



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

SEMARNAT

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE

SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA

INFORME FINAL

USO DE ENERGÍA RENOVABLE CON TECNOLOGÍA PROPIA PARA SU APLICACIÓN EN EL
SUBSECTOR AGRÍCOLA

PROYECTO INTERNO

RD-1206.1



Dic. 2012.

Directorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Director General

Dr. Polioptro Martínez Austria

Coordinador de Riego y Drenaje

M.C. Fernando Fragoza Díaz

Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Dr. Heber Saucedo Rojas

Dr. J. Javier Ramírez Luna

Jefe de proyecto

Subordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola

Equipo técnico

M.I. Cesar Guillermo Calderón Mólgora. Esp. En Hidráulica de la Subcoordinación de Potabilización

M.C. Olga Xóchitl Cisneros Estrada Esp. En Hidráulica de la Subcoordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola

Apoyos:

Ing. Edson Giovanni Rodríguez Gómez.

Lic. Zenaida García Galván

RESUMEN EJECUTIVO

La población de México rebasa ya los 112 millones de habitantes y el reto nacional actualmente es incrementar la producción agrícola utilizando menos recursos hídricos. En este contexto se debe fomentar el uso de energías renovables, que en México posee alto potencial, principalmente en las zonas con déficit de lluvia, donde el uso de energía renovable y la cosecha de agua combinadas con agricultura protegida para el desarrollo de la actividad agrícola representa una opción para satisfacer la demanda creciente de alimentos.

La energía renovable es aplicable en la generación de iluminación, en la desalación y depuración de agua, en el bombeo agrícola, en la producción de peces y en general toda aplicación que requiera sustituir el suministro de energía eléctrica convencional.

En el sol está en el origen de todas las energías renovables, incluso provoca en la tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos: fuente de la energía eólica.

La energía solar se fundamenta en el aprovechamiento de la radiación solar para la obtención de energía que podemos aprovechar directamente al convertirla en electricidad. La energía solar fotovoltaica permite transformar en electricidad la radiación solar a través de unas células fotovoltaicas o placas solares. La electricidad producida puede usarse de manera directa, o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. La energía solar fotovoltaica tiene numerosas aplicaciones. • Funcionamiento de aparatos de consumo pequeño. • Electrificación de viviendas o núcleos de población aislados. • Señalizaciones terrestres y marítimas. • Comunicaciones o iluminación pública. • Bombeo de agua para riego (presurizado y plasticultura en zonas aisladas)

Una de las energías renovables más competitivas es la eólica, la energía del viento se deriva del calentamiento diferencial de la atmósfera por el sol, y las irregularidades de la superficie terrestre. Aunque sólo una pequeña parte de la energía solar que llega a la tierra se convierte en energía cinética del viento, la cantidad total es enorme. Con la ayuda de los aerogeneradores o generadores eólicos se puede convertir la fuerza del viento en electricidad. Éstos tienen usos muy diversos y pueden satisfacer demandas de pequeña potencia (bombeo de agua, electrificación rural, etc.) o agruparse y formar parques eólicos conectados a la red eléctrica. La energía eólica es en la actualidad una de las energías renovables más competitivas.

En este contexto el grupo de la Subcoordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola del IMTA, se planteó como objetivo del presente proyecto adaptar tecnologías para la generación (ecológicas y económicas) de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos y

aerogeneradores aplicados a la desalación de agua de riego y al bombeo para suministro de agua en agricultura.

Como resultado del proyecto se desarrolló en conjunto con la Subcoordinación de potabilización un prototipo de ósmosis inversa para tratar 25 L/s, el equipo consta de 2 módulos de 12.5 L/s de capacidad cada uno. El diseño se efectuó para una recuperación de 50% del agua, dadas las altas concentraciones de sulfato de calcio y de sílice en el agua, que le confieren un gran potencial de incrustación. Dado que la mayor parte de las sales de la fuente de suministro está en forma de sulfatos, se considera que la nanofiltración es una alternativa viable para producir agua de riego apta para la producción agrícola, en mayor proporción y con un consumo sustancialmente menor de energía.

Dado que el proyecto es un sistema híbrido el equipo de la Subcoordinación de Drenaje y Contaminación Agrícola, desarrollaron un diseño, donde: 1) Para el funcionamiento de la primera bomba se usaría un aerogenerador aprovechando la energía cinética del aire en movimiento transformando la energía cinética en energía eléctrica. 2) Así mismo para el funcionamiento de la segunda bomba se diseñaron e instalaron paneles solares. La instalación se realizó en paralelo, con un arreglo de 9 paneles solares de 110 Watts que es el kW requerido por la bomba que impulsará el sistema de riego, para abastecer de agua a la parcela. Sin embargo dado que en la zona donde se desarrolló el proyecto (Jalpan Querétaro) se presentan rachas de viento extremo con periodos de no viento, se observó que esto provoca un sobre calentamiento de la bomba, dañando los componentes eléctricos, por lo cual finalmente se llegó a la conclusión de que la aplicación del aerogenerador no constituía una solución apropiada para impulsar el bombeo para riego en la zona, considerándose como única alternativa de impulsión de las bombas, el uso de los paneles solares.

INDICE DE CONTENIDO

I.	ANTECEDENTES.....	6
II.	OBJETIVOS.....	7
III.	RESULTADOS.....	7
III.1	Desarrollo Tecnológico para la desalación de agua salobre con generación híbrida de paneles solares y aerogeneradores.....	7
III.1.1	Diseño del sistema piloto de nanofiltración.....	8
III.1.2	Diseño asistido por computadora.....	10
III.1.2.1	Primer caso Diseño con membrana NF90-4040 (Filmtec ROSA).....	11
III.1.2.2	Segundo caso Diseño con el software CSMPRO4.....	14
III.1.3	Construcción del Prototipo para la desalación del agua de riego.....	16
III.1.3.1	Características constructivas del banco de nanofiltración.....	16
III.1.3.2	Prefiltros (filtro cartucho).....	18
III.1.3.3	Bomba dosificadora.....	18
III.1.3.4	Membranas.....	21
III.1.4	Ajuste del diseño.....	22
III.2	Desarrollo tecnológico para bombeo con energía fotovoltaica y eólica, empleando tanques elevados.....	24
III.2.1	Selección de la bomba.....	24
III.2.2	Paneles solares.....	24
III.2.2.1	Proceso de construcción.....	25
III.2.3	Aerogeneradores.....	32
III.2.3.1	Energía útil del Viento.....	32
III.2.3.2	Curvas de potencia.....	33
III.2.3.3	Parámetros de diseño.....	34
III.2.3.3.1	Relación de velocidad periférica TSR.....	34
III.2.3.3.2	Relaciones prácticas entre C_x y C_y	34
III.2.3.3.3	Factor de actividad, Fa	36
III.2.3.3.4	Rendimiento aerodinámico η	37
III.2.3.4	Dimensionado de un rotor eólico.....	40
III.2.3.4.1	Área frontal barrida por la pala.....	40
III.2.3.4.2	Tamaño de las palas y coeficiente de solidez.....	43

III.2.3.5 Resistencia aerodinámica del rotor	44
III.2.3.5.1 Fuerza centrífuga	44
III.2.3.5.2 Resistencia aerodinámica de la pala	44
III.2.3.5.3 Diseño y calculo simplificado de los aerogeneradores eólicos.....	46
III.2.3.5.3.1 Acoplamiento rotor eólico-generador eléctrico	46
III.2.3.5.3.1 Planos de diseño de la estructura base del aerogenerador.....	54
III.2.3.5.3.3 Diseño del proceso de construcción	58
III.2.3.6 Análisis de la viabilidad técnica del uso del aerogenerador para la zona de proyecto.	67
III.2.4 Cárcamo, tanque de almacenamiento, y sistema de riego.....	68
III.2.5 Sistema de riego.....	73

INDICE DE TABLAS

Tabla III.1 Características de las corrientes del proceso de ósmosis inversa.	8
Tabla III.2 Características del sistema de nanofiltración.	12
Tabla III.3 Balance hidráulico y de presiones en el sistema.	12
Tabla III.4 Calidad del agua para las distintas corrientes del sistema.	13
Tabla III.5 Balance de materia y presiones en las distintas etapas del proceso.	14
Tabla III.6 Características del sistema de nanofiltración.	14
Tabla III.7 Calidad del agua en las distintas etapas del proceso.	15
Tabla III. 8 Balance de materia (Agua y sales) y de presiones en el prototipo.	22
Tabla III.9 Especificaciones para aerogeneradores de eje horizontal.	36
Tabla III.10 Valores del factor de potencia F.	42
Tabla III.11 Factores de corrección de la densidad del aire.	42
Tabla III.12 Valores estimados de eficiencia para pequeños aerogeneradores.	42
Tabla III.13 Diámetros de Aeroturbinas pequeñas tipo hélice.	46
Tabla III.14 Número de palas en función del TSR.	47

