialmente.

Para alternadores de grandes potencias se requiere un mínimo de 1500 rpm en su eje, los alternadores de bajo amperaje utilizados en automóviles Daihatsu o Swift no requieren de tal velocidad, su generación se puede dar con velocidades de 950 a 1000 rpm, con un voltaje de salida lo suficiente para poder cargar la batería, aproximadamente 13,5 voltios. El alternador se instaló en el bastidor, se aseguró con tornillos y para que se pudiera ajustar la tensión se dejó una corredera.

Figura 87. Alternador seleccionado.



4.2.4 Transmisión de potencia.

La transmisión de potencia está dada por un juego de poleas, como se mencionó, los alternadores requieren de grandes velocidades para entregar potencia, por tanto se priorizo la relación entre la polea del eje del rotor y la polea del eje del alternador. Con el mismo fin del rotor, en la selección de la polea se priorizó el peso y con el mayor diámetro posible comercialmente.

De acuerdo al rango descrito en la ecuación **(3.44)**, para garantizar una buena transmisión del movimiento y correcta transmisión de potencia, la distancia entre centros entre las poleas se dispuso de 80 cm aproximadamente.

El diámetro de las poleas es el siguiente, la polea grande tiene 60,96 cm de diámetro (24 in) y la polea pequeña tiene 8 cm de diámetro. La relación de velocidad es de 7,62.

Figura 88. Polea grande.



4.2.5 Bastidor.

El bastidor es el soporte de todos los elementos del aerogenerador (rotor, ejes, rodamientos, poleas, alternador etc.). Es una estructura en forma de U hecha de tubería rectangular calibre 18 en las columnas y tubería de calibre 16 en los horizontales.

Tiene una altura total de 2,85 metros y un ancho de 1.36 metros. Sus dimensiones debían poder contener el rotor del aerogenerador y el alternador en la misma estructura.

Con el empeño de cuidar la estructura del óxido y la corrosión, debido a que va a estar a la intemperie, se aplicó una capa de pintura anticorrosiva de color gris y una capa superior de color negro. En la siguiente imagen se muestra todo el conjunto completamente ensamblado.

Figura 89. Ensamblaje completo del aerogenerador.



4.2.6 Instalación del aerogenerador.

El aerogenerador fue transportado desde la ciudad de Bucaramanga e instalado en el sitio en donde se tomaron los datos del viento. Para anclar la turbina se cavaron dos huecos con una profundidad de 25 cm aproximadamente y al mismo tiempo la estructura se sujetó con cuatro cables a tensión anclados al suelo.

4.3 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

Los componentes pertenecientes a este subsistema se instalaron en la parte inferior de la base que soporte al sistema productor de agua.

4.3.1 Batería.

Para el almacenamiento de la energía se utilizó una batería de la marca **MTEK**, con capacidad para almacenar 105 amperios hora. La referencia es **MT121050** y trabaja con 12V. Sus dimensiones son 33 mm de largo, 171 mm de ancho y 214 mm altura. Tiene un peso aproximado de 32 Kg. El rango de temperaturas en las cuales puede trabajar esta entre -15°C y 50°C. Puede recibir una corriente máxima de carga de 30 amperios.

Figura 90. Batería seleccionada.



4.3.2 Controlador.

El control de corriente que entra y sale de la batería está a cargo de un **Intelligent DC-DC** de referencia **SC-15A**, recibe y entrega la corriente en estado continuo y puede modificarse para para recibirla y entregarla en 12 o 24 V. Como se mencionó en el capítulo de diseño, la corriente máxima del controlador no debe ser inferior a la corriente que puede entregar el alternador, por lo anterior, por esta razón el controlador el controlador permite una circulación de 15 amperios.

Figura 91. Controlador seleccionado.



4.3.3 Inversor de corriente.

Para cambiar el estado de la corriente de continua a alterna, se seleccionó un inversor de marca **Cobra** de referencia [**CPI 480**], recibe la corriente en estado continuo a 12V y sale en estado alterno a 110V con una frecuencia de 60Hz.

Figura 92. Inversor de corriente seleccionado.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el siguiente capítulo se describen las pruebas y el análisis de los resultados que se obtuvieron con el prototipo implementado.

5.1 SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA.

Las pruebas al generador atmosférico de agua se realizaron en el laboratorio de sistemas térmicos de la escuela de ingeniería mecánica (UIS). El deshumidificador fue sometido a un trabajo continuo en donde se registró el comportamiento de las variables que pudiesen afectar su rendimiento.

Las variables tenidas en cuenta fueron las siguientes: temperatura ambiente, humedad relativa, temperatura de condensación, temperatura de evaporación, temperatura de funcionamiento de compresor, consumo eléctrico del compresor y consumo eléctrico total. Al final de cada hora se tomó la cantidad de agua generada por el subsistema.

La temperatura y humedad relativa del ambiente se registraron con un termo higrómetro. La temperatura de condensación, evaporación y del compresor se tomaron con termómetro infrarrojo en la superficie de cada uno de los componentes. El consumo de corriente eléctrica fue medido con un amperímetro.

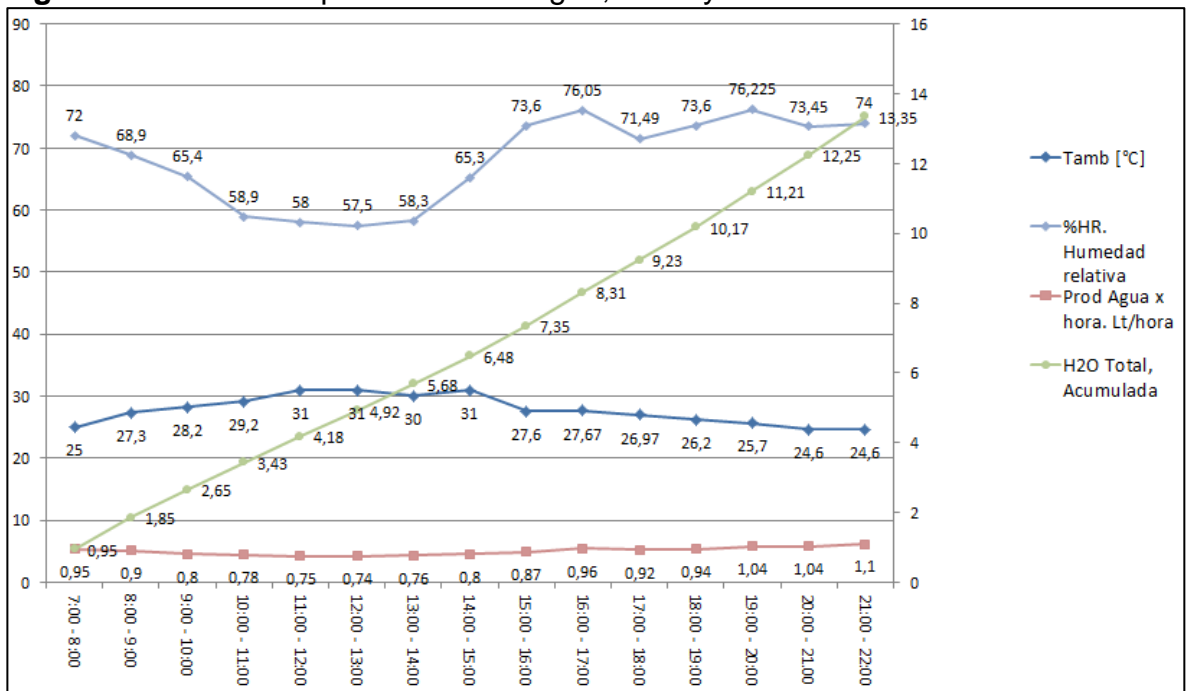
Figura 93. Instrumentos de medición.



En las siguientes gráficas se puede observar el comportamiento del generador atmosférico de agua, teniendo en cuenta las variables anteriormente mencionadas.

Para ver la variación del subsistema con respecto a las variables que afectan el rendimiento, se hicieron dos tomas de datos, con una continuidad de 14 horas y 17 horas.

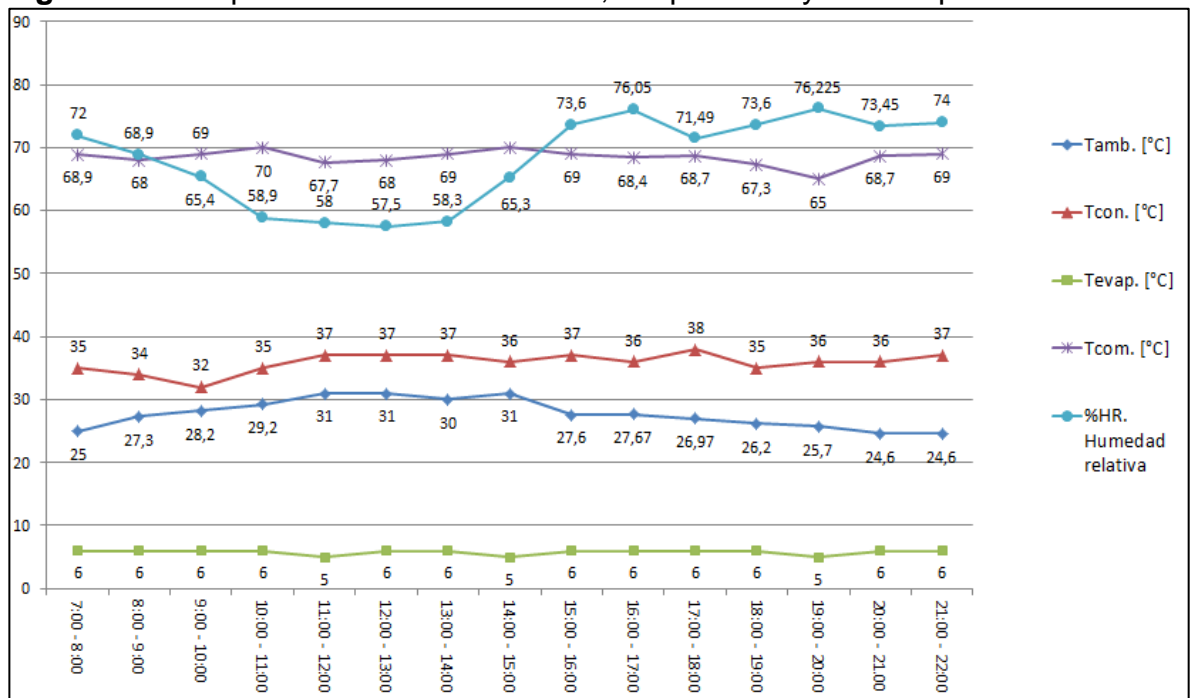
Figura 94. Gráfica de producción de agua, %HR y Tamb.



Como era de esperar, el rendimiento del subsistema generador de agua depende en gran medida de las condiciones ambientales presentes en el lugar de ubicación. Las condiciones que afectan directamente la condensación de agua son la temperatura ambiente y la humedad relativa. En la primera prueba hecha al generador atmosférico de agua se obtuvo un total de 13,35 litros de agua en 14 horas de duración, para un promedio de 0,954 litros por hora.

Las condiciones que no favorecen la generación de agua son altas temperaturas con poca humedad en el aire, pues como se sabe, a medida que aumenta la temperatura en el aire también aumenta su capacidad de contener humedad sin saturarse. Estas condiciones se dieron alrededor del mediodía, cuando la temperatura del ambiente aumento, la humedad absoluta se mantuvo igual y por tanto disminuyó la humedad relativa en el sitio.

Figura 95. Temperatura de condensación, evaporación y del compresor.

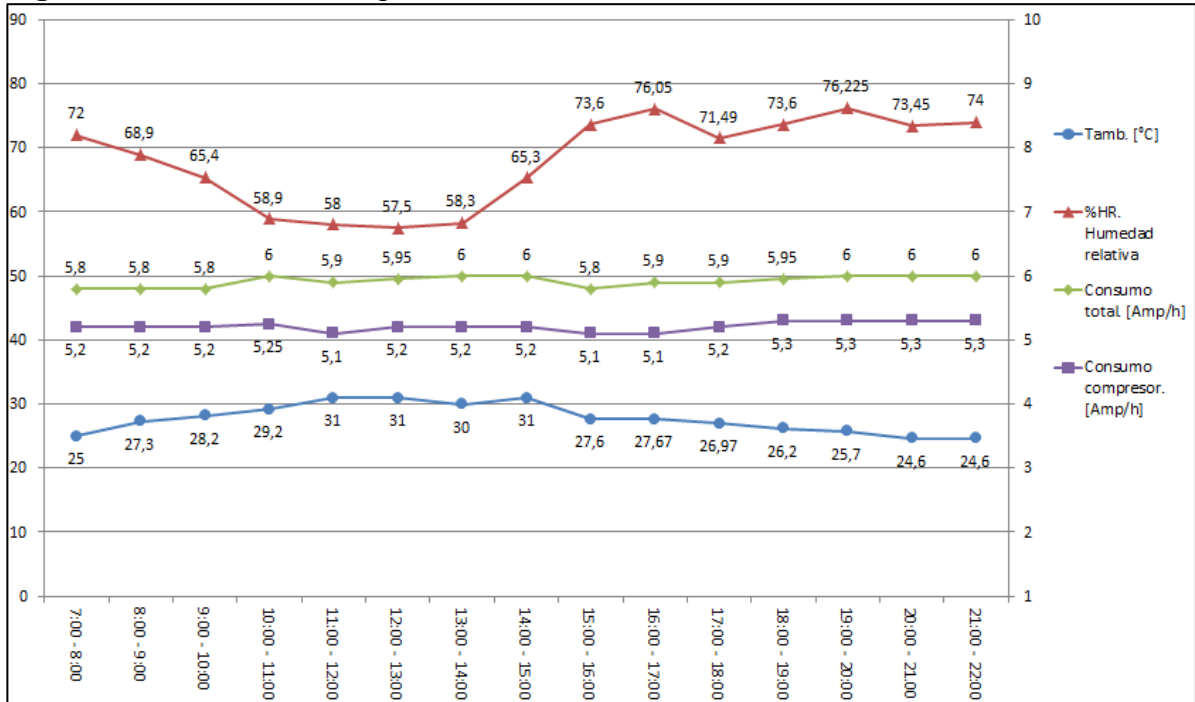


Las temperaturas a las cuales trabaja el subsistema (Temperaturas de: Condensación, evaporación y del compresor) se mantienen constantes a pesar de la variación de las condiciones climáticas.

La recuperación de calor que se hace en el sistema, es decir, el aire frío que sale del evaporador y se hace circular por el condensador provoca que este elemento del sistema funcione sin mayores esfuerzos, a pesar de ello, en las horas comprendidas entre las 10:00 am y las 3:00 p.m el sistema es obligado a

aumentar su presión y temperatura de condensación para poder extraer el calor que fue absorbido en este rango de tiempo.

Figura 96. Consumo energético del sistema.

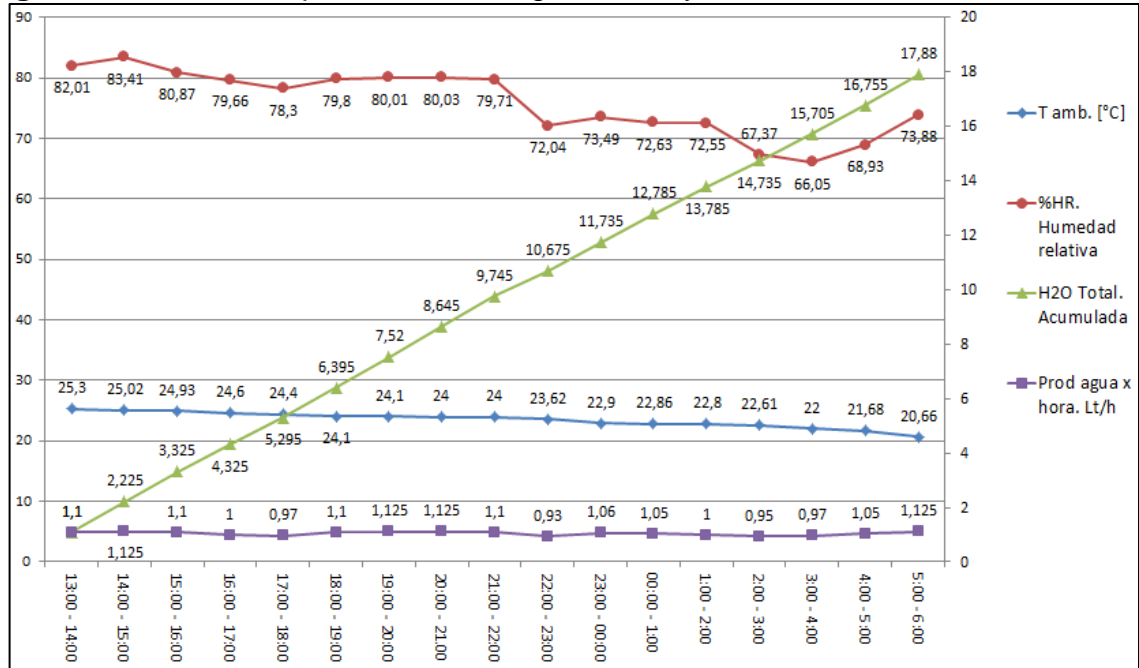


El consumo energético del compresor se mantiene aproximadamente estable, en toda la prueba tiene una variación aproximada de 0,1 amperios. De igual manera también lo hace el consumo total. El consumo total en el sistema está dado por el compresor, ventilador y el termostato de refrigeración.