INDICE DE FIGURAS

Figura III.1 Recuperación máxima del agua considerando antiincrustante para sílice (Vitec, 4000).	9
Figura III.2 Recuperación máxima considerando antiincrustante para sulfato de calcio (Vitec 7000).....	10
Figura III.3 Diagrama de flujo del piloto de nanofiltración (Diseño con el software denominado ROSA). 11	11
Figura III.4 Diagrama de flujo del proceso.	14
Figura III. 5 Diagrama de especificaciones de la vasija de presión a utilizar en el banco de nanofiltración.	17
Figura III.6 Dimensiones exteriores del filtro cartucho.....	19
Figura III.7 Dimensiones de la bomba dosificadora.	20
Figura III.8 Curva de desempeño de la bomba dosificadora.	21
Figura III.9 Diagrama de flujo del proceso.	22
Figura III.10 Sistema de nanofiltración impulsado por energía solar.	23
Figura III.11 Celdas solares con el cable ya soldado.	26
Figura III.12 Cristales de las caras de los paneles	26
Figura III.13 Soldado de los 6 polos por celda.....	26
Figura III.14 Soldadura entre celdas	27
Figura III. 15 Terminado del proceso de soldado de la hilera de celdas.....	27
Figura III.16 Hileras de celdas montadas sobre el cristal de fondo.	28
Figura III.17 Esquema del proceso de armado entre hileras de paneles ya soldados.	28
Figura III.18 Proceso de soldado entre celdas	29
Figura III.19 Proceso de soldado entre polos.....	30
Figura III.20 Colocación de silicón transparente en las orillas del panel.	30
Figura III.21 Colocación del marco de aluminio.....	31
Figura III.22 Prueba de funcionamiento del panel.....	31
Figura III. 23 Panel solar terminado	32
Figura III.24 Área A barrida por el rotor de diámetro D.....	33
Figura III.25 Coeficientes de arrastre y de sustentación del perfil FX60-126	35
Figura III.26 Coeficientes de arrastre y de sustentación en función de α	37
Figura III.27 Relación entre el rendimiento aerodinámico TSR y el Número de palas para D/L.....	38
Figura III. 28 Relación entre el rendimiento aerodinámico,	38
Figura III.29 Relación entre el coeficiente de par y el TSR.	38
Figura III.30. Curvas ($\eta_{aerod} - TSR$)	38
Figura III.31 Curvas ($\eta_{aerod} - TSR$), para hélices.....	39
Figura III.32 Relación entre la fuerza tangencial y la longitud de la pala.....	40
Figura III. 33 Relación entre el coeficiente de solidez Ω y el TSR	43
Figura III.34 Secciones de una pala del aerogenerador.	47
Figura III.35 Valores del SR y del SP en función del ángulo θ	48
Figura III.36 Valores de θ y de SP en función del SR.....	49
Figura III. 37 Esquema del disco de hierro con la disposición de los imanes.....	50
Figura III.38 Esquema de la ubicación de las bobinas en la cara posterior del disco	50
Figura III. 39 Esquema gráfico de la obtención de la fuerza electromotriz inducida.....	51

Figura III.40 Esquema de ubicación de la espira y el imán en el disco	52
Figura III. 41 Esquema de la colocación de las bobinas y los imanes.	53
Figura III.42 Plano de la estructura de ensamble de la base del aerogenerador.	54
Figura III.43 Plano de base del estator.....	54
Figura III.44 Plano de base del rotor.....	55
Figura III.45 Plano del diagrama de conexión de bobinas.	55
Figura III.46 Plano para la colocación de imanes.	56
Figura III.47 Plano de montaje del rotor, parte 1.	56
Figura III.48 Plano de montaje del rotor, parte 2.	57
Figura III.49 Plano de la estructura del rotor.	57
Figura III.50 Plantilla para la colocación de los imanes.....	58
Figura III.51 Cárcamo de bombeo.....	69
Figura III.52 Tanque de almacenamiento elevado.....	70
Figura III. 53 Bombas sumergibles para bombeo del riego	71
Figura III.54 Instalación de los paneles solares que generarán la energía para impulsar las bombas.	71
Figura III. 55 Instalación del sistema de riego.....	72
Figura III.56 Líneas regantes del sistema de riego.	74

I. ANTECEDENTES

La población de México rebasa ya los 112 millones de habitantes y el reto nacional actualmente es incrementar la producción agrícola utilizando menos recursos hídricos. En este contexto se debe fomentar el uso de energías renovables, que en México posee alto potencial, principalmente en las zonas con déficit de lluvia, donde el uso de energía renovable y la cosecha de agua combinadas con agricultura protegida para el desarrollo de la actividad agrícola representa una opción para satisfacer la demanda creciente de alimentos.

La energía renovable es aplicable en la generación de iluminación, en la desalación y depuración de agua, en el bombeo agrícola, en la producción de peces y en general toda aplicación que requiera sustituir el suministro de energía eléctrica convencional.

En el sol está en el origen de todas las energías renovables, incluso provoca en la tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos: fuente de la energía eólica.

La energía solar se fundamenta en el aprovechamiento de la radiación solar para la obtención de energía que podemos aprovechar directamente al convertirla en electricidad. La energía solar fotovoltaica permite transformar en electricidad la radiación solar a través de unas células fotovoltaicas o placas solares. La electricidad producida puede usarse de manera directa, o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. La energía solar fotovoltaica tiene numerosas aplicaciones. • Funcionamiento de aparatos de consumo pequeño. • Electrificación de viviendas o núcleos de población aislados. • Señalizaciones terrestres y marítimas. • Comunicaciones o iluminación pública. • Bombeo de agua para riego (presurizado y plasticultura en zonas aisladas)

Una de las energías renovables más competitivas es la eólica, la energía del viento se deriva del calentamiento diferencial de la atmósfera por el sol, y las irregularidades de la superficie terrestre. Aunque sólo una pequeña parte de la energía solar que llega a la tierra se convierte en energía cinética del viento, la cantidad total es enorme. Con la ayuda de los aerogeneradores o generadores eólicos se puede convertir la fuerza del viento en electricidad. Éstos tienen usos muy diversos y pueden satisfacer demandas de pequeña potencia (bombeo de agua, electrificación rural, etc.) o agruparse y formar parques eólicos conectados a la red eléctrica. La energía eólica es en la actualidad una de las energías renovables más competitivas.

II. OBJETIVOS

- Un desarrollo tecnológico para la desalación de agua salobre con generación híbrida de paneles solares y aerogeneradores.
- Un desarrollo tecnológico para bombeo con energía fotovoltaica y eólica, empleando tanques elevados para disminuir la necesidad de baterías de almacenamiento de la energía generada.

III. RESULTADOS

III.1 Desarrollo Tecnológico para la desalación de agua salobre con generación híbrida de paneles solares y aerogeneradores

En el año 2007 el IMTA llevó a cabo un estudio para el vivero Santa Rita, que se ubica en el municipio de Río Verde, San Luis Potosí; que perseguía, entre otros objetivos, el tratamiento del agua proveniente de las fuentes subterráneas locales con alto contenido de sólidos disueltos totales especialmente de calcio (659 mg/L), sodio (207 mg/L) y sulfatos (2,194 mg/L), la presencia del sodio y del exceso de sulfatos impide el uso de esta agua para el cultivo hidropónico de jitomate.

La ósmosis inversa se comprobó como una alternativa adecuada para el aprovechamiento de dicha fuente ya que se produjo agua, con una planta piloto, con un contenido de sólidos disueltos inferior a los 16 mg/L.

Con los resultados obtenidos se diseñó una planta de ósmosis inversa para tratar 25 L/s, la planta consta de 2 módulos de 12.5 L/s de capacidad cada módulo. El diseño se efectuó para una recuperación de 50% del agua, dadas las altas concentraciones de sulfato de calcio y de sílice en el agua, que le confieren un gran potencial de incrustación.

Dado que la mayor parte de las sales está en forma de sulfatos, se considera que la nanofiltración es una alternativa viable para producir agua de riego apta para la producción de jitomate, en mayor proporción y con un consumo sustancialmente menor de energía.

III.1.1 Diseño del sistema piloto de nanofiltración

Como primer paso del diseño se considerará la calidad del agua de la fuente de suministro, la tabla III.1 muestra las características fisicoquímicas del agua a tratar.

Tabla III.1 Características de las corrientes del proceso de ósmosis inversa.

Parámetro	Agua cruda	Permeado	Rechazo
Calcio	659.00	2.13	1,315.74
Magnesio	105.00	0.35	209.63
Sodio	207.90	2.18	413.53
Potasio	39.80	0.47	79.11
NH ₄	0.00	0.00	0.00
Bario	0.00	0.00	0.00
Estroncio	0.00	0.00	0.00
Hierro	0.00	0.00	0.00
Aluminio	0.00	0.00	0.00
Bicarbonatos	197.00	2.56	390.06
Cloruros	88.00	0.92	175.04
Sulfatos	2,194.00	7.69	4,379.85
Fluoruros	2.70	0.01	5.38
Nitratos	0.50	0.01	0.99
Fosfatos	0.50	0.00	1.00
Silice	72.00	0.57	143.43
Carbonatos	0.48	0.00	2.28
CO ₂	12.32	12.31	12.27
SDT	3,566.88	16.90	7,116.05
Fuerza iónica	0.10	0.00	0.19
pH	7.30	5.52	7.57

Se consideró utilizar membranas de nanofiltración con rechazos nominales de 70% de NaCl. Este tipo de membranas presenta además un rechazo de sílice mucho menor que el de las membranas de ósmosis inversa por lo que el potencial de incrustación del agua sobre las membranas es de menor intensidad, así la recuperación de agua estará definida por el sulfato de calcio.

Tomando lo anterior en cuenta se determinó el nivel de recuperación máxima del agua que se puede lograr, para ello se utilizó un software comercial Avista Advisor 3. En las figuras III.1 y III.2 se muestran distintos escenarios de recuperación de agua, para ello se seleccionan dos antiincrustantes diferentes, uno especial para sílice y otro para sulfato de calcio.

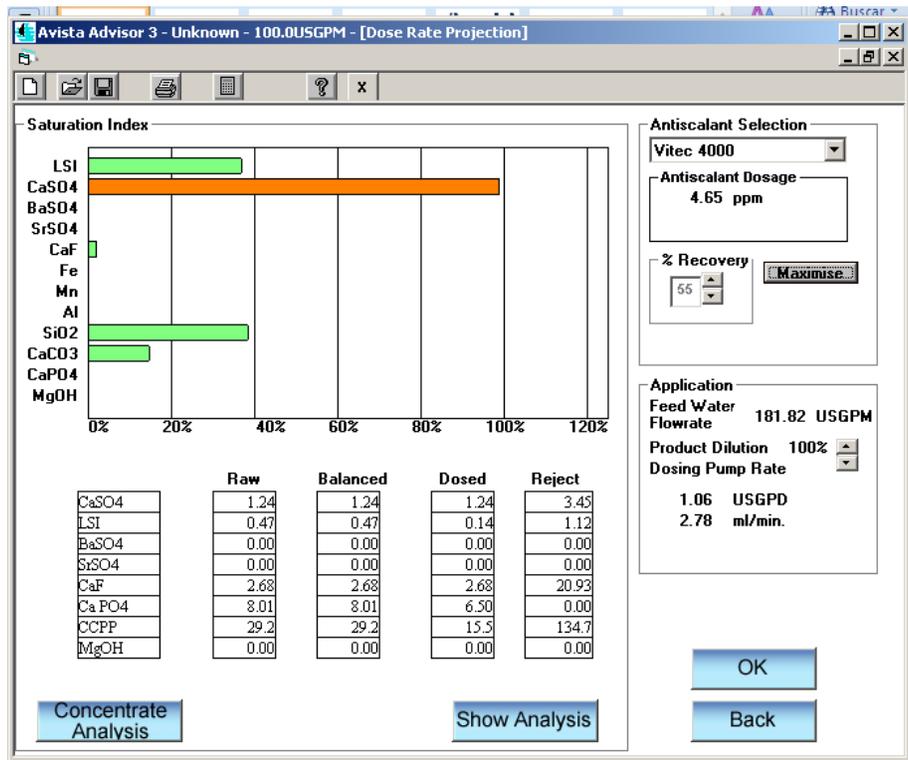


Figura III.1 Recuperación máxima del agua considerando antiincrustante para sílice (Vitec, 4000).