El comportamiento de las condiciones ambientales es diferente en las horas de la tarde, noche y madrugada, por tal razón, se realizó una segunda prueba para observar el rendimiento y comportamiento del subsistema. Esta prueba tuvo una continuidad aproximada de 17 horas, realizada entre la 1:00 p.m y las 6:00a.m del siguiente día.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos en el ejercicio.

Figura 97. Gráfica de producción de agua, %HR y T amb.



Para este caso se tuvo una acumulación total de agua de 17,88 litros de agua en 17 horas, lo que da un promedio de 1,05 litros de agua por hora. Las condiciones climáticas de esta prueba favorecieron la condensación de humedad y en un total de 13 de las 17 horas que duró la prueba, la acumulación de agua estuvo igual o por encima del litro por hora. A pesar de que en horas de la madrugada la humedad relativa del lugar disminuyó, el ritmo de acumulación de agua se mantuvo gracias a que la temperatura del ambiente también lo hizo.

En la siguiente figura no se observa ningún aumento en la presión del condensador, de hecho, el promedio de las temperaturas a la cual se produce la condensación del refrigerante en el condensador es ligeramente menor debido a que este elemento extrae cantidades de calor menores comparadas con las del primer ejercicio.

Figura 98. Temperaturas de condensación, evaporación y del compresor.

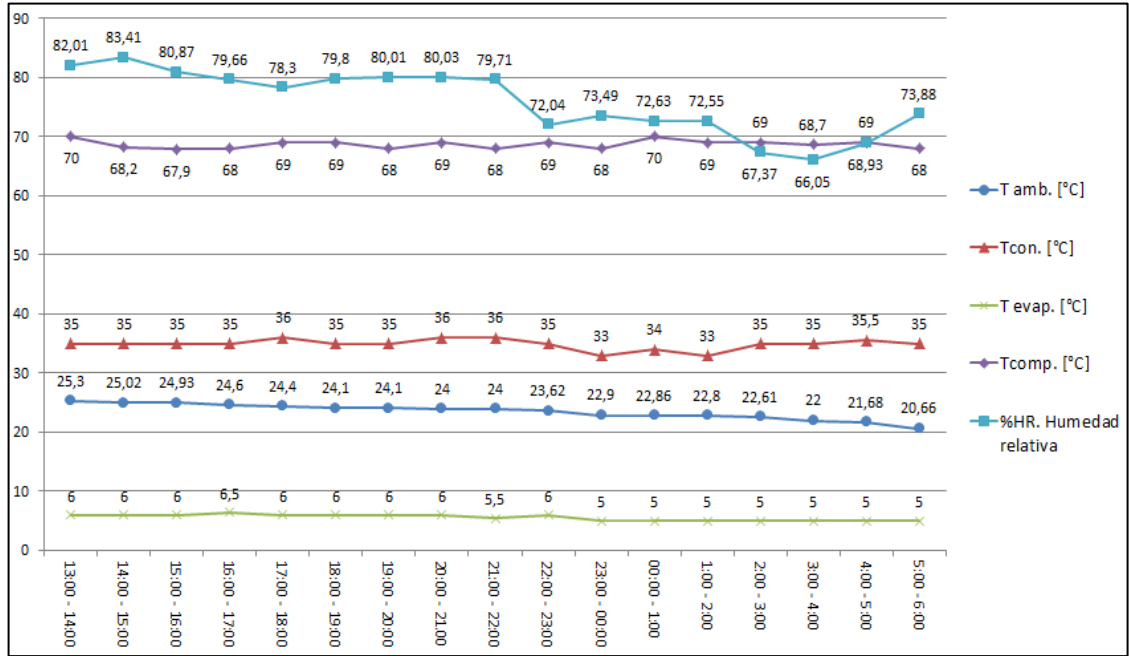
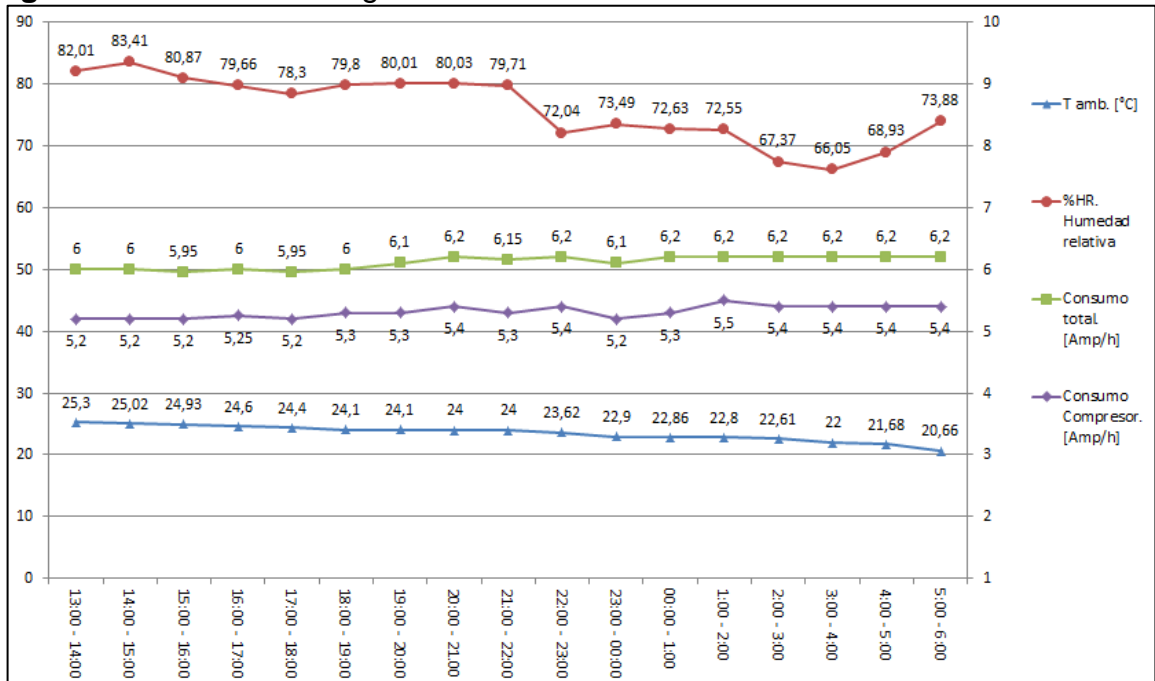


Figura 99. Consumo energético del sistema.



El consumo energético para esta prueba tuvo un aumento por parte del compresor, paso de un consumo promedio de 5,2 amperios a una temperatura promedio 29,71 °C a un consumo promedio de 5,32 a una temperatura ambiente promedio de 23,5 °C.

5.2 SUBSISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA.

Un túnel de viento es el sitio correcto para analizar el comportamiento del aerogenerador y determinar sus características, lamentablemente, en Colombia se carece de estos laboratorios y por tanto de los equipos necesarios para medir con exactitud lo requerido. Se debió recurrir a diferentes métodos para determinar las características de funcionamiento del aerogenerador.

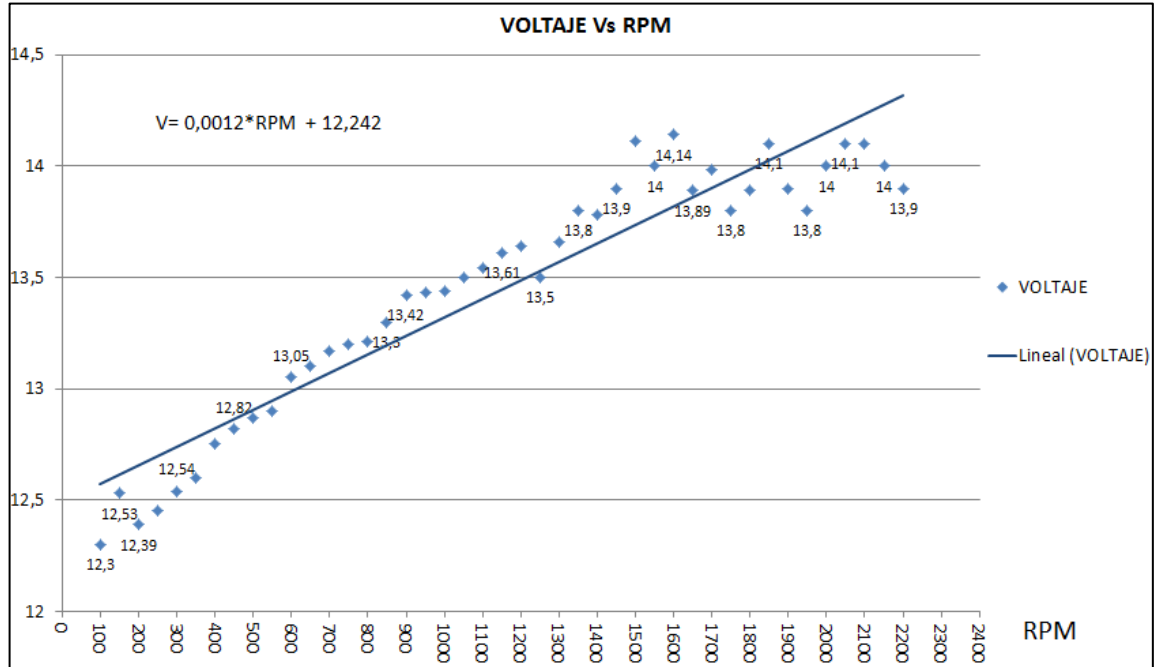
El aerogenerador fue instalado en la mesa de Los Santos, lugar en donde se hicieron los registros de la velocidad del viento.

5.2.1 Caracterización del alternador.

El relay en un alternador requiere para cumplir su función un “testigo” de paso de corriente, este elemento es un bombillo que se enciende cuando el alternador entrega corriente al voltaje adecuado y que al mismo tiempo actúa como carga.

Desinstalar este elemento permite retirar la carga del alternador y determinar el parámetro de operación. Los instrumentos utilizados fueron un voltímetro para medir el voltaje entregado y un tacómetro para observar las revoluciones en el eje.

Figura 100. Parámetro de operación del alternador.

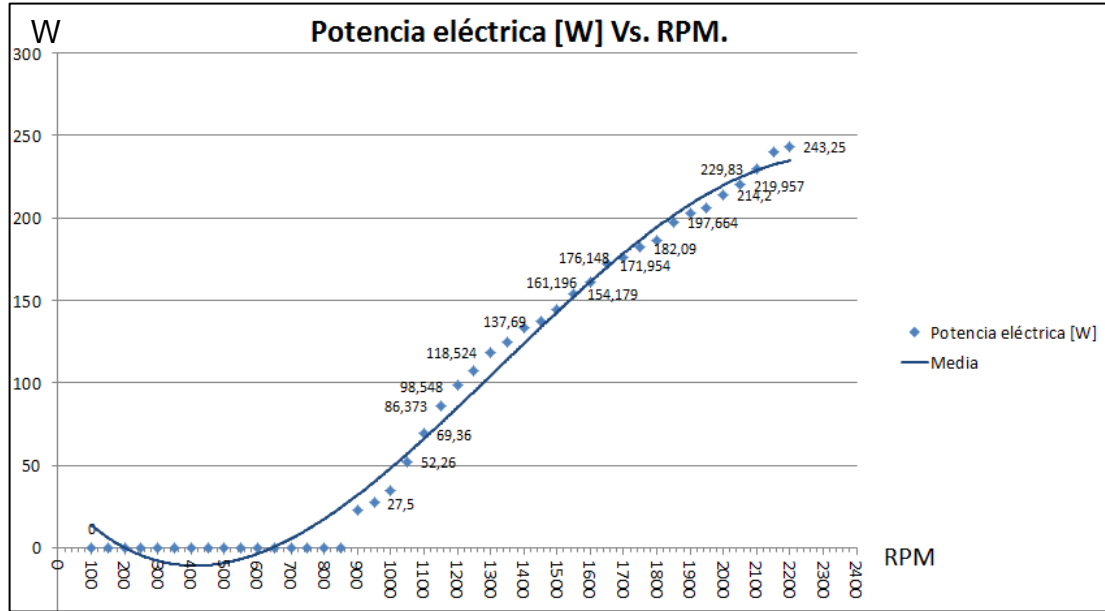


En el ejercicio se observó un aumento en el par de arranque requerido por el alternador debido al campo magnético que es inducido por los devanados de campo estacionario, este efecto se reduce con la adecuación del relay. Un rasgo particular que se observó es que el alternador proporciona un voltaje aproximado a los 12 V desde el inicio del ejercicio. A medida que se fueron aumentando las revoluciones también se aumentaba el voltaje que podía entregar el alternador.

Para caracterizar el alternador es necesario volver a instalar el relay, el “testigo” del paso de corriente es el bombillo que se enciende cuando el alternador está entregando corriente y que actúa como carga.

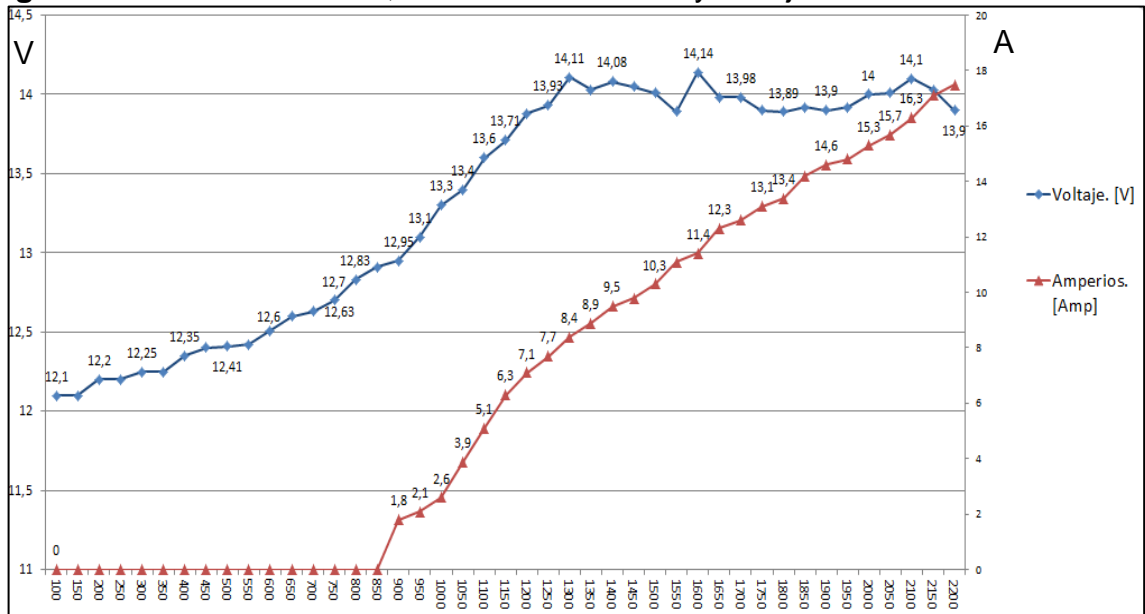
El procedimiento fue similar al que se utilizó para encontrar el parámetro de operación y para este ejercicio se utilizaron los mismos instrumentos.

Figura 101. Caracterización del alternador.



Los valores de corriente y voltaje tomados en la prueba de caracterización se representan en la siguiente gráfica.

Figura 102. Caracterización, valores de corriente y voltaje.



Un rasgo particular en los dos ejercicios hechos al alternador, es que incluso con revoluciones pequeñas este elemento siempre arroja un voltaje aproximado a los 12 voltios. Para satisfacer los requerimientos de energía de un automóvil cuando este se encuentra en ralentí [1200 rpm], los alternadores se diseñan para entregar una potencia mínima con el fin de satisfacer la demanda de corriente de los elementos estacionarios del automóvil. Para velocidades inferiores a 1200 rpm el alternador entrega corriente en menor cantidad.

5.2.2 Aerogenerador.

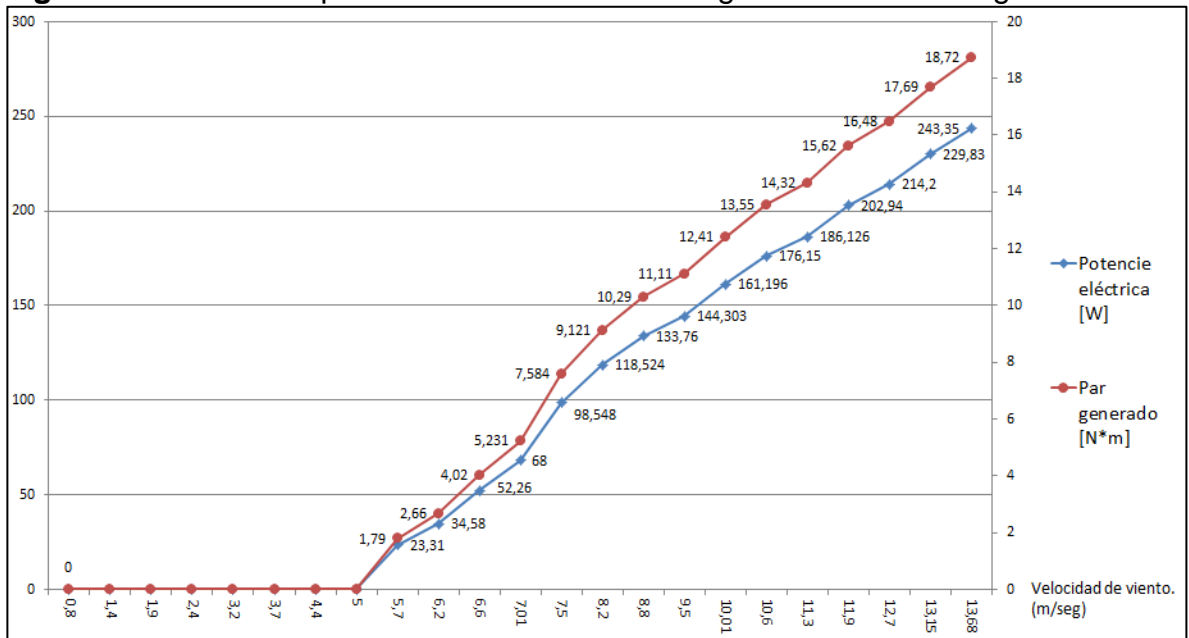
Las pruebas hechas al aerogenerador fueron hechas en el área rural del municipio de La Mesa de los Santos. Se registraron los datos correspondientes a la velocidad del viento y las revoluciones en el eje del rotor. El instrumento utilizado para medir las condiciones de flujo de viento en el lugar fue un anemómetro y un tacómetro de láser para medir las revoluciones en el eje del aerogenerador.

Figura 103. Sitio de análisis al aerogenerador.



En la siguiente gráfica se muestra la curva de potencia del aerogenerador, expone la velocidad en la cual el aerogenerador comienza a entregar potencia, para este caso la velocidad del viento debe ser aproximadamente de 5 m/Seg, la potencia entregada por el subsistema de generación de energía va aumentando conforme lo hace la velocidad del viento.

Figura 104. Curva de potencia del subsistema de generación de energía.



Para determinar los coeficientes de potencia y par del aerogenerador se debe hacer uso de la siguiente ecuación.

$$C_p = \frac{P_e}{\frac{1}{2} * \rho * A * V^3} \quad (5.1)$$

En donde:

P_e = Potencia eléctrica entregada por el aerogenerador [W].

ρ = Densidad del aire [Kg/m^3].

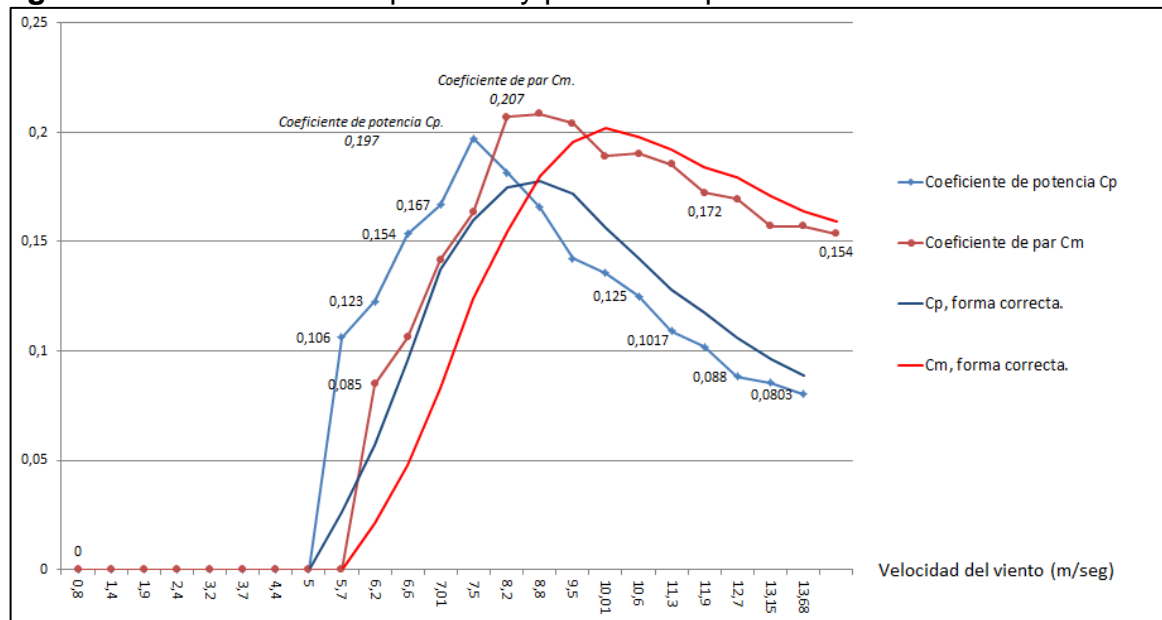
A = Área de barrido del aerogenerador [m^2] ; V = Velocidad del viento [m/Seg].

El coeficiente de par se encuentra en función del coeficiente de potencia y del CPR (λ). Para determinarlo se debe hacer uso de la ecuación 5.2.

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (5.2)$$

En las siguientes gráficas se observa la variación de estos términos en función de λ y la velocidad del viento.

Figura 105. Coeficiente de potencia y par con respecto a la velocidad del viento.

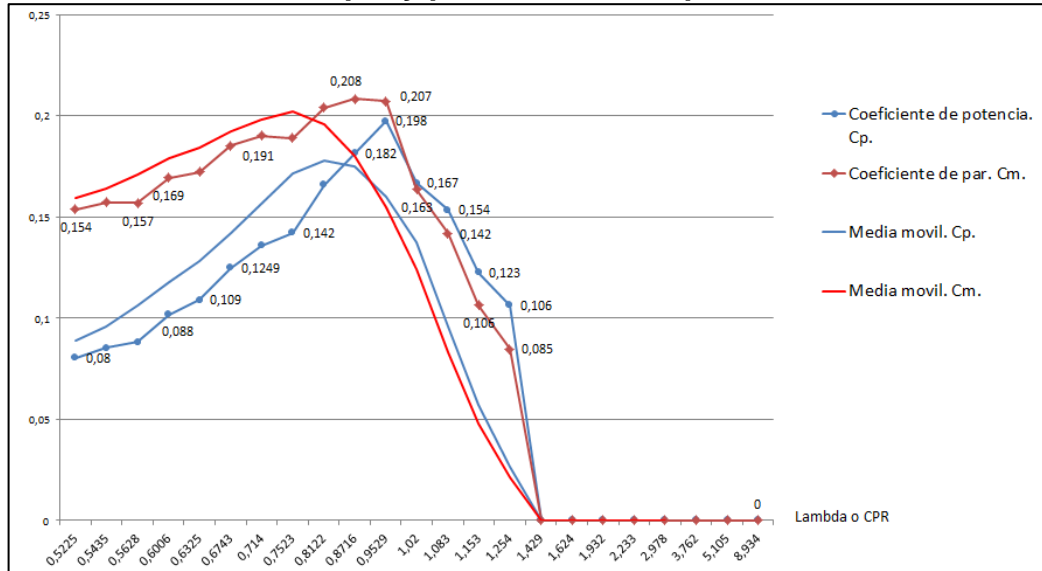


Como se mencionó el coeficiente de potencia de este tipo de rotor tiene un máximo de 0,21. Para este caso, el aerogenerador presenta un coeficiente de potencia máximo de 0,197 y se alcanza cuando λ está en un rango de 0,8 y 0,95.

Los aerogeneradores tipo Savonius son característicos por presentar coeficientes de par mayores a los coeficientes de potencia, es por esta razón, que uno de sus usos particulares sea el movimiento de bombas para la extracción de agua, el

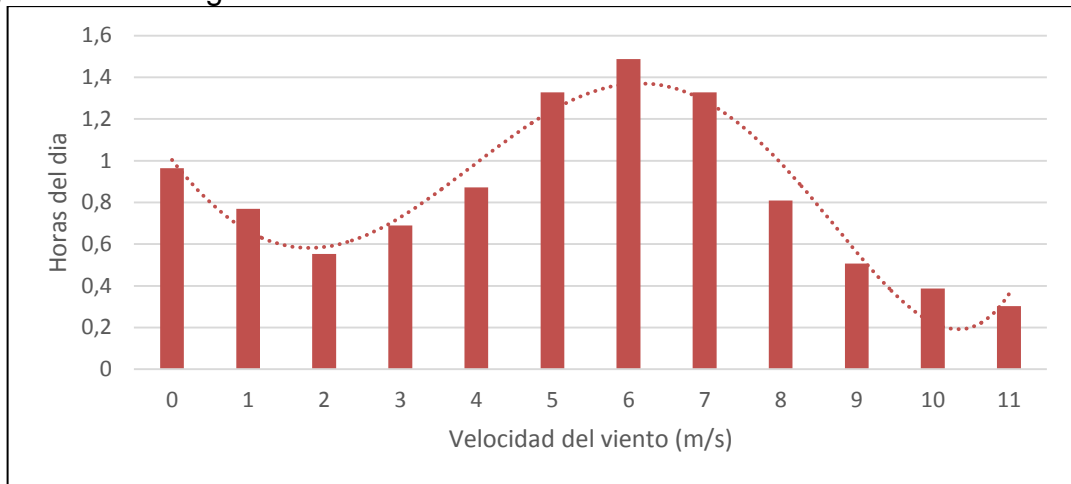
rango del coeficiente oscila desde cero hasta un límite máximo de 0,35, en este caso el valor máximo obtenido es 0,21.

Figura 106. Coeficiente de par y potencia con respecto al CPR



En la siguiente gráfica se muestra la distribución de probabilidad continua de weibull, se expone la densidad de la velocidad del viento en horas.

Figura 107. Histograma en horas de la velocidad del viento.



Por lo tanto, teniendo en cuenta, la densidad de las velocidades de acuerdo a la distribución de Weibull y su aparición durante la toma de datos, se puede determinar la cantidad de potencia útil entregada.

El punto de inicio para la entrega de corriente es en 5 m/Seg, por lo anterior, se tienen en cuenta las velocidades desde 6 m/Seg, de acuerdo a la distribución de probabilidad continua. En la siguiente tabla se tabula la entrega de potencia.

Tabla 16. Potencia entregada por el alternador.

Velocidad de viento (m/Seg)	Potencia entregada [w]	Densidad en horas. [h]	Total entregado. [Wh]
5	0	1,32	0
6	34,58	1,49	51,52
7	68	1,33	90,44
8	118,52	0,81	96
9	144,303	0,51	73,59
10	161,1	0,39	62,83
11	186,13	0,3	55,84
TOTAL ENTREGADO			430,22

5.3 COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE: EFECTO PELTIER Vs SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

En el mercado ofertan un método de deshumidificación de aire utilizando un principio termoeléctrico conocido como efecto Peltier. En esta sección se hace la comparación del sistema de refrigeración por compresión de vapor implementado en este proyecto y el que se puede encontrar comercialmente con respecto a los siguientes puntos:

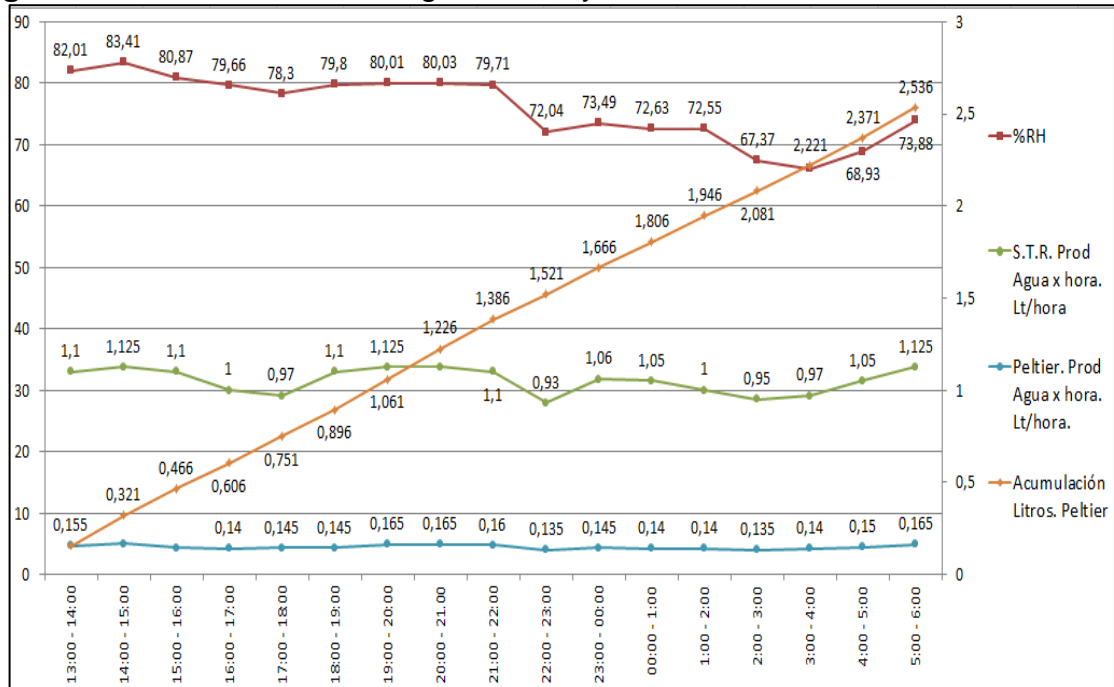
- Humedad relativa del ambiente Vs. Producción de agua.
- Consumo energético Vs. Producción de agua.
- Costo de la producción de agua de cada uno de los métodos.

El deshumidificador comercial que utiliza el efecto Peltier como principio de funcionamiento y que se utilizó en la prueba de comparación es un MINI DESHUMIDIFICADOR BIONAIRE modelo BMD100-LA013.

5.3.1 Humedad relativa del ambiente Vs. Producción de agua.

En la siguiente gráfica se observa el comportamiento de un sistema termoelectrico Peltier y su producción de agua con respecto al comportamiento del sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor que se construyó.

Figura 108. %RH Vs Prod de agua. S.T.R y efecto Peltier.



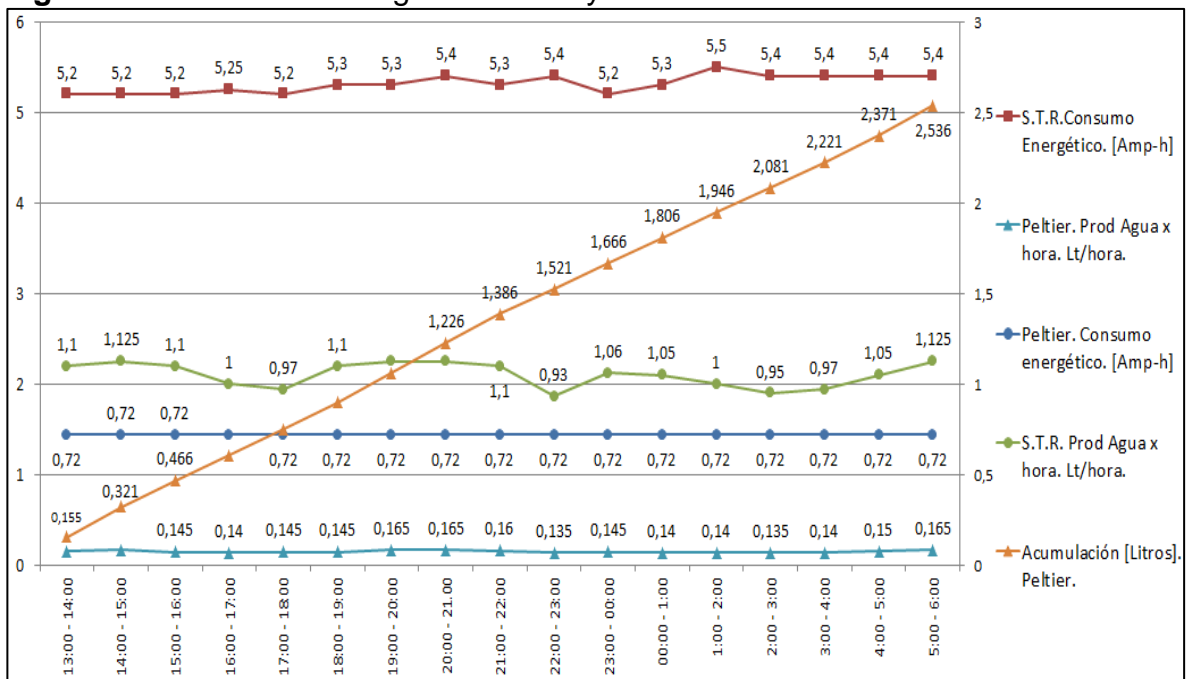
Como era de esperar, la condensación de humedad con el deshumidificador que utiliza el efecto Peltier como principio de funcionamiento también depende directamente de las condiciones ambientales que se presen en el lugar de la prueba, es decir que la condensación depende directamente de la humedad relativa y de la temperatura del ambiente.