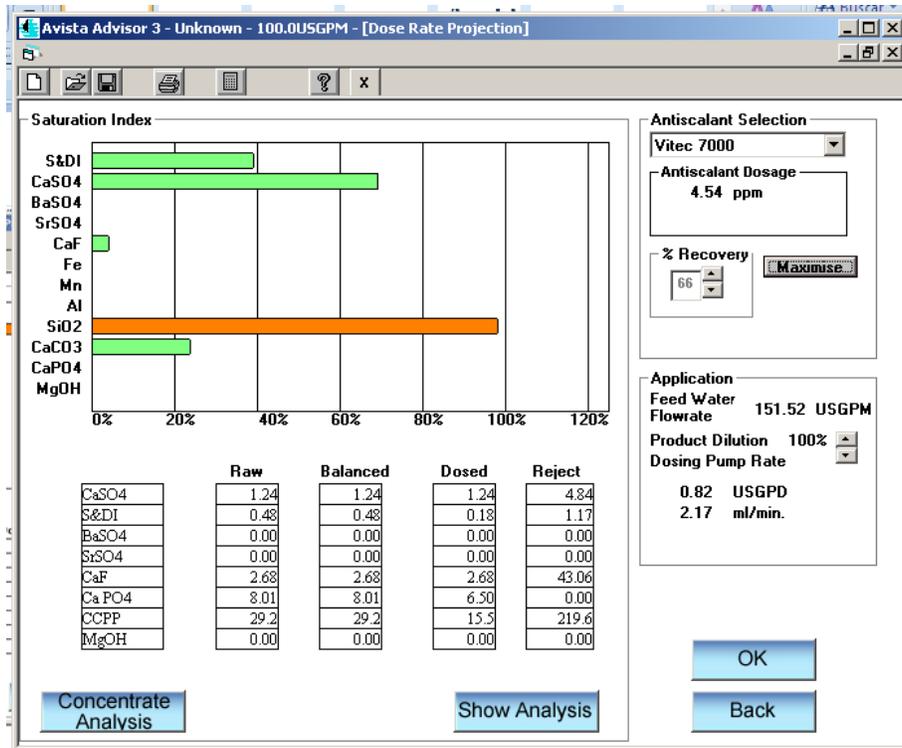


Figura III.2 Recuperación máxima considerando antiincrustante para sulfato de calcio (Vitec 7000).

Como se puede observar en las figuras anteriores el nivel máximo de recuperación del agua es de 55% cuando se utiliza el antiincrustante especial para sílice (figura III.1) y el factor de mayor peso es el sulfato de calcio. A su vez, en la figura III.2 se observa que el nivel máximo de recuperación del agua es de 64% y el factor limitante es el sílice. Por ello, este escenario será la base para el diseño del sistema piloto.

Con el objetivo de optimizar espacios, el diseño del piloto se realiza utilizando vasijas de presión de 3 membranas de 4" X 40" en una arreglo 2:1. Con esta configuración la recuperación hidráulica máxima es de 58%, pero utilizando una recirculación del agua de rechazo, se elevará la productividad del sistema a 64%.

III.1.2 Diseño asistido por computadora

El diseño del sistema se efectuó con base en 2 software's de uso gratuito: ROSA y CSMPRO4 de las casas Filmtec (Dow) y CSM respectivamente, la membrana a utilizar es de nanofiltración con un rechazo nominal de 90%.

III.1.2.1 Primer caso Diseño con membrana NF90-4040 (Filmtec ROSA).

En la figura III.3 se muestra el diagrama de flujo del proceso incluyendo el balance hidráulico,

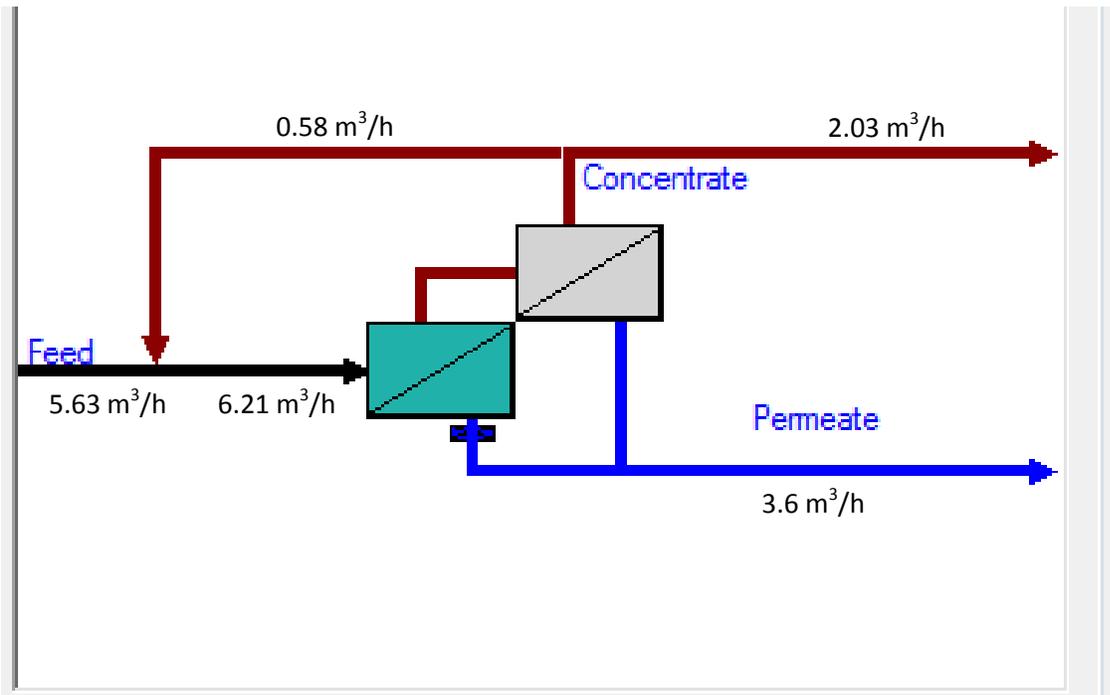


Figura III.3 Diagrama de flujo del piloto de nanofiltración (Diseño con el software denominado ROSA).

Como se puede observar hay una recirculación del rechazo, de esta manera se logra mantener un caudal de alimentación, la recuperación instantánea del sistema es de 58%, pero si se considera el agua de alimentación sin incluir la recirculación, el sistema recupera 64%.

En las tablas III.2 a III.4 se indican las características generales del sistema, el balance hidráulico y comportamiento de la presión y la calidad del agua en todas las etapas del proceso.

Tabla III.2 Características del sistema de nanofiltración.

Flujo total de alimentación	6.21 m ³ /h	Permeado (agua tratada)	3.60 m ³ /h	Presión osmótica	
Flujo de alimentación al sistema	5.63 m ³ /h	Recuperación del agua	64.09 %	alimentación	1.13 bar
Presión de alimentación	5.89 bar	Temperatura de alimentación	25.0 C	Concentrado	2.41 bar
Factor de flujo	0.85	SDT en alimentación	3569.00 mg/l	Promedio	1.78 bar
Sustancias químicas dosificadas	Ninguna	Número de membranas	18	Presión neta activa	3.58 bar
Área activa total	137.12 M ²	Flux promedio del sistema	26.29 lmh	Potencia	1.27 kW

Energía específica 0.35 kWh/m³

En el permeado de la primera etapa habrá una válvula para generar contrapresión de 1.5 bar y de esta forma lograr que haya una ecuilibración de fluxes entre la primera y la segunda etapa, de esta forma se garantiza que la vida útil de las membranas sea lo más homogénea posible.

Tabla III.3 Balance hidráulico y de presiones en el sistema.

Etapa	Flujo de alimentación (m ³ /h)	Presión de alimentación (bar)	Flujo de recirculación (m ³ /h)	Flujo de la salmuera (m ³ /h)	Presión de la salmuera (bar)	Flujo de permeado (m ³ /h)	Flux promedio (lmh)	Presión del permeado (bar)
1	6.21	5.54	0.58	3.78	5.09	2.43	26.53	1.50
2	3.78	4.74	0.00	2.60	4.10	1.18	25.81	0.00

Tabla III.4 Calidad del agua para las distintas corrientes del sistema.

Ion o parámetro	Agua cruda	Agua de alimentación	Concentrado		Permeado		
			Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	Total
NH4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	39.81	43.88	63.24	83.90	13.71	17.73	15.02
Na	207.90	228.99	327.94	433.84	74.80	94.53	81.25
Mg	105.00	121.24	194.32	278.00	7.36	9.89	8.19
Ca	659.00	759.95	1208.50	1734.80	60.93	48.49	56.86
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.83	0.93	1.45	2.24	0.31	0.30	0.31
HCO3	206.93	214.22	245.01	282.11	165.83	162.03	164.59
NO3	0.50	0.43	-0.11	-0.16	1.29	0.00	0.86
Cl	85.02	83.21	73.37	65.48	98.55	90.76	96.00
F	2.83	2.77	2.44	2.18	3.28	3.02	3.20
SO4	2189.18	2540.76	4122.41	5940.23	75.89	115.82	88.96
SiO2	72.00	74.89	89.76	103.19	51.73	60.15	54.48
CO2	9.57	9.63	9.98	10.49	9.22	9.29	9.24
SDT	3568.99	4071.29	6328.34	8925.82	553.68	602.71	569.72
pH	7.30	7.30	7.29	7.29	7.37	7.35	7.36

De la tabla III.4 se observa que el agua producida (columna identificada como total) tiene una calidad del agua, adecuada para el riego de hortalizas. Es notorio que la concentración de cloruros aumente, es decir que es transportado en contra de su propio gradiente, este fenómeno ha sido identificado y explotado en algunas aplicaciones comerciales de la NF (Schäfer *et al.* 2005). Aún con el aumento, las concentraciones de las distintas especies químicas en el permeado no presuponen un impedimento para su utilización en el riego, ya que los cloruros en el permeado son inferiores a 4 meq/L.