Se puede determinar debido al comportamiento mostrado que las condiciones en las cuales los dos deshumidificadores de aire condensan una mayor cantidad de humedad son en las horas de la noche cuando la humedad relativa del ambiente aumenta y la temperatura del aire del ambiente disminuye.

5.3.2 Consumo energético.

En la siguiente figura se observa el consumo energético de los dos métodos para deshumidificación de aire.

Figura 109. Consumo energético. S.T.R y efecto Peltier.



Guardando las proporciones, la energía de diseño requerida por el sistema termoeléctrico Peltier es aproximadamente siete veces menor que la energía requerida por el sistema de refrigeración. Como característica particular, el consumo energético del sistema termoeléctrico permanece constante durante toda la prueba mientras que el consumo o energía requerida por el sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor presenta pequeñas variaciones a lo largo de toda la prueba.

5.3.3 Costo de la producción de agua de cada uno de los métodos.

- **Sistema termoeléctrico Peltier.**

El costo del KW-h en Colombia es de:

$$10 \frac{\text{cvsUSDO\$}}{\text{KW} - \text{h}} = 0,1 \frac{\text{Dolar}}{\text{KW} - \text{h}}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, el sistema termoeléctrico peltier produce un litro de agua en 6 horas y 30 minutos aproximadamente.

$$\frac{1 \text{ Litro}}{6,7 \text{ Horas}} = 0,149 \frac{\text{Litros}}{\text{Hora}}$$

El consumo energético por hora es de 80W, de modo que el consumo total es de:

$$0,08 \text{ KW} - \text{h} * 6,7 \text{ horas} = 536 \frac{[\text{W} - \text{h}]}{\text{Litro}} = 0,536 \frac{[\text{KW} - \text{h}]}{\text{Litro}}$$

El costo del litro de agua a partir del sistema termoeléctrico Peltier es el siguiente:

$$0,536 \frac{[\text{KW} - \text{h}]}{\text{Litro}} * 0,1 \frac{\text{Dolar}}{\text{KW} - \text{h}} * 2500 \frac{\text{Pesos}}{\text{Dolar}} = 134 \frac{\text{Pesos}}{\text{Litro}}$$

- **Sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor.**

El costo del litro de agua generado por el sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor teniendo en cuenta los valores promedio de la prueba se determina a continuación.

Según las pruebas realizadas, a partir de este método se condensan 1,05 litro en una hora aproximadamente.

El consumo energético promedio es de 585 W-h. De modo que el costo del litro de agua a partir del sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor es el siguiente:

$$585 \text{ W-h} = 0,585 \frac{[KW-h]}{\text{Litro}} * 0,1 \frac{\text{Dolar}}{KW-h} * 2500 \frac{\text{Pesos}}{\text{Dolar}} = 146,25 \frac{\text{Pesos}}{\text{Litro}}$$

Teniendo en cuenta los dos costos ya determinados, el litro de agua generado a partir del sistema térmico de refrigeración es 12,25 pesos más costoso que el litro de agua generado a partir del sistema termoeléctrico de efecto Peltier, sin embargo, la velocidad de generación del litro de agua con cada uno de los dos métodos es totalmente diferente, con el sistema termoeléctrico Peltier la generación del litro de agua tiene un tiempo aproximado de 6,7 horas para las mejores condiciones climáticas del día, mientras que el tiempo de generación de un litro a partir del sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor tiene una duración de 1 hora.

6. CONCLUSIONES.

- Se contribuyó con la misión de la universidad Industrial de la Santander, en el marco de la participación activa de cambio por el progreso y mejor calidad de vida de la comunidad, con la implementación de un proyecto que permite obtener un recurso natural vital para la supervivencia del hombre como el agua de una manera limpia.
- Utilizando los conceptos y teorías vistas a lo largo de la carrera, se diseñó y se construyó un sistema generador de agua a partir de un sistema térmico de refrigeración por compresión de vapor y un aerogenerador tipo Savonius que es capaz de proporcionar parte de la potencia que requieren todos los componentes eléctricos del prototipo.
- El subsistema productor de agua puede generar 24 litros de agua al día, con las condiciones climáticas habituales, si las condiciones climáticas son las óptimas el deshumidificador podría condensar una mayor cantidad. Los resultados evidencian que a pesar de que las condiciones del ambiente de la noche no son las ideales, es allí donde el subsistema generador de agua obtiene la mayor acumulación y condensación de humedad [1.05 Lt/hora], debido a que la temperatura del ambiente se reduce y la humedad relativa aumenta favoreciendo el cambio de fase de la humedad que contiene el ambiente. Por el contrario, las condiciones menos favorables para la condensación del vapor de agua se dan entre las 11:00 am y 3:00 pm cuando la temperatura del ambiente alcanza su mayor valor durante el día y la humedad relativa disminuye
- En cuanto a la generación de energía eléctrica, el aerogenerador entrega más de la potencia especificada en los objetivos (100 W), pero no es capaz de proporcionar toda la potencia que requiere el subsistema productor de agua. Las horas del día en las que los flujos de corriente de aire se mueven a mayor

velocidad, son en las horas del mediodía cuando la radiación solar aumenta su temperatura y genera cambios más grandes de densidad y presión.

- El costo de obtención de este recurso natural a partir del método propuesto se aumenta notablemente debido a la implementación de los tres subsistemas ya conocidos e implementados en este proyecto. El valor del metro cubico de agua por alcantarillado es de $1261 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Lt}} = 1,261 \frac{\text{pesos}}{\text{Lt}}$, mientras que el valor litro de agua obtenido a partir del prototipo es de $146,25 \frac{\text{pesos}}{\text{Lt}}$.

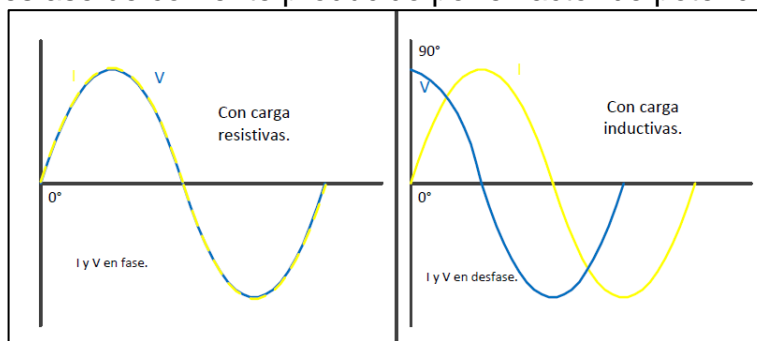
7. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda la implementación de un control en el subsistema de generación de agua que permita detectar parámetros como la temperatura del ambiente, consumo energético y humedad relativa entre otros, que le permitan al subsistema funcionar en los momentos que pueda obtener cantidades mayores o iguales al litro por hora con el menor consumo energético.
- El evaporador hecho completamente de cobre produce una transferencia de energía mayor que la transferencia que se produce con otros materiales, por lo tanto, se recomienda diseñar un proceso de manufactura que permita obtener evaporadores con las características geométricas exactas que se especifican de modo que se garantice la configuración geométrica de los tubos dentro de la unidad manejadora la distancia entre filas y columnas dentro de la unidad para que se proporcionen mejores resultados.
- Se recomienda el diseño y fabricación de una polea de aluminio para correas tipo A con un diámetro superior a 24 pulgadas, esto permitirá conseguir una mayor relación entre los diámetros de las poleas y por lo tanto conseguir mayores revoluciones en el eje del alternador para la misma velocidad del viento.
- La exposición directa del subsistema productor de agua a los rayos solares pueden generar aumentos de temperatura no deseadas en el evaporador y en el condensador del subsistema. Este aumento de temperatura, especialmente en la superficie del evaporador, influye directamente en la condensación de la humedad en su superficie, disminuyendo así la condensación y acumulación del líquido, por lo tanto es prudente poner en funcionamiento el subsistema de generación de agua en lugares donde se evite la exposición directa a la radiación solar

- Las cargas eléctricas se pueden clasificar en tres grandes grupos, cargas resistivas, cargas inductivas y cargas capacitivas. Por su naturaleza cada una de estas tienen rasgos característicos que las hacen totalmente diferentes. Las cargas resistivas (R), como su nombre lo indica, se oponen a la circulación de la corriente y disipan la energía en forma de calor. Las cargas inductivas (X_L) se generan cuando se produce la circulación de corriente a través de bobinas hechas con alambre de cobre que genera una FEM, esta aplicación se utiliza ampliamente en transformadores, motores y otros dispositivos. Los inversores de corriente, como el presentado en el proyecto, son utilizados en aplicaciones fotovoltaicas y están especialmente diseñados para alimentar cargas resistivas y no cargas inductivas.

Como se mencionó, estos tipos de cargas presentan características diferentes y por tanto ondas sinusoidales con ángulos de desfase que no favorecen el funcionamiento del inversor cuando quiere accionar cargas netamente inductivas, como se muestra en la siguiente gráfica.

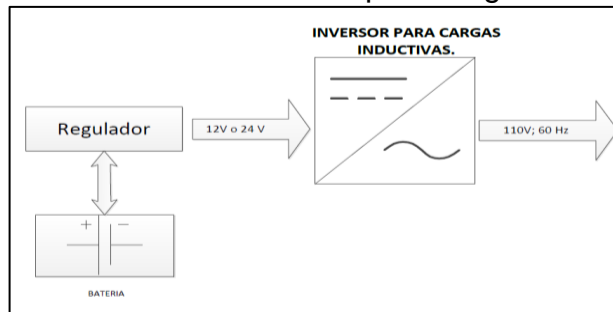
Figura 110. Desfase de corriente producido por el factor de potencia.



Debido al alto factor de potencia que tiene el motor del compresor, el ángulo de desfase entre estas dos ondas va a ser grande, por lo tanto, el inversor de corriente no va a ser capaz de entregar o en su defecto de sostener la onda de tensión que es requerida por el compresor impidiendo el correcto funcionamiento de la unidad de compresión.

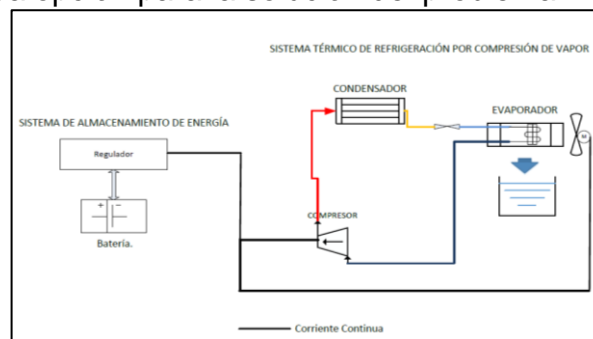
La propuesta a la solución del problema es fabricar un dispositivo o inversor de corriente hecho especialmente para mantener cargas inductivas, que sea alimentado con corriente continua de 12V o 24V, que permita corregir el ángulo de desfase entre la corriente y la tensión originada por la carga y que mantenga la tensión de onda requerida por los motores accionados.

Figura 111. Diseño del inversor de corriente para cargas inductivas.



Una segunda propuesta a la solución, es adquirir todos los elementos de subsistema generador de agua para que funcionen con corriente continua de 12V y 24V, en este caso se elimina el inversor de corriente del prototipo, tal y como se observa en la siguiente figura.

Figura 112. Segunda opción para la solución del problema.



BIBLIOGRAFÍA.

Alcaldía de los Santos Santander. Disponible en: www.lossantos-santander.gov.co

ALLEN, Richard G, *et al. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food & Agriculture Org., 2006.

BAÑUELOS R. CAMACHO A. SERRANO A. y MUCIÑO M. Análisis y validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento. Instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

BLANCO, Laura Isabel; BARRIOS Mauricio. Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de sistemas de acondicionamiento de aire bajo diferentes enfoques de control de confort. Trabajo de grado Ingeniería mecánica. Bucaramanga, Santander. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.

BRASIL, TECUMSEH DO BRASIL LTDA.

Caracterización componente Físico-Biótico Municipio de los Santos-Santander. IDEAM, Evapotranspiración Potencial.

Catálogo de rodamiento NTN, Cálculo de la vida nominal básica de los rodamientos.

Catálogo WL 41 520/3 SB de FAG, Unidades de rodamiento tipo S.

CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinámica. México: McGraw Hill, 2003. p. 291.

EMBRACO. Revista Club de la Refrigeración. Condensador. [En línea]. [Consultado el 10 Enero de 2015], Disponible en <<http://www.clubedarefrigeracao.com.br/es/downloads/condensador>>

HANDBOOK, ASHRAE, et al. Fundamentals. *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.*

LÓPEZ, Miguel Villarrubia. Ingeniería de la energía eólica. Marcombo. 2012.

TORRES, J. Procesos y proyectos de apoyo a la inserción de las ER en Colombia. Tetra Tech ES INC.

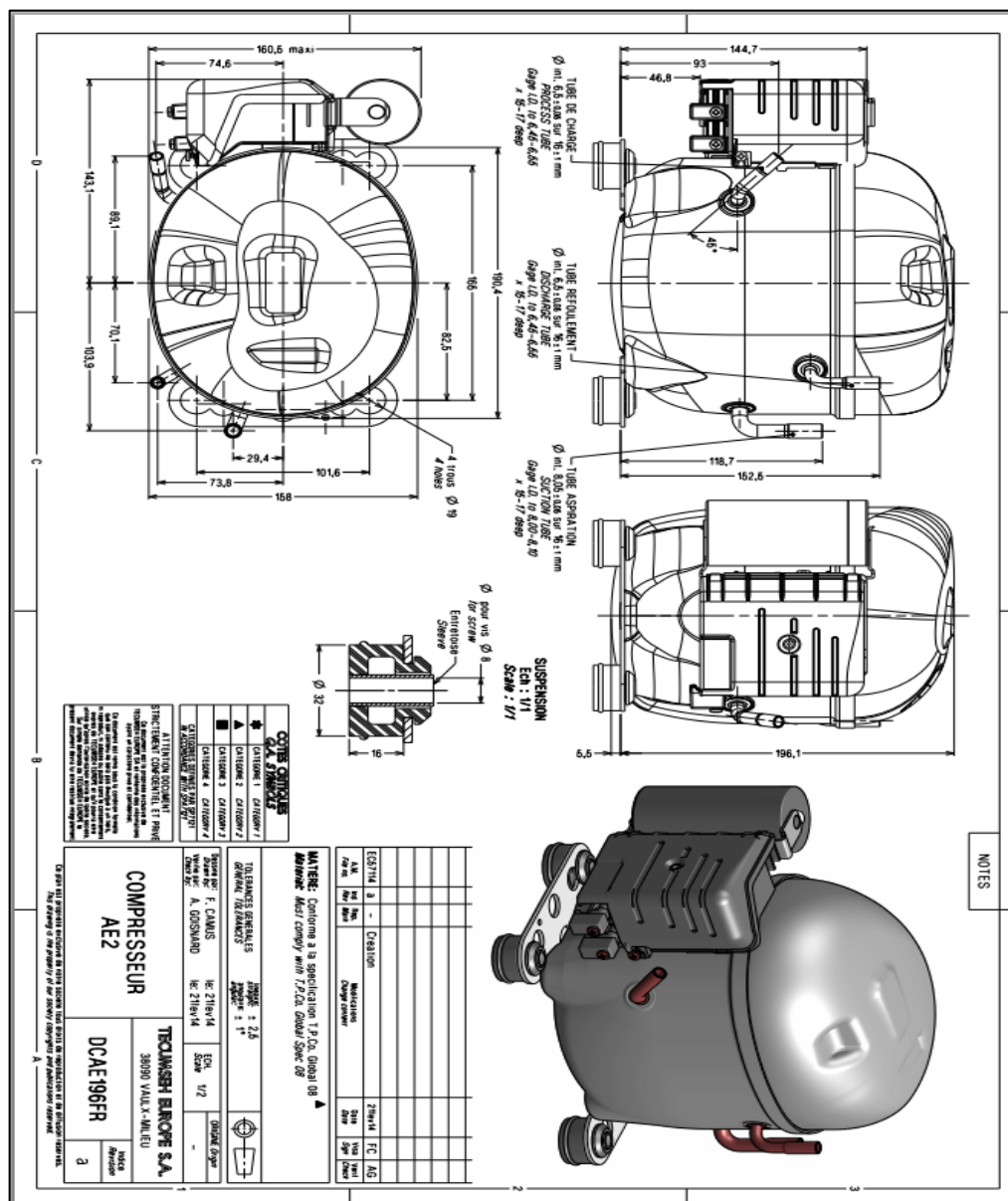
Velkonmmen. Disponible en: www.windpower.org

YUNUS. A. Cengel. Transferencia de calor. Traducido por José Hernan Pérez. 2 ed. McGraw-Hill, 2004.

ANEXOS.

ANEXO A. Especificaciones técnicas del compresor.

En el siguiente anexo se presenta todos lo relacionado con la unidad de compresión.



Compresseur / Compressor
Code tension / Voltage code : AA

AE4440Y-AA1A

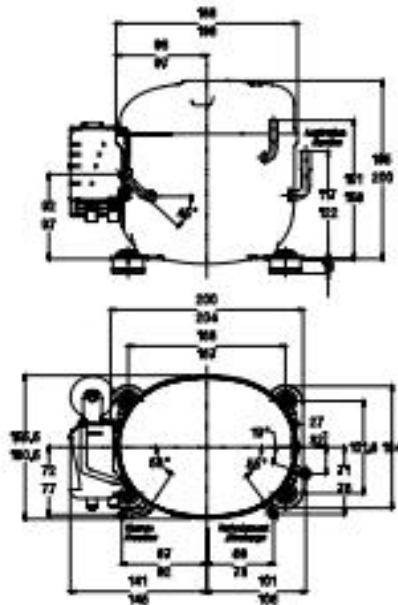
Froid commercial et industriel positif (HP)
Commercial & industrial application (HBP)

115V / 60Hz - 1~

R134a

N° 213JS-AA - ind a

Conditions Conditions	fréquence frequency	Prod frigorifique nominale / nominal refrigerating capacity			Puis. sonore Sound level
		Watts	Kcal/h	BTU/h	
EN12900*	60 Hz	1071	921	3652	ISO 3745 / ISO 3743-1
Cecomat	60 Hz	1041			59 dBA



Cylindrée / Displacement : 10.33 cm³
Poids net / Net weight : 9.8 Kg
Charge en huile / Oil charge : 280 cm³
Type d'huile / Oil type : P.O.E /
Détente / Expansion device : Capillaire/Détendeur
Capillary/Exp^o valve

Refroidissement / Cooling : Ventilé / Forcé
Résistance à 20° C / Windings resistances at 20° C
Phase princ. / Main Winding : 1.7 Ohms
aux. / Auxiliary Winding : 3.8 Ohms

Intensité / Current
nom. / Rated current RLA : 6 A
max. / Max current : 8.9 A
dém. / Start current LRA : 32 A

Ap. Electrique / Electrical equipment : CSIR

Protecteur / Overload : MST18AW
Temporisation / Time Check : 2.8s - 5.2s / 29 A
T° ouverture / Opening temp. : 135° C
fermeture / Closing temp. : 61° C
Option / optional : T0610

Relais Intensité / Current relay : 501-96180H
enclenchement / Pick up : 16.8A
déclenchement / Drop out : 13.9A
Option / optional : MTRPH0016

Condensateur dém. / Start capacitor : 315 µF / 160 V

EN12900: T°cond.+50°C / T°évap. +5°C / T°gas aspirés. +20°C / Sous refroidissement. 0K

* EN 12900 : Cond. T° +50°C / Evap. T° +5°C / Return gas T° +20°C / Subcooling. 0K

Pour conduites Ø ext / For tubing O.D.

Aspiration Suction	Refoulement Discharge	Charge Process
7.9 (5/16")	6.35 (1/4")	6.35 (1/4")

Les caractéristiques données dans cette fiche technique peuvent varier sans avis préalable, sans les autorisations que "TECUMSEH EUROPE" entend toujours apporter à sa production. "TECUMSEH EUROPE", in a constant endeavour to improve its products reserves the right to change any information contained in this bulletin without prior warning.



AE4440Y-AA1A	Tension AA : 115V 1~ 60 Hz	R134a	N°213JS-AA	Ind a
---------------------	-----------------------------------	--------------	-------------------	--------------

Les performances sont données dans les conditions EN 12900 :	Gaz aspirés :	20°C
	Sous refroidissement :	0°K
The performance data are in EN 12900 conditions :	Return gas :	20°C
	Subcooling :	0°K

60 Hz R134a

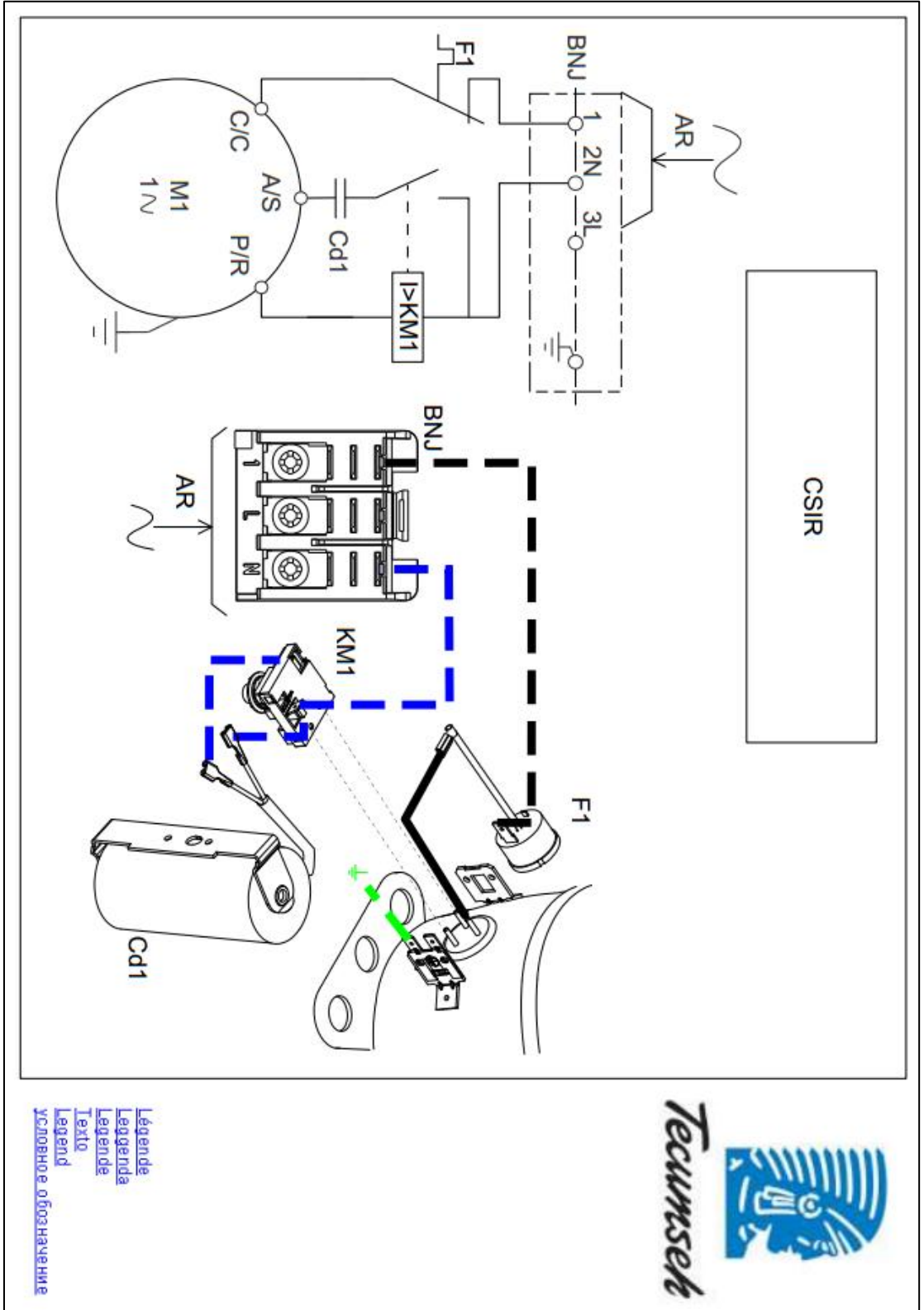
4 T condensation	5 T évaporation (°C)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15
30	1 P frigorifique (W)		343	450	583	744	937	1168	1440	1756	2121
	2 P absorbée (W)		295	291	329	366	400	427	446	453	445
	3 I absorbée (A)		4.25	4.41	4.58	4.77	4.97	5.19	5.42	5.67	5.93
40	1 P frigorifique (W)			388	503	643	811	1011	1248	1526	1848
	2 P absorbée (W)			290	329	371	413	453	487	513	529
	3 I absorbée (A)			4.32	4.55	4.79	5.04	5.32	5.6	5.9	6.22
50	1 P frigorifique (W)				433	552	695	867	1071	1311	1592
	2 P absorbée (W)				344	387	434	482	528	571	606
	3 I absorbée (A)				4.59	4.89	5.2	5.52	5.87	6.22	6.59
60	1 P frigorifique (W)					472	592	736	908	1112	1352
	2 P absorbée (W)					420	468	522	577	632	684
	3 I absorbée (A)					5.07	5.43	5.81	6.21	6.62	7.04

1 = refrigerating capacity 2 = watt input 3 = current 4 = condensing temperature 5 = evaporating temperature

Nota : Les caractéristiques données dans cette fiche technique peuvent évoluer sans avis préalable, avec les améliorations que "TECUMSEH EUROPE" entend toujours apporter à sa production.

Note : "TECUMSEH EUROPE", in a constant endeavour to improve its products reserves the right to change any information contained in this leaflet without prior warning.

Conexiones eléctricas en el compresor.



ANEXO B. Adquisición de datos, velocidad del viento.

La adquisición de datos se realizó en la hacienda vivero la fuente, del municipio de Los Santos, Santander.

Fecha: 23 de agosto de 2014.

T (°C)	ρ [Kg/m ³]	Hora	Vprom/hora [m/s]	Penerg,viento [W/m ²]
24	1,188	8 a 9	1,82	3,5809
26	1,184	9 a 10	2,74	12,1779
26	1,184	10 a 11	4,77	64,2505
27	1,176	11 a 12	7,72	270,5386
29	1,168	12 a 13	8,61	372,7539
29	1,168	13 a 14	8,89	410,3156
28	1,172	14 a 15	7,53	250,1972
27	1,176	15 a 16	4,03	38,4851
25	1,184	16 a 17	2,12	5,6406
23	1,192	17 a 18	1,36	1,4992
			Total	1429,44

Fecha: 30 de agosto de 2014.

T (°C)	ρ [Kg/m ³]	Hora	Vprom/hora [m/s]	Penerg,viento [W/m ²]
24	1,188	8 a 9	1,54	2,0416
25	1,184	9 a 10	2,61	9,0587
27	1,176	10 a 11	5,72	110,0438
27	1,176	11 a 12	7,55	253,0568
29	1,168	12 a 13	9,03	430,007
28	1,172	13 a 14	8,51	361,148
27	1,176	14 a 15	6,88	191,488
26	1,184	15 a 16	3,46	24,5216
24	1,188	16 a 17	2,04	4,325
24	1,188	17 a 18	1,29	1,0937
			Total	1386,78

A/M/D hh:mm:ss	VEL-PROM (m/s)
23/08/2014 08:00 AM	1,31
23/08/2014 08:15 AM	1,56
23/08/2014 08:30 AM	2,48
23/08/2014 08:45 AM	1,93
23/08/2014 09:00 AM	2,53
23/08/2014 09:15 AM	2,65
23/08/2014 09:30 AM	2,81
23/08/2014 09:45 AM	2,97
23/08/2014 10:00 AM	4,63
23/08/2014 10:15 AM	4,57
23/08/2014 10:30 AM	3,95
23/08/2014 10:45 AM	5,93
23/08/2014 11:00 AM	7,44
23/08/2014 11:15 AM	7,71
23/08/2014 11:30 AM	8,08
23/08/2014 11:45 AM	7,65
23/08/2014 12:00 PM	7,73
23/08/2014 12:15 PM	8,18
23/08/2014 12:30 PM	10,01
23/08/2014 12:45 PM	8,52
23/08/2014 01:00 PM	9,57
23/08/2014 01:15 PM	8,67
23/08/2014 01:30 PM	8,55
23/08/2014 01:45 PM	8,77
23/08/2014 02:00 PM	7,36
23/08/2014 02:15 PM	7,55
23/08/2014 02:30 PM	7,74
23/08/2014 02:45 PM	7,47
23/08/2014 03:00 PM	5,21
23/08/2014 03:15 PM	3,03
23/08/2014 03:30 PM	4,02
23/08/2014 03:45 PM	3,86
23/08/2014 04:00 PM	3,31
23/08/2014 04:15 PM	1,86
23/08/2014 04:30 PM	1,98
23/08/2014 04:45 PM	1,33
23/08/2014 05:00 PM	1,51
23/08/2014 05:15 PM	1,26

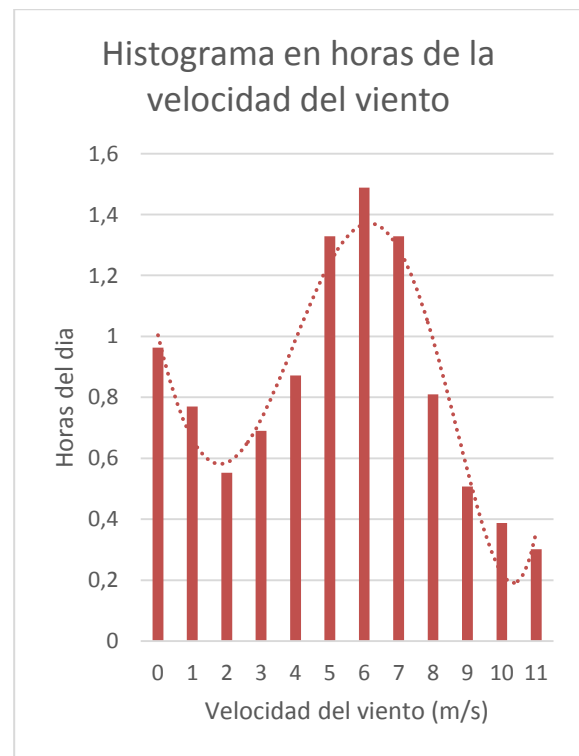
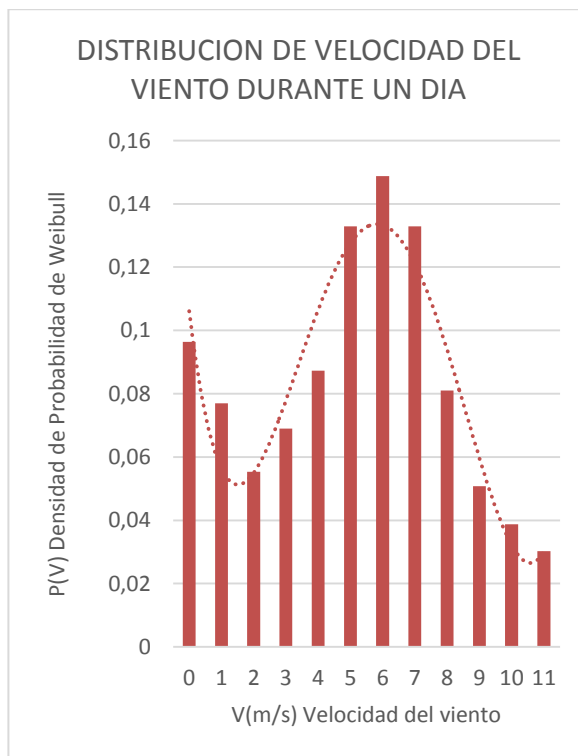
A/M/D hh:mm:ss	VEL-PROM (m/s)
30/08/2014 08:00 AM	1,12
30/08/2014 08:15 AM	2,23
30/08/2014 08:30 AM	1,55
30/08/2014 08:45 AM	1,26
30/08/2014 09:00 AM	2,93
30/08/2014 09:15 AM	2,21
30/08/2014 09:30 AM	2,77
30/08/2014 09:45 AM	2,53
30/08/2014 10:00 AM	5,44
30/08/2014 10:15 AM	6,58
30/08/2014 10:30 AM	4,85
30/08/2014 10:45 AM	6,01
30/08/2014 11:00 AM	7,71
30/08/2014 11:15 AM	8,52
30/08/2014 11:30 AM	6,53
30/08/2014 11:45 AM	7,44
30/08/2014 12:00 PM	9,84
30/08/2014 12:15 PM	8,79
30/08/2014 12:30 PM	8,05
30/08/2014 12:45 PM	9,44
30/08/2014 01:00 PM	8,23
30/08/2014 01:15 PM	9,44
30/08/2014 01:30 PM	8,56
30/08/2014 01:45 PM	7,81
30/08/2014 02:00 PM	7,85
30/08/2014 02:15 PM	6,79
30/08/2014 02:30 PM	7,22
30/08/2014 02:45 PM	5,66
30/08/2014 03:00 PM	3,53
30/08/2014 03:15 PM	4,01
30/08/2014 03:30 PM	2,97
30/08/2014 03:45 PM	3,33
30/08/2014 04:00 PM	3,2
30/08/2014 04:15 PM	1,35
30/08/2014 04:30 PM	1,95
30/08/2014 04:45 PM	1,66
30/08/2014 05:00 PM	1,32
30/08/2014 05:15 PM	1,59