III.1.2.2 Segundo caso Diseño con el software CSMPRO4

Con el objeto de afinar el diseño y verificar que se tenga suficiente flexibilidad se hizo un ejercicio con el software CSMPRO4. Los resultados se muestran a continuación. La Figura III.4 corresponde al diagrama de flujo del proceso y la tabla III.5 es el balance hidráulico del sistema que corresponde con las magnitudes de flujo, presión y SDT en cada uno de los puntos señalados en el diagrama de flujo. Por otra parte, la tabla III.6 resumen las características generales del sistema.

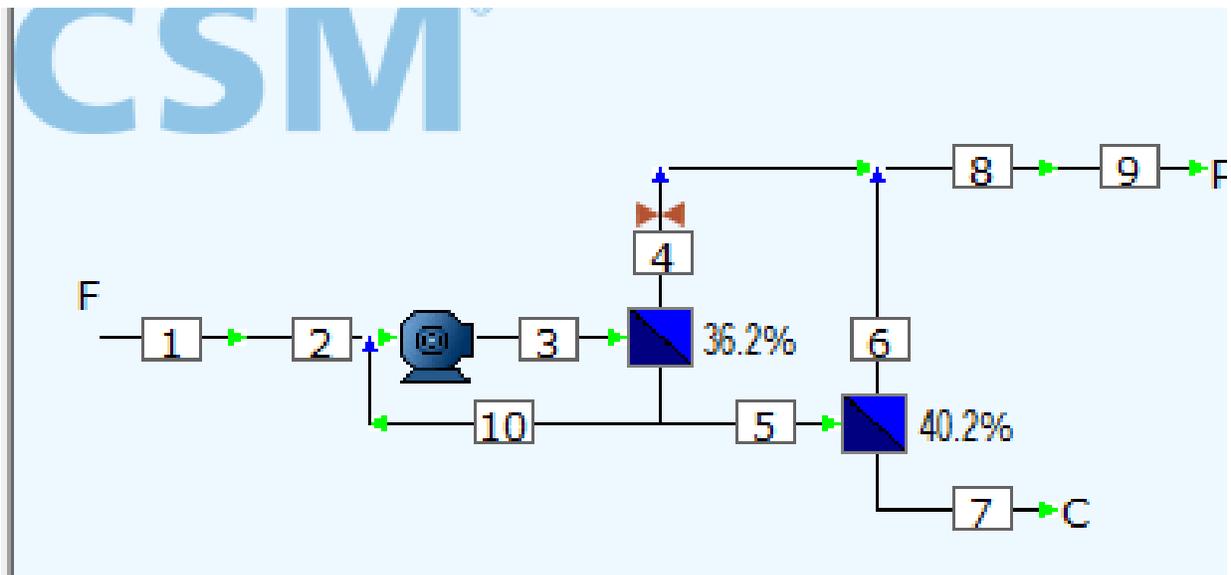


Figura III.4 Diagrama de flujo del proceso.

Tabla III.5 Balance de materia y presiones en las distintas etapas del proceso.

Etiqueta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujo	5.6	5.6	6.2	2.3	3.4	1.4	2.0	3.6	3.6	0.6
Presión	0.0	0.0	6.7	1.5	6.7	0.0	6.3	0.0	0.0	6.7
SDT (mg/l)	3,568.	3,568.	3,754.	627.1	5,531.	1,060.	8,534.	790.4	790.4	5,531.

Tabla III.6 Características del sistema de nanofiltración.

Flujo del permeado	3.61 m ³ /hr	Número de Vasijas de presión	6
Modelo de membranas	NE4040-70	Número de membranas	18
Configuración del sistema	2 etapas 4:2, 3 membranas por vasija de presión		
Recuperación de agua	64.09 %	Flux promedio del sistema	25.39 Litros/m ² /hora

La calidad del agua detallada se muestra en la tabla III.7.

Tabla III.7 Calidad del agua en las distintas etapas del proceso.

	Unidad mg/L	Agua cruda	Agua de alimentación	Concentrado		Permeado			Total
				Etapas 1	Etapas 2	Total	Etapas 1	Etapas 2	
NH4	como Ion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
K	como Ion	39.8	41.1	53.7	70.0	22.90	18.98	29.39	22.90
Na	como Ion	207.9	214.8	280.4	365.7	119.62	99.16	153.50	119.62
Mg	como Ion	105.0	109.9	157.2	231.2	34.44	26.84	47.03	34.44
Ca	como Ion	659.0	685.8	941.8	1,311.6	294.04	235.20	391.49	294.04
Sr	como Ion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	como Ion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	como Ion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO3	como Ion	206.9	215.8	301.0	428.0	83.28	65.95	111.98	83.28
NO3	como Ion	0.5	0.5	0.7	0.9	0.27	0.23	0.36	0.27
Cl	como Ion	87.2	90.1	117.7	153.4	50.18	41.60	64.40	50.18
F	como Ion	2.8	3.0	4.7	7.8	0.04	0.03	0.06	0.04
Boro	como Ion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	como Ion	2,189.2	2,320.2	3,571.1	5,818.1	159.20	118.31	226.92	159.20
SiO2	como Ion	70.0	73.1	102.8	148.0	26.39	20.78	35.68	26.39
CO2	como Ion	13.4	13.4	13.4	13.4	13.35	13.35	13.35	13.35
CO3	como Ion	0.5	0.5	0.8	1.3	0.00	0.00	0.00	0.00
pH	-	7.3	7.3	7.5	7.6	6.95	6.85	7.07	6.95
SDT	mg/L	3,568.4	3,754.4	5,531.1	8,534.7	790.36	627.08	1,060.8	790.36
COT	mg/L	0.0	-	-	-	-	-	-	-
COD	mg/L	0.0	-	-	-	-	-	-	-
BDO	mg/L	0.0	-	-	-	-	-	-	-
Dureza	como CaCO3	2,078.0	2,165.2	2,998.8	4,226.5	876.31	698.05	1,171.5	876.31

Al comparar ambos sistemas se puede ver que hay algunas variaciones, en cuanto a calidad del agua y a las presiones de operación, pero no son significativos, por lo que se considera que el diseño es adecuado.

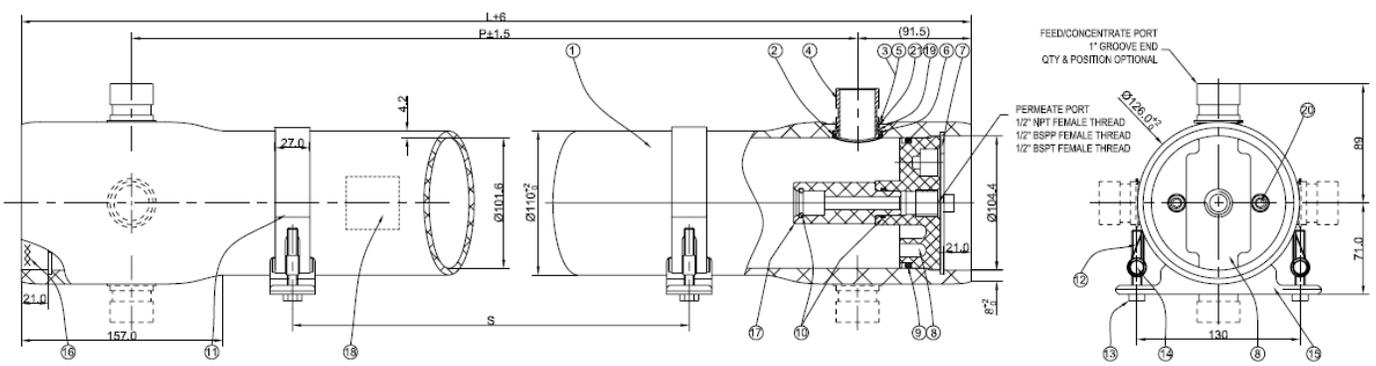
III.1.3 Construcción del Prototipo para la desalación del agua de riego

III.1.3.1 Características constructivas del banco de nanofiltración.

Vasijas de presión.

Como se señala en el punto anterior se requieren seis vasijas de presión con 3 membranas cada una. Las membranas a utilizar son de 4" X 40". Se utilizaran vasijas de presión de fibra de vidrio FRP (por sus siglas en inglés) para una presión de trabajo de 300 psi con puertos laterales de alimentación y rechazo de 1" de diámetro, fabricados en acero inoxidable y para conexión tipo victaulic. El puerto para el permeado es de ½" NPT. En la figura III.5 se presentan el plano tipo de diseño de las vasijas de presión.

00-0061Z



SIDE PORT (1") (3/4" NPT)	21300-04-01	K	1"	20391
SIDE PORT (1")	21300-04	Q	1"	20165
DESCRIPTION	DRAWING NO.	CODE	SPECS	COMPUTER CODE

PERMEATE PORT	NAME	DRAWING NO.	CODE	MATERIAL	SPECS	COMPUTER CODE
S	22300-18	PP+30%FG	BSPT 1/2"			10308-1
R		PP+30%FG	BSPP 1/2"			10307-1
P		PP+30%FG	NPT 1/2"			10300

TECHNICAL REQUIREMENT:
 MAX OPERATING PRESSURE: 300PSI (21kg/cm²),
 WATER MEDIUM TEMPERATURE: 1°C ~ 49°C,
 NOT APPLICABLE TO CORROSIVE LIQUID,
 NOTE: DIMENSIONS IN PARENTHESIS ARE REFERENCE ONLY.