23/08/2014 05:30 PM	1,12
23/08/2014 05:45 PM	1,55

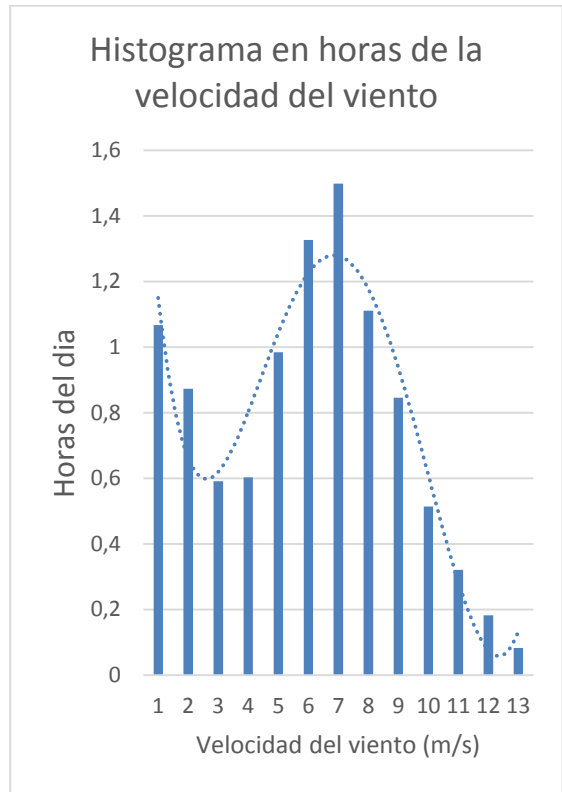
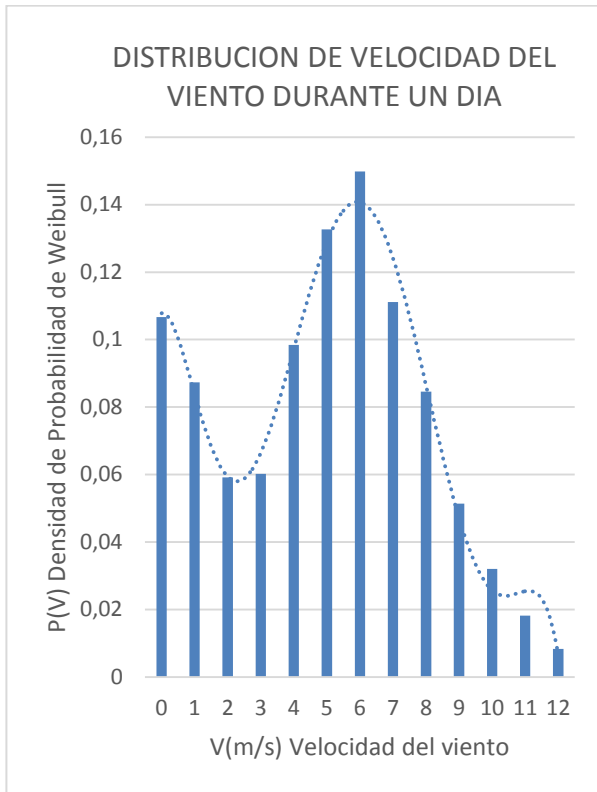
30/08/2014 05:30 PM	0,98
30/08/2014 05:45 PM	4,92

Se presenta el procedimiento para el tratamiento estadístico de los datos del viento con su respectiva distribución continua de weibull. Para el día 1 y día 2.

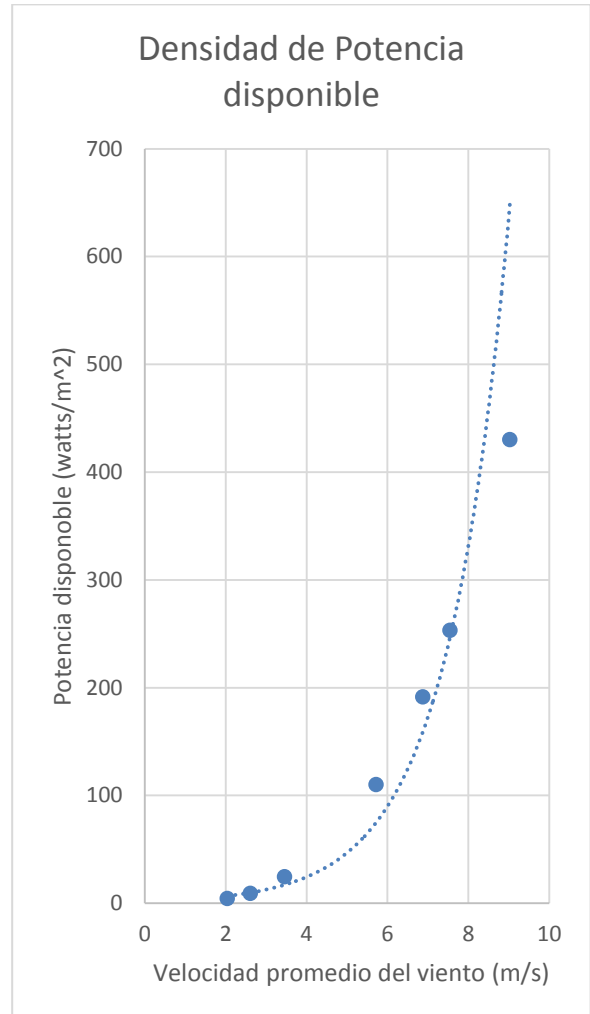
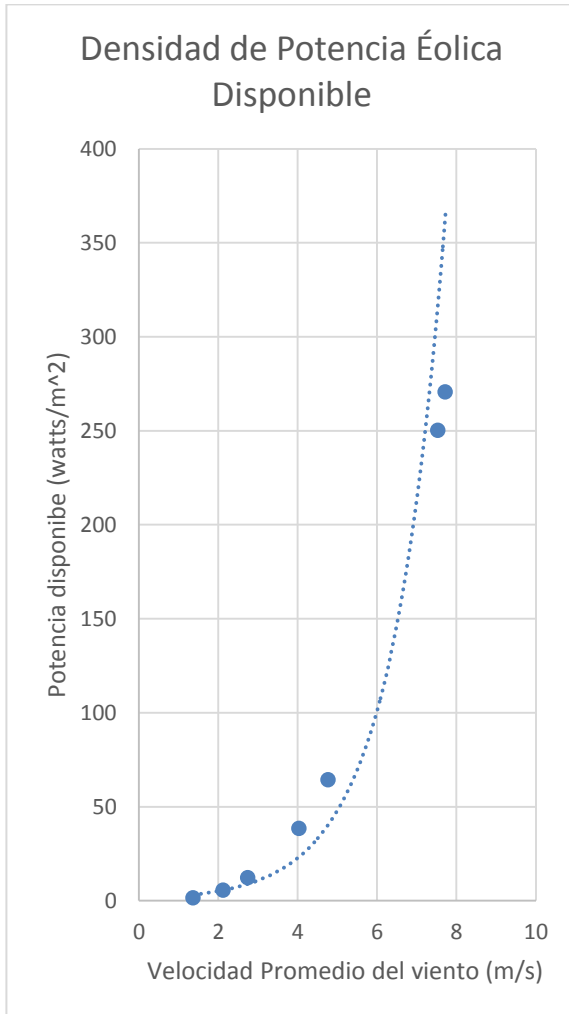
DIA 1														
Tabla de probabilidad para calcular el p(u _i) y el F(u _i)														
n	i	u _i discreto	m _i	p(u _i)	F(u _i)	y _i	x _i	y _{prom}	x _{prom}	O	P	Valor de (a)	Valor de (b)	Valor de (c)
1754	1	0	169	0,0963512	0,0963512	-2,28952587	-	-0,15299411	1,51044126					
	2	1	135	0,07696693	0,17331813	-1,65896783	0			-1,51044126	-1,50597372	0,997042227	-1,65896783	5,279805366
	3	2	97	0,05530217	0,2286203	-1,34871135	0,69314718			-0,81729408	-1,19571724	1,463019586	-2,36279926	5,027965677
	4	3	121	0,06898518	0,29760547	-1,04055087	1,09861229			-0,41182897	-0,88755675	2,155158627	-3,40823462	4,861908128
	5	4	153	0,08722919	0,38483466	-0,7218261	1,38629436			-0,1241469	-0,56883199	4,581926787	-7,07372537	4,682499451
	6	5	233	0,13283922	0,51767389	-0,31589663	1,60943791			0,09899666	-0,16290252	-1,645535617	2,33249077	4,126650209
	7	6	261	0,14880274	0,66647662	0,09352889	1,79175947			0,28131821	0,246523	0,876313701	-1,47661448	5,392610282
	8	7	233	0,13283922	0,79931585	0,473760935	1,94591015			0,43546889	0,62675505	1,439264802	-2,32691905	5,036651323
	9	8	142	0,08095781	0,88027366	0,752616614	2,07944154			0,56900028	0,90561073	1,591582205	-2,55698554	4,985672575
	10	9	89	0,05074116	0,93101482	0,983524478	2,19722458			0,68678332	1,13651859	1,654843031	-2,6525373	4,967385269
	11	10	68	0,03876853	0,96978335	1,25258074	2,30258509			0,79214384	1,40557485	1,774393475	-2,83311122	4,936539535
	12	11	53	0,03021665	1	-	2,39789527				-	1,488800882	-24,0174039	4,929768782
			1754			-1,52994113	15,1044126							



DIA 2														
Tabla de probabilidad para calcular el $p(u_i)$ y el $F(u_i)$														
n	i	u_i discreto	m_i	$p(u_i)$	$F(u_i)$	y_i	x_i	y_{prom}	x_{prom}	O	P	Valor de (a)	Valor de (b)	Valor de (c)
1809	1	0	193	0,10668878	0,10668878	-2,18195947		0,073637289	1,8170195					
	2	1	158	0,08734107	0,19402985	-1,53382698	0			-1,8170195	-1,60746427	0,884670898	-1,53382698	5,662030479
	3	2	107	0,0591487	0,25317855	-1,23124415	0,69314718			-1,12387232	-1,30488144	1,16105844	-2,03602854	5,775338951
	4	3	109	0,06025428	0,31343284	-0,97802991	1,09861229			-0,71840721	-1,0516672	1,463887315	-2,58627451	5,851610561
	5	4	178	0,0983969	0,41182974	-0,63348525	1,38629436			-0,43072514	-0,70712254	1,64170251	-2,90936818	5,883579159
	6	5	240	0,13266998	0,54449972	-0,2403419	1,60943791			-0,20758159	-0,31397919	1,512558017	-2,67471012	5,861089782
	7	6	271	0,14980652	0,69430625	0,169887476	1,79175947			-0,02526003	0,09625019	-3,810374945	6,99716287	6,273566234
	8	7	201	0,11111111	0,80541736	0,492803177	1,94591015			0,12889065	0,41916589	3,252104703	-5,83550037	6,015722964
	9	8	153	0,08457711	0,88999447	0,791735917	2,07944154			0,26242204	0,71809863	2,736426489	-4,898503	5,99010823
	10	9	93	0,05140962	0,94140409	1,042779017	2,19722458			0,38020508	0,96914173	2,548997329	-4,55794056	5,978267271
	11	10	58	0,03206191	0,973466	1,289047638	2,30258509			0,48556559	1,21541035	2,503081695	-4,47451096	5,975100081
	12	11	33	0,01824212	0,99170813	1,567047873	2,39789527			0,58087577	1,49341058	2,570963798	-4,59785406	5,979743052
	13	12	15	0,00829187	1		2,48490665					1,496825113	-2,64612313	5,931468797
			1809			0,736372894	19,9872145							



Las gráficas de la potencia eólica disponible por unidad de área con respecto a la velocidad del viento de presenta a continuación.

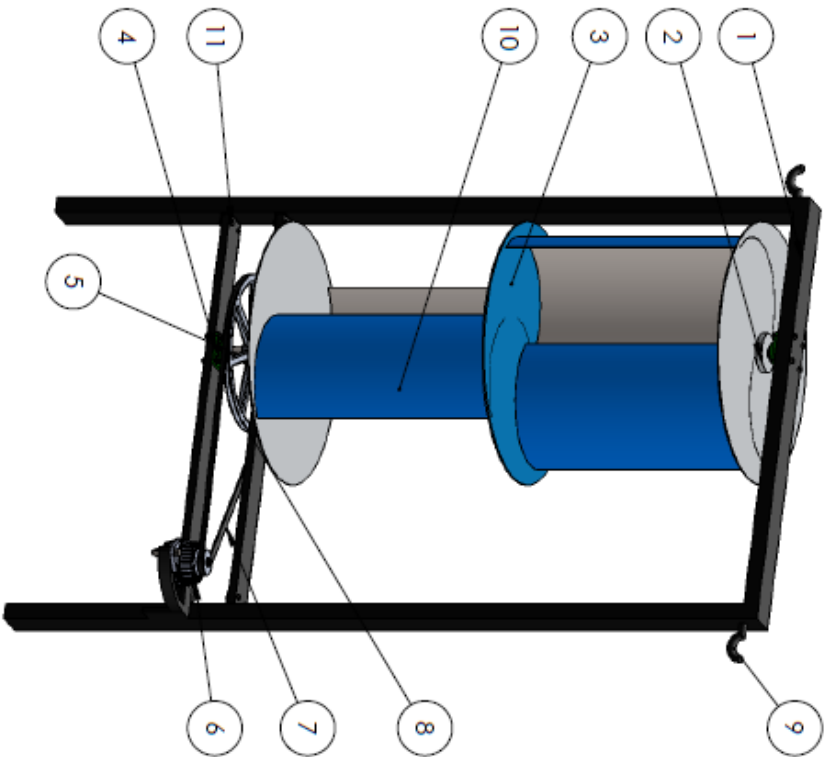


ANEXO C. Planos del aerogenerador.

#	Nombre de la pieza	Cant.
1	Basidor	1
2	Tubo capilar 0,54"	1,30
3	Evaporador de 5/16"	30
4	Carsaza de Protección	1
5	Condensador de tubos de cobre con aletas	1
6	Controlador Full Gauge	1
7	Ventilador elico de 14 w	1
8	Caja de control	1
9	Tubería de 3/8" (Evap- Comp)	-
10	Compresor Tecumseh AE 4440Y- AA1A	1
11	Controlador Intellegent DC-DC SC15A	-
12	Inversor CPI 480	1
13	Batería MTEK: MT1210150	1
14	Tanque de Almacenamiento de agua	1
15	Ruedas con freno	4
16	Tubería 5/16" (Comp- Cond)	1

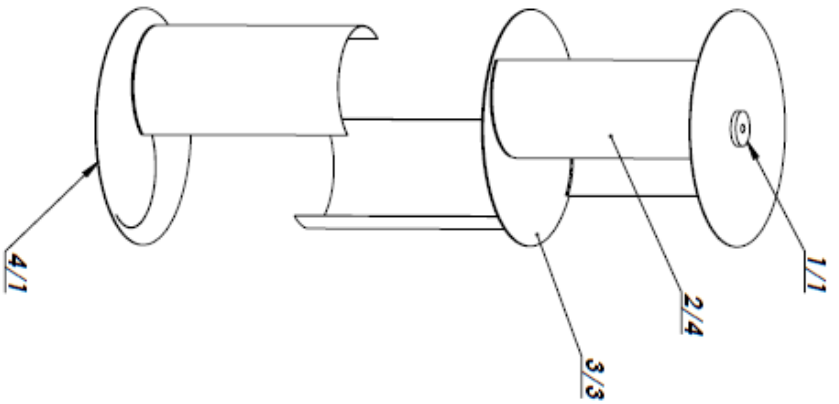
Nombre:	Juan Diaz	Fecha:	
Dibujado:	Fernando Parado		
Comprobado:	Ortiz Garvaz		
Aprobado 1:		SOLIDWORKS	
Aprobado 2:			
Salvo a indicaciones contrarias todas en milímetros angulos en grados y tolerancias de +/- 0,5 y +/- 1.			
Archivo:		Titulo:	
Escala: 1:10		DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MOTOR DE ACIONAMIENTO MECANICO PARA EL COLECTOR	
Formato: A4		Plano: 1	
Revis: 1		Rev: 1	
Autor: Encasible Aerogenerador Savonius		Hojas: 1	

#	Nombre de la pieza	Cant.
1	Estructura del Aerogenerador	1
2	Discos de Aluminio roscados	2
3	Rotor	1
4	Sop. de brida tipo FJ (Y)	3
5	Eje Principal (Rosca Izq.)	1
6	Planta Alternador	1
7	Correa tipo A, en V de 1 HP	1
8	Polea Conductora	1
9	Gancho tipo Tensor	2
10	Alabes	4
11	Pernos de 3/8"	22
12	Eje secundario (rosca der.)	1



Nombre: Juan Diaz		Fecha:	
Dibujado	Fernando Parrado	U.I.S.	
Comprobado	Omar Gavvez		
Aprobado 1			
Aprobado 2		Título: Diseño y construcción de un aerogenerador de generación alternativa de baja potencia accionado mediante energía eólica.	Plano: 2
Salvo a indicaciones contrarias cotas en milímetros angulos en grados y tolerancias de +/- 0.5 y +/- 1.		A4	Rev:
Escala: 1:20	Peso:	Hoja:	

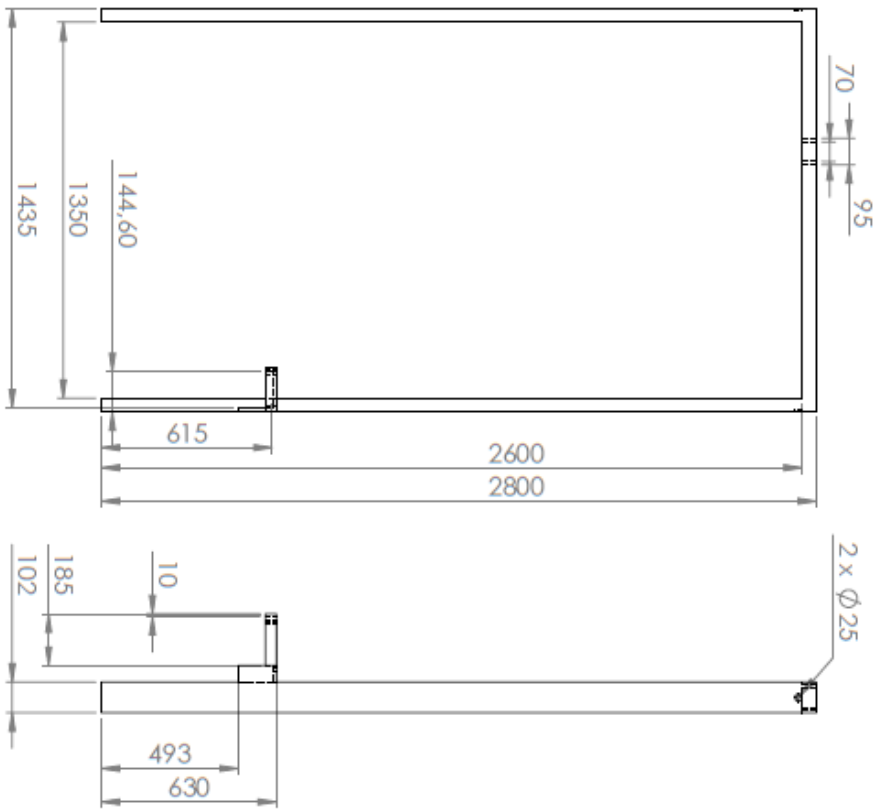
SOLIDWORKS



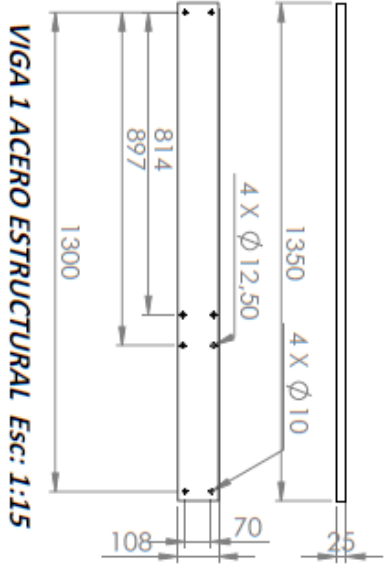
ROTOR ESCALA 1:20

Numero de Elemento	Nombre del Archivo	Especificaciones	Material	Cantidad
1	Disco Superior (Rosca Der)	Ø 127 x 2	Aluminio	1
2	Albe	Ø 500 x 1000	Aluminio	4
3	Soportes Sup,Inf y divisor	Ø 1000 x 2	Aluminio	3
4	Disco Inferior (Rosca Izq)	Ø 127 x 2	Aluminio	1

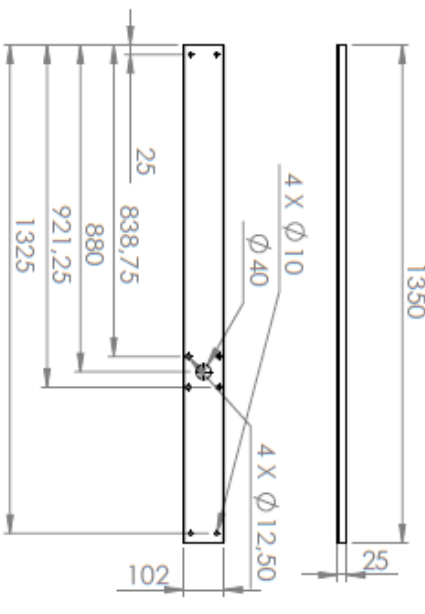
Nombre: Diseñado		Fecha:	
Dibujado			
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2			
<p>Salvo a indicaciones contrarias todas las tolerancias siguen en grados en tolerancias de +/- 0,5 y +/- 1.</p>			
Título:		SOLIDWORKS	
<p>desarrollo y construcción de las piezas para el ensamble con el motor de la aeronave de ala fija para el proyecto de la asignatura de Mecánica de Fluidos</p>		<p>Plano: 4-5 Rev: 4-5</p>	
Archivo: A4		Ensamble Aerogenerador Savonius	
Escala: Escala:		Hoja: 4-5	



ESTRUCTURA Esc: 1:20

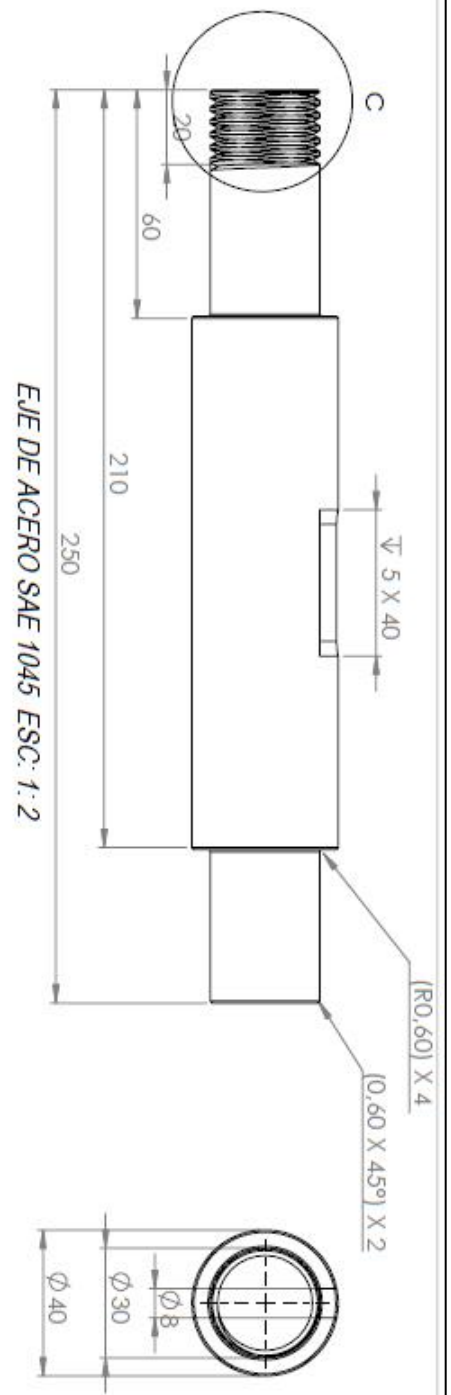


VIGA 1 ACERO ESTRUCTURAL Esc: 1:15

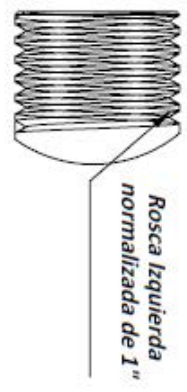


VIGA 2 DE ACERO ESTRUCTURAL Esc: 1:15

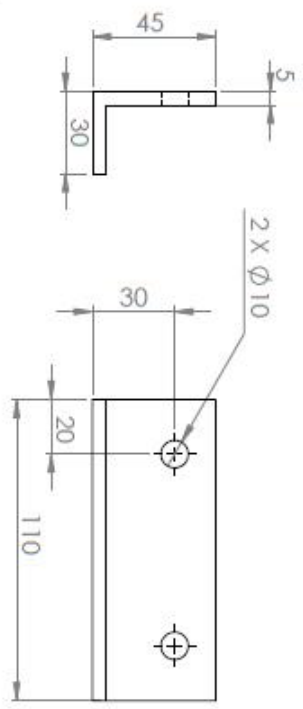
Dibujado	Nombre:	Diseño/Verificado	Fecha:
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2			
<p>Salvo a indicaciones contrarias cotas en milímetros, ángulos en grados y tolerancias de ± 0.5 y ± 1.</p>			
Título:		<p>SOLIDWORKS</p> <p>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROYECTO DE AEROGENERADOR ESTRUCTURAL DE ALTA ALTEZA ACOPLADO MEDIANTE ENRICA EOLICA.</p>	
A4	Formato:	3-5	Rev
Ensamble	Asamblea:	Ensamble Aerogenerador Samonius	
	Escala:		Hoja: 3-5



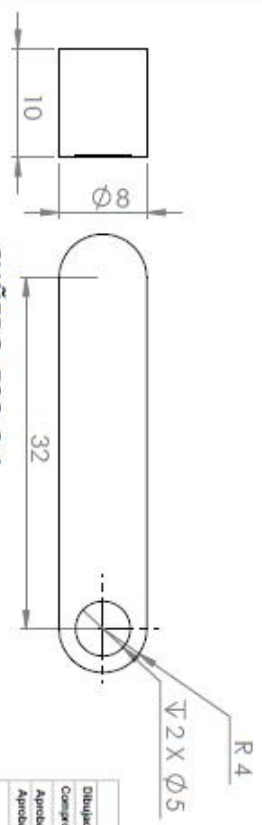
EJE DE ACERO SAE 1045 ESC: 1:2



DETALLE C
ESCALA 1 : 1



ANGULO DE ENLACE ESC: 1:2



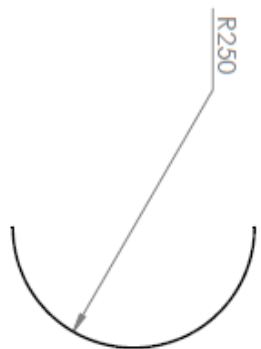
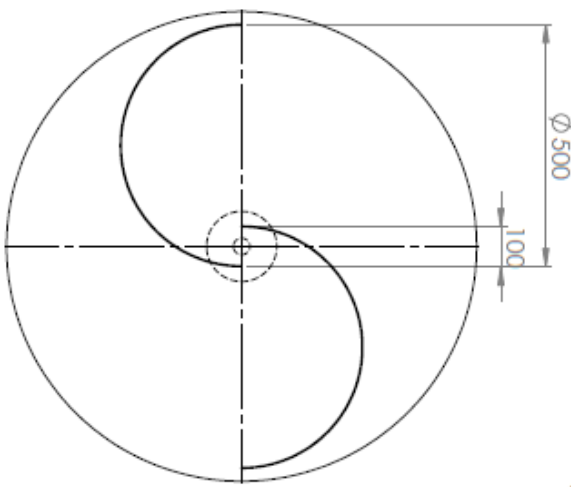
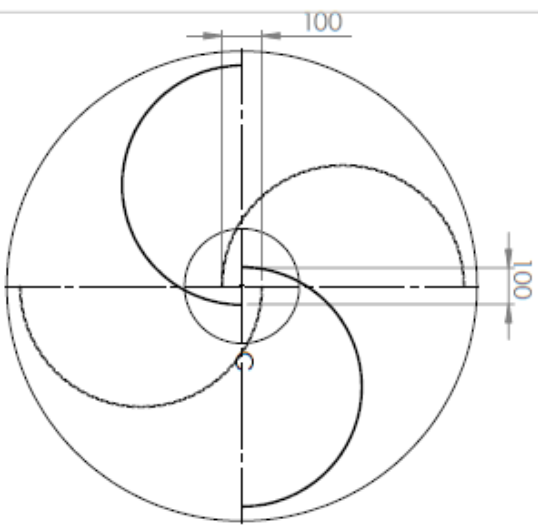
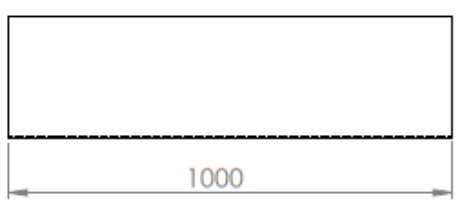
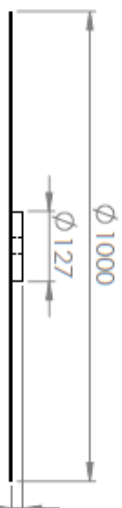
CUÑERO ESC: 2:1

Dibujado	Comprobado	Aprobado 1	Aprobado 2
Nombre:	Diseñado	Fecha:	
SOLIDWORKS			
Titulo: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE ACCIONADO AEROGENERADOR EN EL ESCUELO TECNICO SUPERIOR DE ENGINIERIA			
Archivo:	Plano:	Rev:	
Escala:	Ensamble Aerogenerador Savonius	Hoja:	1-5

Salvo a indicaciones contrarias cotas en milímetros angulos en grados y tolerancias de +/- 0,5 y +/- 1.

DISCO DIVISOR DE ALUMINIO ESC: 1:10 DISCO INF Y SUP. DE ALUMINIO ESC: 1:10

ALABE DE ALUMINIO ESC: 1:10



Alabes a 90° entre la parte Superior e Inferior

DETALLE C
ESCALA 1 : 10

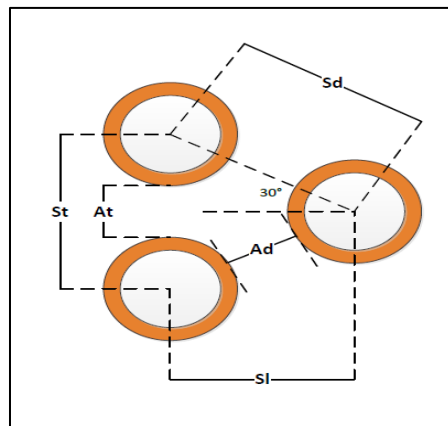
Nombre:		Fecha:	
Dibujado	Diseñador		
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Salvo a indicaciones contrarias todas en milímetros ángulos en grados y tolerancias de +/- 0,5 y +/- 1.			
Título:		Rev:	
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR ALTERNATIVO DE ALTA VELOCIDAD ACCIONADO MEDIANTE FUERZA EOLICA.		A4 Plano: 2-5 Rev	
Escala:	Proy:	Hoja:	2-5
Ensamble Aerogenerador Savonius			

SOLIDWORKS

ANEXO D. Códigos de los cálculos en detalle.

CÓDIGO DE UNA UNIDAD MANEJADORA.

- Unidad manejadora en tubos de cobre de 5/16" de diámetro nominal, con tubería tipo L.
- Sin aletas.
- Arreglo escalonado de 30°.
- Condición de entrada del aire: $T_{amb}=27^{\circ} C$ y humedad relativa de 58%
- Masa de agua a obtener 0.75 Lt/h o 2.0833 Kg/s



Unidad manejadora.