SHELL Length Code	L Inch (mm)	P Standard Inch (mm)	S Span Inch (mm)	EMPTY WEIGHT lb (kg)
1	49.2 (1250)	42 (1067)	28"1 (711)	17 (8)
2	89.2 (2266)	82 (2083)	56"1 (1422)	25 (11)
3	129.2 (3282)	122 (3099)	80"1 (2032)	33 (15)
4	169.2 (4298)	162 (4115)	64"2 (1626)	40 (18)
5	209.2 (5314)	202 (5131)	78"2 (1981)	48 (22)
6	249.2 (6330)	242 (6147)	92"2 (2337)	56 (25)
7	289.2 (7346)	282 (7163)	106"2 (2700)	64 (29)

ITEM	DESCRIPTION	DRAWING NO.	QTY	MATERIAL	COMPUTER CODE
21	PIN		2	SS D=2.96mm	20735
20	BAFFLE SCREW		4	MP30 STAINLESS STEEL GRADE 8.8	20127
19	SIDEPORT PACKING WASHER	21300-18	2	EPDM	10617
18	LABEL		1	ART PAPER	40381
17	ADAPTOR	21300-06	2	ABS CHIRI 757K	10148
16	SERIAL NO. LABEL		1	ART PAPER	40425-1
15	SADDLE	22300-08	2	ZnCr (FPI) (360D)	10140
14	STRAP NUT	22300-08	4	6061	20124
13	STRAP SCREW		4	MP30 STAINLESS STEEL GRADE 8.8	20128
12	STRAP	22300-07	2	304	20124
11	STRAP PROTECTIVE JACKET	22300-09	2	SOFT PVC	10146
10	MPV SEAL	22300-06	4	EPDM	10178
9	HEAD SEAL	22300-04	2	EPDM	10177
8	PERMEATE PORT(M)	SEE THE CHART	2	PP+30%FG	SEE THE CHART
7	BAFFLE	22300-02	4	SA-213 304	20117
6	SIDE PORT RETAINING RING	21300-03	2	ASB0 316	20122
5	CLASP	21300-20	2	SA-179 316	20809
4	SIDE PORT CONFIGURATIONS*	SEE THE CHART	2	SA-179 316	SEE THE CHART
3	CLASP COVER	21300-04	2	SA-179 316	20809
2	CURVED SIDE PORT SEAL	21300-15-01	2	EPDM	10616
1	H ² SHELL (800PSI)	21300-01	1	FIBER GLASS + EPOXY	

13	INCREASE 75 LENGTH AND SIDE PORT CLASP CLASP COVER			1108/29
12	MPV MIDDLE DIA CHANGE INCREASE THICKNESS OF MPV AND END PORT			1005/17
REVISION	DESCRIPTION	SIGNATURE	DATE	
REFERENTIAL PLASTIC SHRINKAGE (IF NECESSARY):				
SIGNATURE				
DESIGN	NAME	DATE	WAVE CYBER (SHANGHAI) CO., LTD.	
INSPECTION	SCALE	MATERIAL	MODEL	WAVE-300F-4
APPROVAL	QUANTITY	SMOOTHNESS	DESCRIPTION	300PSI MEMBRANE HOUSING
THIS PRODUCT DRAWING CAN NOT BE COPIED AND/OR USED WITHOUT PRIOR WRITTEN APPROVAL OF WAVE CYBER.				
PROJECTION	COMPUTER CODE	DRAWING NO.	VERSION NO.	
DO NOT MEASURE THE DIMENSIONS	UNIT:MM	21300-00	13	TOTAL PAGE: 1

Figura III. 5 Diagrama de especificaciones de la vasija de presión a utilizar en el banco de nanofiltración.

La tubería a utilizar el banco de nanofiltración es PVC hidráulico cédula 80 con diámetros de ½” a 1½” según se requiera: 1½” será el cabezal de alimentación de agua al sistema, el cabezal del permeado y el cabezal de rechazo.

La tubería de alimentación a las vasijas de presión y de salida del rechazo será de 1” para que sea compatible con los puertos de las vasijas de presión.

La tubería de captación del permeado a la salida de cada vasija de presión será de ½” y se acoplarán a cabezales de 1”, para posteriormente unirse en el cabezal final del permeado que tendrá un diámetro de 1½”.

La tubería de recirculación tendrá un diámetro de ½” y se acoplará con la tubería que alimenta a la bomba de alta presión. En la línea se montará un rotámetro que permita la visualización continua del flujo de rechazo.

Los flujos de permeado y rechazo del sistema se medirán con rotámetros.

III.1.3.2 Prefiltros (filtro cartucho)

El sistema estará equipado con un prefiltro (filtro cartucho) con capacidad de 10 m³/h, la vasija de presión es para 6 cartuchos de 2.5” x 20”. Está construida en fibra de vidrio, tiene conexiones roscadas de 2” NPT. El filtro cartucho se instala antes de la bomba de alta presión.

La figura III.6 muestra las dimensiones de la carcasa.

III.1.3.3 Bomba dosificadora.

Se requiere instalar una bomba dosificadora para suministrar antiincrustante al sistema. La bomba dosificadora debe colocarse antes de la bomba de alta presión. La bomba a instalar es una Jesco modelo Magdos 07 con capacidad de hasta 12.6 mL/min a una presión de 150 psi. La figuras III.7 y III.8 muestran las dimensiones de la bomba dosificadora y la curva de desempeño respectivas.

La conexión se hará mediante manguera plástica de 3/8” de diámetro. El antiincrustante se utilizará con una dilución al 30%. La bomba elegida es adecuada ya que el caudal del reactivo es pequeño, sobre todo porque tiene un límite en cuanto a la dilución, la proporción máxima es 10 % (de antiincrustante y 90%) de agua. Asimismo, la bomba dosificadora es capaz de vencer cargas de hasta 10 Kg/cm², esto la hace susceptible de acoplarse al sistema de riego ya sea antes o después del bombeo de alta presión.

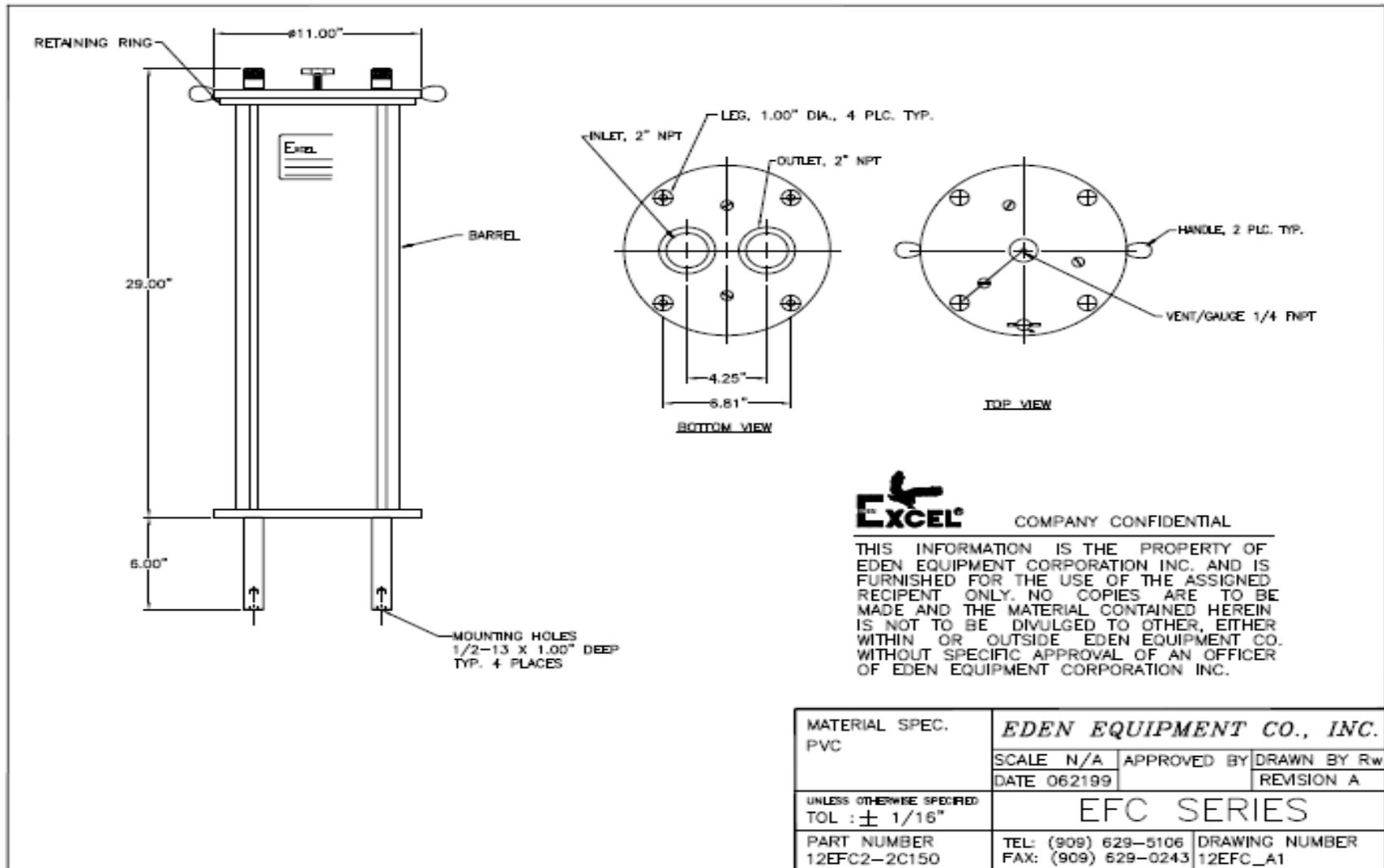
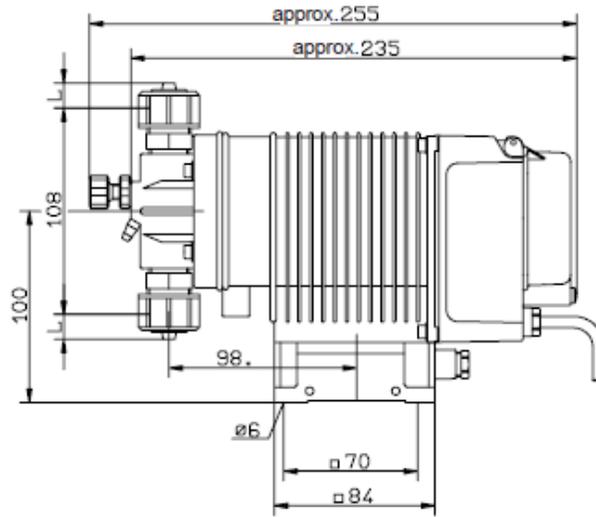
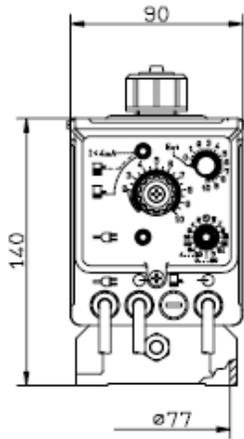
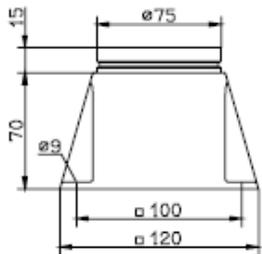


Figura III.6 Dimensiones exteriores del filtro cartucho.

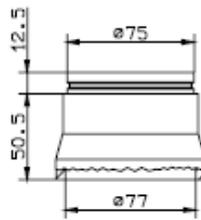
Dimensions DE/DX 01...12



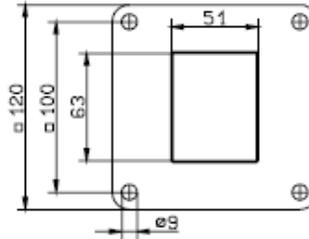
For "L" dimensions, see MB 1 02 20 / 10.



Pump base
Part No.: 21589

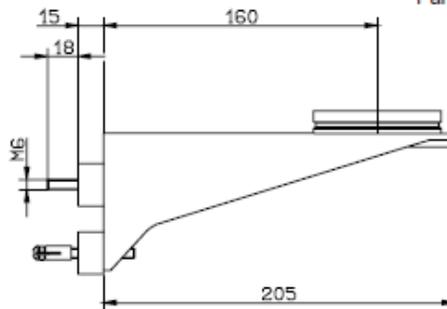
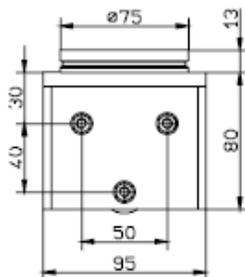


Adapter
Part No.: 21801



Adapter for mounting on
standard tanks (min. 60l)
Part No.: 29775

for mounting on 45l tanks
Part No.: 32608



Wall bracket
Part No.: 26502

Mounting kit
with dowels
Part No.: 25155

Lutz-Jesco GmbH

Improved changes are always reserved without notice.

Figura III.7 Dimensiones de la bomba dosificadora.

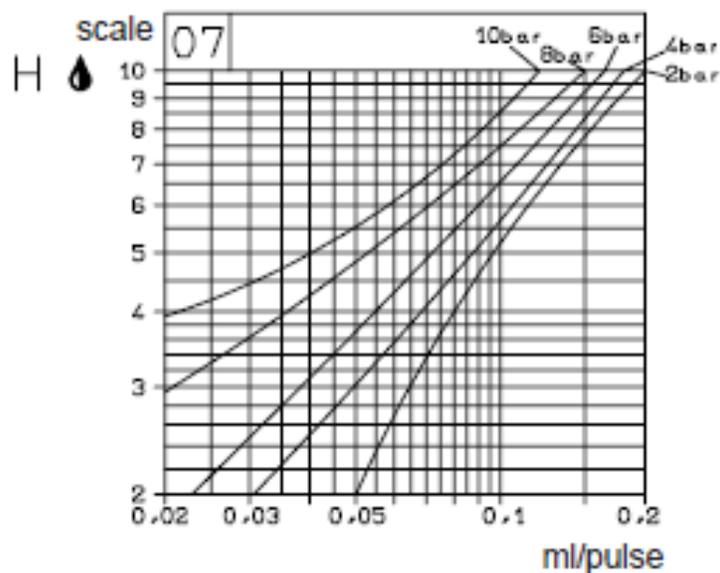


Figura III.8 Curva de desempeño de la bomba dosificadora.

III.1.3.4 Membranas.

Las membranas a utilizar son de nanofiltración de 4" X 40", modelo NE4040-70 de la casa CSM, las características de las membranas se señalan a continuación.

Flujo nominal de permeado $5.7 \text{ m}^3/\text{d}$

Rechazo de iones monovalentes (NaCl) 40 – 70 %

Rechazo de iones divalentes (MgSO_4) 99.5%

Área efectiva de la membrana 7.9 m^2

Tipo de membrana: polimérica de película delgada

Material: poliamida

Carga superficial de la membrana: negativa

Configuración: enrollada en espiral y recubierta de fibra de vidrio.

III.1.4 Ajuste del diseño.

Debido a la falta de una fuente con suficiente caudal para probar el sistema, fue necesario rediseñar el prototipo a fin de consumir menor cantidad de agua para las pruebas del sistema. Por ello, se optó por un equipo de 4 membranas en serie, cada una en su respectiva vasija de presión.

En la figura III.9 se muestra el diagrama del flujo del proceso ajustado, se trata de un equipo con 4 vasijas de presión en serie y cada vasija de presión es de una sola membrana. Asimismo en la tabla III.8 se muestran los balances de masa (de agua y de sales disueltas), así como las presiones en cada una de las etapas del proceso.

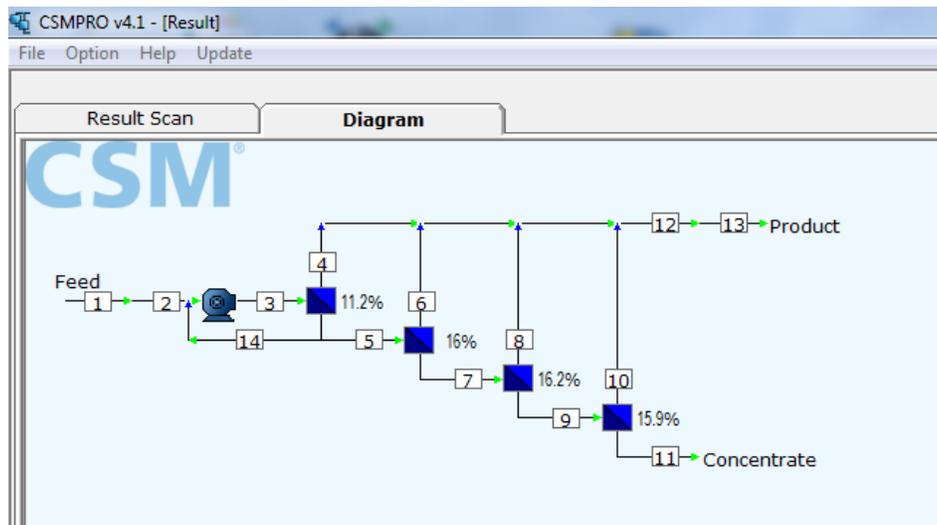


Figura III.9 Diagrama de flujo del proceso.

Tabla III. 8 Balance de materia (Agua y sales) y de presiones en el prototipo.

Etiqueta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Flujo (m ³ /hr)	1.5	1.5	2.08	0.23	1.27	0.20	1.06	0.17	0.89	0.14	0.75	0.75	0.75	0.58
Presión (Bar)	0	0	6.07	0	6.05	0	5.7	0	5.35	0	5	0	0	6.05
SDT (mg/l)	3568	3568	3737	582	4137	759	4782	968	5518	1242	6324	843	843	4137

Al comparar los resultados de este nuevo diseño contra el diseño de mayor tamaño, se observa que la calidad del agua en este caso, es un poco inferior en calidad, sin embargo, la concentración de sólidos disueltos totales todavía es apta para ser utilizada para riego.

En la figura III.10 se muestra el prototipo de desalación de agua de riego, tal como se construyó. Es necesario aclarar que al sistema se le incorporó una bomba centrífuga de corriente alterna y en campo se le adaptará una bomba solar de corriente directa, de tal manera de hacerlo una tecnología ecológica-sustentable con amplia adaptación a actividades agrícolas como viveros, invernaderos, huertos o donde se utilice agua de riego a pequeña escala.

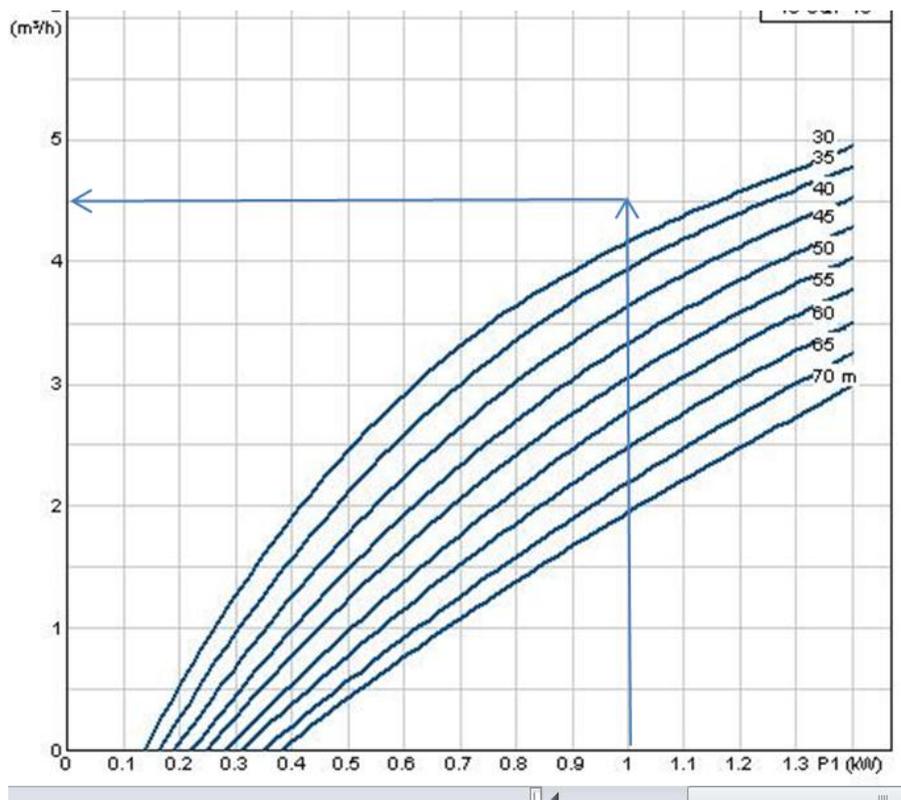


Figura III.10 Sistema de nanofiltración impulsado por energía solar.