Datos físicos.

$$A_o = 2 \cdot \pi \cdot R_{ext} \cdot L_{ong}$$

$$A_r = 2 \cdot \pi \cdot R_{int} \cdot L_{ong}$$

$$R_{ext} = \frac{7,9375}{2 \cdot 1000}$$

$$e = \frac{0,762}{1000}$$

$$R_{int} = R_{ext} - e$$

$$K_m = 401$$

$$L_{ong} = 30$$

$$D_i = \frac{6,4135}{1000}$$

$$D_{ext} = \frac{7,9375}{1000}$$

$$S_t = 2 \cdot D_{ext}$$

$$S_l = 1 / 2 \cdot S_t \cdot \cos (30)$$

$$S_d = 1 / 2 \cdot S_t \cdot \sin (30)$$

$$A_d = S_d - D_{ext}$$

$$A_t = S_t - D_{ext}$$

Datos atmosféricos de entrada.

$$\dot{m}_r = 0,0066444 \text{ [Kg/seg]}$$

$$\dot{m}_a = \frac{Q \cdot \rho_{airehumedo}}{3600}$$

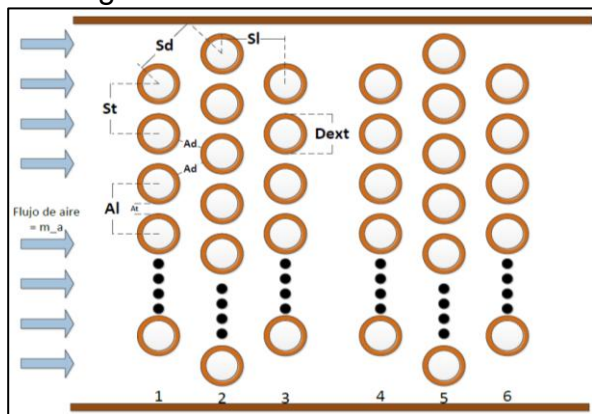
$$P_{atm} = 101,324 \text{ [KPa]}$$

$$T_{a1} = 26,5$$

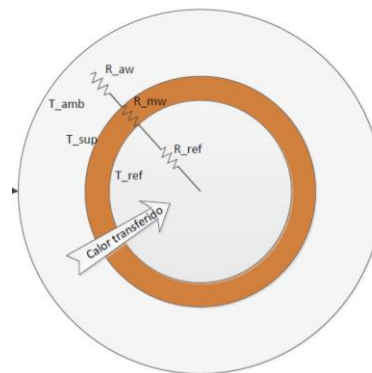
$$rh_{a1} = 0,58$$

$$T_{bh_{a1}} = \mathbf{WB} ('AirH2O' ; T=T_{a1} ; R=rh_{a1} ; P=P_{atm})$$

Datos geométricos.



Calculo de resistencias.



Resistencia del material húmedo.

$$R_{mw} = \frac{e \cdot A_o}{K_m \cdot A_r}$$

$$A_o = 2 \cdot \pi \cdot R_{ext} \cdot L_{ong}$$

$$A_r = 2 \cdot \pi \cdot R_{int} \cdot L_{ong}$$

$$e = \frac{0,762}{1000}$$

$$K_m = 401 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

Resistencia del refrigerante.

$$R_r = \frac{A_o}{h_r \cdot A_r}$$

$$h_r = \frac{0,023 \cdot Re_r^{0,8} \cdot Pr_g^{0,4} \cdot K_g}{D_i}$$

$$Pr_g = Pr ('R134a'; T=Tr_1; x=1)$$

$$K_g = k ('R134a'; T=Tr_1; x=1)$$

$$Re_r = \frac{G_r \cdot D_i}{\nu_r}$$

$$G_r = \frac{\dot{m}_r \cdot 4}{\pi \cdot D_i^2}$$

$$\dot{m}_r = 0,0066444 \text{ [Kg/seg]}$$

$$\nu_r = \text{Visc} ('R134a'; T=Tr_1; x=1)$$

Resistencia del aire húmedo.

$$R_{aw} = \frac{1}{h_o}$$

$$Nus_D = \frac{ha_{seco} \cdot D_{ext}}{K_{aire}}$$

$$K_{aire} = k ('AirH2O'; T=T_m; B=Tbh_{a1}; P=P_{atm})$$

$$T_m = \frac{Ta_1 + Tbh_{a2}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Re_D = \frac{\rho_{airehumedo} \cdot V_{max} \cdot D_i}{\nu_{airehumedo} \cdot 3600}$$

$$\rho_{airehumedo} = \rho ('AirH2O'; T=T_m; B=Tbh_{a1}; P=P_{atm})$$

$$\nu_{airehumedo} = \text{Visc} ('AirH2O'; T=T_m; B=Tbh_{a1}; P=P_{atm})$$

$$V_{max} = \left[\frac{S_t}{S_t - D_{ext}} \right] \cdot V$$

$$\dot{m}_a = \frac{Q \cdot \rho_{airehumedo}}{3600}$$

$$Q = 250 \text{ [m}^3\text{/hora]}$$

$$V = \frac{Q}{A_{proy}}$$

$$Nus_{Df} = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^n \cdot \left[\frac{Pr}{Pr_{g15}} \right]^{0,25}$$

$$Pr = 0,7309$$

$$Pr_{g15} = 0,7323$$

$$C = 0,71$$

$$m = 0,5$$

$$n = 0,36$$

$$ha_{seco} = h_o$$

$$Nus_D = F \cdot Nus_{Df}$$

$$F = 0,945$$

AGUA PRODUCIDA = 0,7667 [L/h]	$A_o = 0,7481 \text{ [m}^2\text{]}$	$C_{eva} = 0,1135$
$\dot{Q}_{LMHD} = 1,569 \text{ [KJ]}$	$\dot{Q}_s = 1,05 \text{ [KJ]}$	$Q_{total} = 1,672 \text{ [KJ]}$
$R_{mw} = 0,02276$	$R_{mw} = 0,00002352$	$R_r = 0,002658$
$Ta_2 = 14 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$Tbh_{s1} = 20,45 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$Tbh_{a2} = 14 \text{ [}^\circ\text{C]}$
$Tr_2 = 1 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$Ts_1 = 6 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$Ts_2 = 3,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Desarrollo de los pasos.

$$Tbh_{a2} = 14 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$ha_2 = h ('AirH2O'; P=P_{atm}; T=Tbh_{a2}; R=0,96)$$

$$Q_{total} = \dot{m}_a \cdot (ha_1 - ha_2)$$

$$Tr_1 = 1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Tr_1 = Tr_2$$

Constante de la unidad manejadora.

$$C_{eva} = \frac{R_{mw} + R_r}{Cp_{air} \cdot R_{aw}}$$

Temperaturas de superficie.

$$Ts_1 = 6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$hs_1 = h ('AirH2O'; T=Ts_1; P=P_{atm}; R=1)$$

$$Ts_2 = 3,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$hs_2 = h ('AirH2O'; T=Ts_2; P=P_{atm}; R=1)$$

En este punto se comprueba lo asumido en los pasos anteriores.

$$C_{p\text{aire}} = 1000 \cdot C_{p\text{air}}$$

$$Q_{\text{totalLMHD}} = \frac{h_o \cdot A_o}{C_{p\text{aire}}} \cdot \text{LMHD}$$

$$\text{LMHD} = \frac{ha_1 - hs_1 - (ha_2 - hs_2)}{\ln \left[\frac{ha_1 - hs_1}{ha_2 - hs_2} \right]}$$

AGUA _{PRODUCIDA} = 0,7667 [L/h]	A _o = 0,7481 [m ²]	C _{eva} = 0,1135	Q̇ _l = 0,5192 [KJ]
Q̇ _{LMHD} = 1,569 [KJ]	Q̇ _s = 1,05 [KJ]	Q̇ _{total} = 1,672 [KJ]	rh _{a1} = 0,58
R _{aw} = 0,02276	R _{mw} = 0,000002352	R _v = 0,002658	T _{a1} = 26,5 [°C]
T _{a2} = 14 [°C]	T _{bh_{a1}} = 20,45 [°C]	T _{bh_{a2}} = 14 [°C]	T _{r1} = 1 [°C]
T _{r2} = 1 [°C]	T _{s1} = 6 [°C]	T _{s2} = 3,8 [°C]	

AGUA _{PRODUCIDA} = 0,7667 [L/h]	A _o = 0,7481 [m ²]	C _{eva} = 0,1135
Q̇ _l = 0,5192 [KJ]	Q̇ _{LMHD} = 1,569 [KJ]	Q̇ _s = 1,05 [KJ]
Q̇ _{total} = 1,672 [KJ]	rh _{a1} = 0,58	R _{aw} = 0,02276
R _{mw} = 0,000002352	R _v = 0,002658	T _{a1} = 26,5 [°C]
T _{a2} = 14 [°C]	T _{bh_{a1}} = 20,45 [°C]	T _{bh_{a2}} = 14 [°C]
T _{r1} = 1 [°C]	T _{r2} = 1 [°C]	T _{s1} = 6 [°C]
T _{s2} = 3,8 [°C]		

Para las condiciones mas adversas del día el generador de agua puede condensar 0,75 Lt/hora.

Una vez verificado que los valores asumidos son los correctos, se continúa con el método.

$$NTU = \frac{h_o \cdot A_o}{\dot{m}_a \cdot C_{p\text{air}}}$$

$$E_e = 1 - \exp(-NTU)$$

$$E_e = \frac{ha_1 - ha_2}{ha_1 - hs_{\text{sat}}}$$

$$T_{s\text{sat}} = 14 \text{ [°C]}$$

$$E_e = \frac{T_{a1} - T_{a2}}{T_{a1} - T_{s\text{sat}}}$$

$$\omega_1 = \omega ('AirH_2O'; T=T_{a1}; B=T_{bh_{a1}}; P=P_{\text{atm}})$$

$$\omega_2 = \omega ('AirH_2O'; T=T_{a2}; B=T_{bh_{a2}}; P=P_{\text{atm}})$$

$$\dot{Q}_s = \frac{\dot{m}_a \cdot C_{p\text{aire}} \cdot (T_{a1} - T_{a2})}{1000}$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_a \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot h_{fg}$$

$$h_{fg} = 2437,6$$

Agua condensada.

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot h_{fg}$$

$$AGUA_{\text{PRODUCIDA}} = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot 3600$$

CÓDIGO PARA DETERMINAR LOS INDICES ENERGÉTICOS.

Para los siguientes valores se determina el Vf_{is}.

$$\begin{aligned} T_{ev} &= 5 \\ T_{cv} &= 40 \\ T_{scv} &= T_{ev} + 10 \\ Q_o &= 1,248 \text{ [KJ/Seg]} \end{aligned}$$

Con las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} T_{scv} &= T_{ev} + 10 \\ Q_o &= 1,248 \text{ [KJ/Seg]} \\ Q_o &= \rho_v \cdot V_{fis} \cdot RPM_{rads} \cdot eficiencia_v \cdot (h_{1v} - h_{4v}) \\ \rho_v &= \rho ('R134a'; T=T_{ev}; x=1) \\ RPM_{rads} &= f \cdot 2 \cdot \pi \\ f &= 60 \\ eficiencia_v &= 1 - 0,08 \cdot \left[\left(\frac{P_{condv}}{P_{evapv}} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)} - 1 \right] \\ n &= 1,21 \\ P_{evapv} &= P ('R134a'; T=T_{ev}; x=1) \\ P_{condv} &= P ('R134a'; T=T_{cv}; x=0) \\ h_{1v} &= h ('R134a'; T=T_{scv}; x=1) \\ h_{4v} &= h ('R134a'; T=T_{cv}; x=0) \end{aligned}$$

Una vez se encuentra el Vf_{is}, se pueden determinar los estados en el diagrama P-h y determinar los índices energéticos del sistema.

Para estos valores se determinan los índices característicos.

$$\begin{aligned} T_e &= 1 \\ T_c &= 40 \\ T_{sc} &= T_e + 10 \end{aligned}$$

Con un procedimiento similar se determinan los índices.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ext} &= \rho_1 \cdot V_{fis} \cdot RPM_{rads} \cdot eficiencia_1 \cdot (h_1 - h_4) \\ \rho_1 &= \rho ('R134a'; T=T_e; x=1) \\ eficiencia_1 &= 1 - 0,08 \cdot \left[\left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)} - 1 \right] \\ P_{evap} &= P ('R134a'; T=T_e; x=1) \\ P_{cond} &= P ('R134a'; T=T_c; x=0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= h ('R134a'; T=T_{sc}; x=1) \\ h_4 &= h ('R134a'; P=P_{cond}; x=0) \\ h_2 &= h ('R134a'; T=T_c; x=1) \\ h_3 &= h_4 \end{aligned}$$

COP

$$\begin{aligned} COP &= \frac{\dot{Q}_{ext}}{W_{ent}} \\ \dot{W}_{ent} &= 0,464 \text{ [W]} \end{aligned}$$

EER

$$\begin{aligned} EER &= \frac{Q_{remov}}{W_{ent}} \\ Q_{remov} &= 0,8693 \end{aligned}$$

Resultados

COP = 2,249	EER = 1,873	eficiencia ₁ = 0,8628	eficiencia _v = 0,8868
f = 60	h ₁ = 256,7 [KJ/Kg]	h _{1v} = 258,9	h ₂ = 271,3
h ₃ = 108,3	h ₄ = 108,3 [KJ/Kg]	h _{4v} = 108,3	n = 1,21
P _{cond} = 1017 [kPa]	P _{condv} = 1017	P _{evap} = 303,8 [kPa]	P _{evapv} = 349,9
Q _{ext} = 1,044	Q _o = 1,248 [KJ/Seg]	Q _{remov} = 0,8693	ρ ₁ = 14,95
ρ _v = 17,14	RPM _{rads} = 377	T _c = 40	T _{cv} = 40
T _e = 1	T _{ev} = 5	T _{sc} = 11	T _{scv} = 15
V _{fis} = 0,000001445	W _{ent} = 0,464 [W]		

PARAMETRIZACIÓN PARA ENCONTRAR EL COMPORTAMIENTO DEL SUBSISTEMA GENERADOR DE AGUA.

Utilizando el código de una unidad manejadora, se ocultó la variable Ta_1a Ta_1.

Variación de Ta_1 y humedad relativa 90%

1.20	1 Ta ₁	2 Q _{total}	3 Q̇ _{LMHD}	4 AGUA _{PRODUCID}
Run 1	15	0,08619	0,00336	-0,122
Run 2	16	0,308	0,2206	0,0724
Run 3	17	0,5367	0,4445	0,2771
Run 4	18	0,7728	0,6755	0,4927
Run 5	19	1,016	0,9138	0,7197
Run 6	20	1,268	1,16	0,9585
Run 7	21	1,528	1,414	1,21
Run 8	22	1,797	1,677	1,474
Run 9	23	2,075	1,948	1,751
Run 10	24	2,363	2,229	2,043
Run 11	25	2,66	2,519	2,349
Run 12	26	2,968	2,819	2,671
Run 13	27	3,287	3,13	3,008
Run 14	28	3,617	3,452	3,362
Run 15	29	3,959	3,785	3,734
Run 16	30	4,314	4,13	4,123
Run 17	31	4,681	4,488	4,531
Run 18	32	5,061	4,858	4,958
Run 19	33	5,456	5,242	5,406
Run 20	34	5,865	5,64	5,874

Variación de Ta_1 y humedad relativa 80%

1.20	1 Ta ₁	2 Q _{total}	3 Q̇ _{LMHD}	4 AGUA _{PRODUCID}
Run 1	15	-0,1427	-0,2176	-0,4482
Run 2	16	0,06444	-0,01449	-0,2747
Run 3	17	0,2777	0,1945	-0,09203
Run 4	18	0,4974	0,4097	0,1003
Run 5	19	0,7238	0,6314	0,3027
Run 6	20	0,9574	0,8599	0,5157
Run 7	21	1,198	1,096	0,7396
Run 8	22	1,447	1,339	0,9751
Run 9	23	1,704	1,59	1,222
Run 10	24	1,969	1,849	1,482
Run 11	25	2,243	2,116	1,755
Run 12	26	2,526	2,393	2,042
Run 13	27	2,819	2,679	2,343
Run 14	28	3,122	2,974	2,658
Run 15	29	3,436	3,28	2,989
Run 16	30	3,76	3,596	3,335
Run 17	31	4,096	3,923	3,699
Run 18	32	4,444	4,262	4,079
Run 19	33	4,804	4,612	4,478
Run 20	34	5,177	4,975	4,895

Variación de Ta_1 y humedad relativa 70%

1.20	1 Ta ₁	2 Q _{total}	3 Q̇ _{LMHD}	4 AGUA _{PRODUCID}
Run 1	15	-0,1427	-0,2176	-0,4482
Run 2	16	0,06444	-0,01449	-0,2747
Run 3	17	0,2777	0,1945	-0,09203
Run 4	18	0,4974	0,4097	0,1003
Run 5	19	0,7238	0,6314	0,3027
Run 6	20	0,9574	0,8599	0,5157
Run 7	21	1,198	1,096	0,7396
Run 8	22	1,447	1,339	0,9751
Run 9	23	1,704	1,59	1,222
Run 10	24	1,969	1,849	1,482
Run 11	25	2,243	2,116	1,755
Run 12	26	2,526	2,393	2,042
Run 13	27	2,819	2,679	2,343
Run 14	28	3,122	2,974	2,658
Run 15	29	3,436	3,28	2,989
Run 16	30	3,76	3,596	3,335
Run 17	31	4,096	3,923	3,699
Run 18	32	4,444	4,262	4,079
Run 19	33	4,804	4,612	4,478
Run 20	34	5,177	4,975	4,895