III.2 Desarrollo tecnológico para bombeo con energía fotovoltaica y eólica, empleando tanques elevados

III.2.1 Selección de la bomba.

La bomba seleccionada es de tipo sumergible e instalada al interior del ademe del pozo del usuario (pozo artesiano ubicado cerca del río). Ésta satisface la mitad de la demanda diaria del cultivo, es decir $27 \text{ m}^3/\text{día}$. Por lo que fueron requeridas 2 bombas, cada bomba logra emitir un caudal de $4.5 \text{ m}^3/\text{hr}$, con una carga estimada de 23 metros, lo cual equivale a 1.25 litros por segundo. Donde el sistema de paneles proporciona un kilowatt por segundo, como se muestra a continuación:



III.2.2 Paneles solares.

Dado que el proyecto está pensado como un sistema híbrido, para el funcionamiento de la segunda bomba se instalaron paneles desarrollados por el equipo de la Subcoordinación de Drenaje y Contaminación Agrícola.

III.2.2.1 Proceso de construcción

Los Materiales requeridos durante el proceso de construcción fueron:

- ❖ Celdas solares de 6 x 3 pulgadas y 1.65 watts cada una para cada panel.
- ❖ Líquido para soldar (Rosin flux pen) y cinta metálica de 2 calibres para soldar celdas solares en serie (tab wire and bus wire).
- ❖ 2 cristales de 70 centímetros x 85 centímetros y 4 milímetros de grosor por cada panel.
- ❖ Marco de aluminio con cortes de 45 grados (2 piezas de 85.5 cm y 2 piezas de 70.5 cm, para cada panel).
- ❖ Regla T grande de 40 pulgadas, para marcar líneas en el cristal de base en donde se colocaran las celdas solares.
- ❖ Marcador de punta gruesa para pizarrón de base agua.
- ❖ Tijeras metálicas afiladas.
- ❖ Taladro con broca para perforar metal de 1/8 de pulgada de diámetro.
- ❖ Soldadura de 40% estaño y 60% plomo en carrete para conexiones eléctricas.
- ❖ Cautín (No de tipo pistola) de 30 watts con temperatura ajustable.
- ❖ Tubos de silicón transparente con aplicador (1 tubo de 300 mililitros por panel)
- ❖ Rollo de cinta adhesiva laminar de aluminio con adherente de un lado.
- ❖ Desarmador largo y delgado para sostener en su posición la cinta metálica al soldar.
- ❖ Cable de calibre 16 AWG de dos hilos de uso rudo, para corriente mayor de 20 amperios.

Dado que las celdas no venían soldadas por la cara azul se requirió soldar el cable plano mediante la aplicación de rosin flux a lo largo de la raya blanca de la celda sobre la cara azul y se suelda el cable plano (15cm de longitud) a cada lado sobre la línea blanca de la celda.

Las celdas quedaron como se muestra en la figura III.11



Figura III.11 Celdas solares con el cable ya soldado.

Cada panel lo conformaron dos cristales, uno que sirvió de fondo y otro que protege la cara superior de las celdas solares. En el cristal de fondo se pegaron con silicón las celdas solares ya soldadas en serie, formando 4 líneas verticales de 9 celdas solares cada línea (Figura III.12).

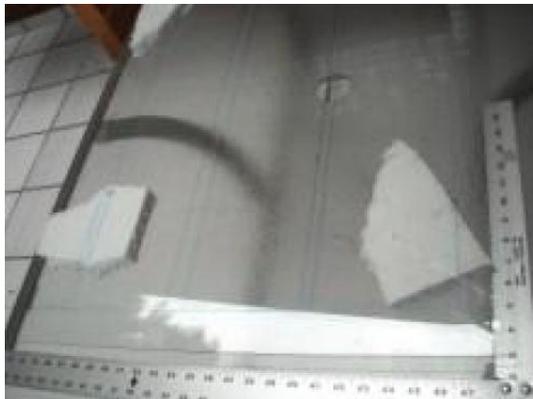


Figura III.12 Cristales de las caras de los paneles

A la primera celda de la hilera se soldó en sus 6 polos positivos (reverso de la celda) dos tramos de alambre de bajo calibre como se muestra en la figura III.13 .



Figura III.13 Soldado de los 6 polos por celda.

Una vez lista la primera celda de la hilera, se procedió a soldar la segunda celda uniendo los cables presoldados que salen de la cara azul de la celda (polos negativos), a los 6 polos positivos de la segunda celda, como se muestra en la figura III.14.



Figura III.14 Soldadura entre celdas

Este mismo proceso se repitió hasta completar toda la hilera de 9 celdas solares (ver figura III.15).



Figura III. 15 Terminado del proceso de soldado de la hilera de celdas

Posteriormente se colocó la primera hilera ya terminada sobre el cristal de fondo, con ayuda de silicón (figura III.16).



Figura III.16 Hileras de celdas montadas sobre el cristal de fondo.

Para las otras columnas que forman el panel solar se repitió el proceso de armado (Figura III.17)

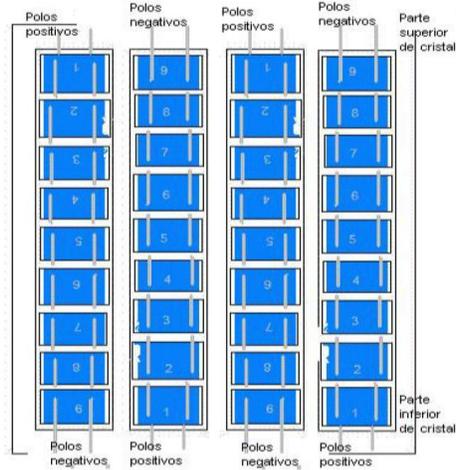


Figura III.17 Esquema del proceso de armado entre hileras de paneles ya soldados.

Cuando se tuvieron listas las cuatro hileras de celdas solares se procedió a soldarlas entre sí con el cable (Figura III.18).

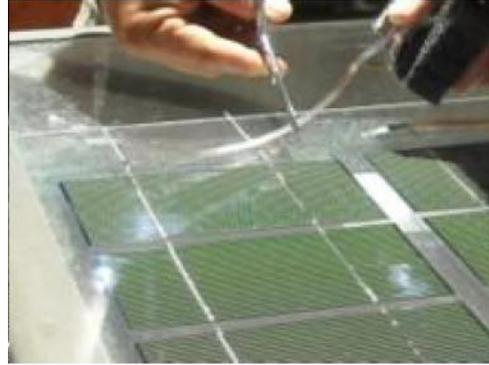
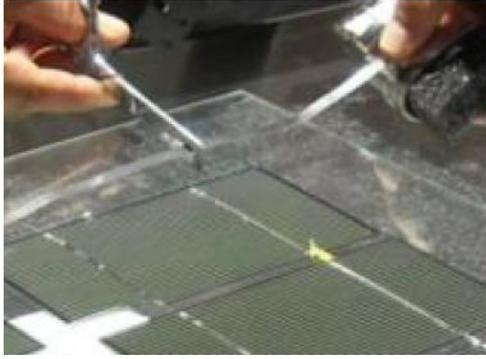


Figura III.18 Proceso de soldado entre celdas

Posteriormente se procedió a conectar los polos negativo y positivo del panel solar al cable de calibre 16. Para lo cual primero se pasó cada línea del cable (del cual se quitó un poco del revestimiento plástico) a través de los dos orificios previamente perforados en el marco de aluminio del lado superior del panel como se aprecia en la figura III.19.

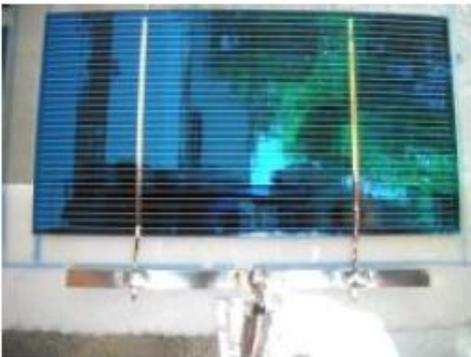




Figura III.19 Proceso de soldado entre polos

Con los hilos del cable soldados al panel solar, se procedió a colocar lágrimas de silicón una en cada esquina como separador de los vidrios y silicón transparente en toda la orilla del cristal inferior del panel solar para un sellado completo (Figura III.20).



Figura III.20 Colocación de silicón transparente en las orillas del panel.

Posteriormente se colocó el marco de aluminio blanco previamente cortado en ángulo de 45 grados, aplicando silicón en sus bordes superior e inferior como se muestra en la figura III.21, dejando secar 12 horas.



Figura III.21 Colocación del marco de aluminio.

Finalmente se revisó que el panel fuera impermeable antes de comenzar a utilizarlo, ya que el agua y la humedad dañan las celdas solares y el cable de cobre. El funcionamiento del panel solar, se probó colocándolo en ángulo de 90 grados respecto a los rayos solares. Y con un multímetro conectado al extremo opuesto del panel solar se midió el amperaje y voltaje (Figura III.22).



Figura III.22 Prueba de funcionamiento del panel.

Para terminar todos los paneles fueron empotrados en una estructura de fierro soldado para disminuir el riesgo de robo del equipo.

La instalación se realizó en paralelo, con un arreglo de 9 paneles de 110 Watts que es el kW requerido por la bomba que impulsará el sistema de riego (Figura III.23).



Figura III. 23 Panel solar terminado

III.2.3 Aerogeneradores

Los denominados aerogeneradores son generadores eléctricos movidos por una turbina accionada por el viento, donde se aprovecha la energía cinética del aire en movimiento. El viento proporciona el impulso a un rotor hélice que mediante un sistema de trasmisión hace rotar un alternador trifásico que transforma la energía cinética en energía eléctrica.

III.2.3.1 Energía útil del Viento

En una corriente de aire de densidad ρ y velocidad \vec{v} , como se indica en la Figura III.24, la potencia eólica disponible que atraviesa una superficie A y hace un recorrido L en el tiempo t , viene dada por la expresión:

$$N_{viento} = \frac{E_{cinetica}}{t} = \frac{mv^2}{2t} = \frac{v^2}{2t} (v t A \rho) = \frac{\rho A v^3}{2} = k \cdot v^3$$

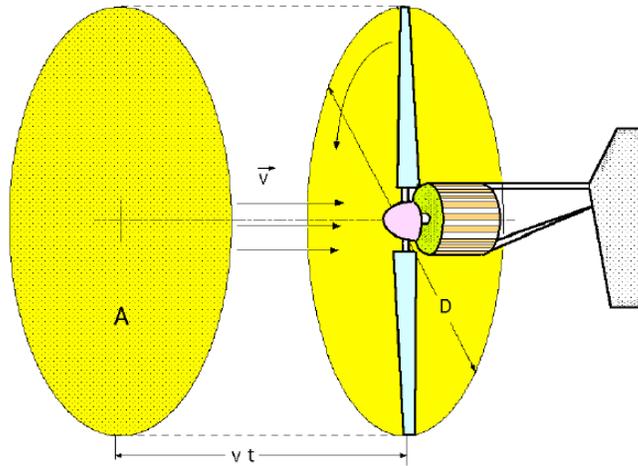


Figura III.24 Área A barrida por el rotor de diámetro D.

La sección barrida por la pala en un aerogenerador de eje horizontal y diámetro D es:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \text{ y la potencia del viento: } N_{viento} = \frac{\pi \rho D^2 v^3}{8}$$

La velocidad del viento varía con el tiempo y, por lo tanto, su potencia N también variará; por lo que se debe considerar el valor medio de ambas, por ejemplo a lo largo de un año, obteniéndose:

$$\hat{N}_{viento\ anual} = \frac{1}{2} \rho A \hat{v}_{anual}^3$$

De estos conceptos se obtienen:

- La N_{viento} varía fuertemente con la velocidad \vec{v} , siendo preciso hacer las mediciones de \vec{v} en el lugar exacto donde se quiera instalar la Aero turbina.
- La N_{viento} varía con la densidad del aire ρ , a causa de las variaciones de presión y temperatura, en valores que pueden oscilar de un 10% a un 15% a lo largo del año.

III.2.3.2 Curvas de potencia

Mediante las curvas de potencia se puede conocer cuando una Aero turbina suministra energía. Cuando el viento supera la velocidad mínima \vec{v}_{conex} la máquina comienza a suministrar potencia aumentando ésta a medida que aumenta la velocidad del viento, hasta que éste alcanza una velocidad \vec{v}_{nom} que se corresponde con la potencia nominal del generador; para velocidades superiores los sistemas de control mantienen constante la potencia, evitando una sobrecarga en la turbina y en el generador. Las curvas que relacionan la velocidad del viento, con el número de horas de funcionamiento del aerogenerador, $t = f(v)$, indican el número de horas al año en que la velocidad del viento supera un cierto nivel. A partir de estas curvas se puede obtener la curva de potencia

disponible del viento, y la curva de potencia eléctrica suministrada por el aerogenerador. El área encerrada por esta última, proporciona la energía eléctrica generada en un año, siendo frecuente expresar estas potencias y energías, por unidad de superficie barrida por el rotor.

III.2.3.3 Parámetros de diseño

III.2.3.3.1 Relación de velocidad periférica TSR

La relación de velocidad específica o periférica TSR, Tip-Speed-Ratio, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto n del rotor; y sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento v y es la relación entre la velocidad periférica de la pala $u = R\omega$ (la del punto más exterior sobre la misma a partir del eje de rotación), y la velocidad del viento v , en la forma:

$$TSR = \frac{\text{velocidad de la periferia de la pala}}{\text{velocidad del viento}} = \frac{R\omega}{v} = \cot \theta = \frac{\pi Rn}{30v} = 0.105 \frac{Rn}{kv}$$

Si se conoce la velocidad v del viento, el radio de la pala y el número n de rpm a las que funciona, se puede calcular el TSR a cualquier distancia r comprendida entre el eje de rotación del rotor y la periferia de la pala, relación entre velocidades que se conoce como SR, y es de la forma:

$$SR = \frac{2\pi rn}{60kv} = 0.105 \frac{rn}{kv}$$

En la que k es una constante de ajuste de las diversas unidades que se pueden emplear, tomando los siguientes valores:

$$k = \begin{cases} 1.47 & \text{cuando la velocidad del viento } \vec{v} \text{ venga en millas por hora y el radio en ft} \\ 1 & \text{cuando } \vec{v} \text{ venga en ft/seg y el radio en ft} \\ 1 & \text{cuando } \vec{v} \text{ venga en m/seg y el radio en metros} \\ 3.6 & \text{cuando } \vec{v} \text{ venga en km/hr y el radio en metros} \end{cases}$$

III.2.3.3.2 Relaciones prácticas entre C_x y C_y

En la Figura III.25 se presenta la polar del perfil FX60-126 y a la misma escala la representación de C_y en función del ángulo de ataque α ; de ellas se obtiene que la

sustentación máxima se presenta para un ángulo de ataque $\alpha = 12^\circ$ y que el arrastre mínimo se produce para un valor de $C_x = 0.006$ que se corresponde con un coeficiente de sustentación $C_y = 0.02$.

El mejor funcionamiento de la pala se produce para un ángulo de ataque α en el que la relación $\frac{C_y}{C_x}$ sea máxima, es decir, el coeficiente ascensional tiene que ser grande, pero no necesariamente el máximo absoluto, al tiempo que el coeficiente de arrastre tiene que ser lo más pequeño posible, compatible con la relación anterior.

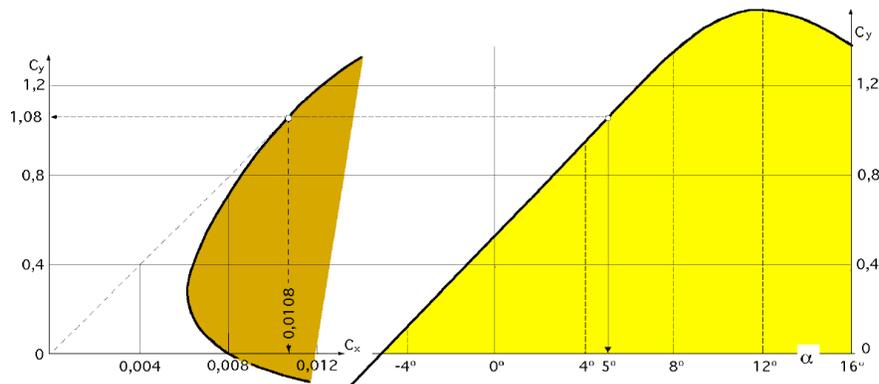


Figura III.25 Coeficientes de arrastre y de sustentación del perfil FX60-126

También se observa que el mínimo arrastre se produce para $C_y = 0.02$ que es un valor bajo comparado con el máximo posible $C_y = 1.6$. Para encontrar el ángulo de ataque α para el que la relación $\frac{C_y}{C_x}$ se hace máxima, entonces se traza la tangente a la polar desde el origen de coordenadas; el punto de tangencia P se corresponde con el máximo valor de $\frac{C_y}{C_x}$ del perfil de la pala, proporcionando en este caso valores de:

$$\begin{cases} C_y = 1.08 \\ C_x = 0.0108 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 5^\circ \text{ y } \frac{C_y}{C_x} = \frac{1.108}{0.0108} = 100$$

Colocando el perfil con este ángulo, para una determinada velocidad del viento, el aerogenerador funcionará en condiciones óptimas (ver tabla III.9 y figura III.26).

Tabla III.9 Especificaciones para aerogeneradores de eje horizontal.

Tipo de Maquina	TSR de diseño	Tipo de Pala	C_y/C_x
Bombeo de Agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Ala de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	Perfil alabeado	20-100
	3-5	Ala de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

III.2.3.3.3 Factor de actividad, Fa

El factor de actividad indica la capacidad estructural de un rotor para generar energía y se define de la siguiente forma:

$$Fa = \frac{100,000}{32} \int_{Raiz}^{Punta} \frac{L}{R} \left(\frac{r}{R}\right) d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Siendo L la longitud de la cuerda media, R el radio y r la distancia al eje. Los valores admisibles del factor de actividad están comprendidos entre 15 y 60. Con valores por debajo de 15 el rotor carece de resistencia estructural, por lo que grandes valores del Fa se corresponden con palas anchas, mientras que pequeños valores se corresponden con palas finas.

Los valores del Fa mayores de 15 se corresponden con ($6,5 < TSR < 10$), $\frac{D}{L}$ del orden de 60 y coeficiente de potencia C_N del orden de 0,4

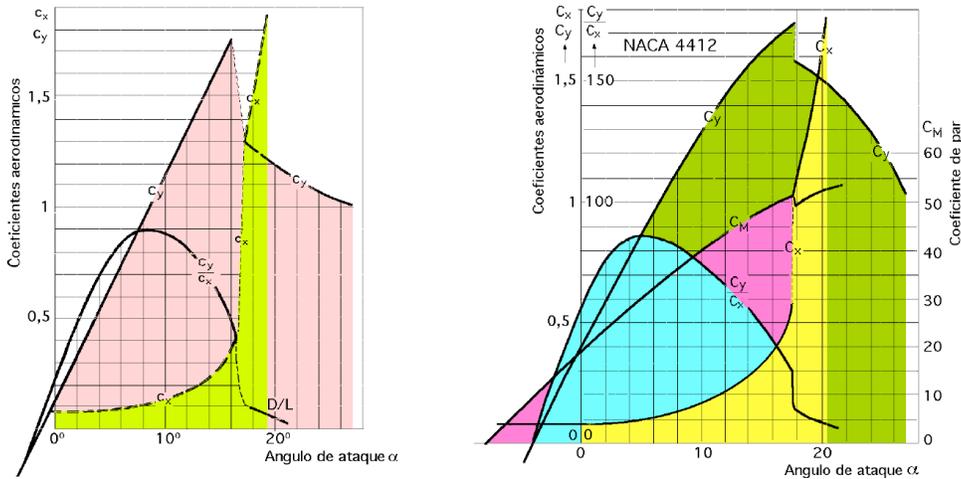


Figura III.26 Coeficientes de arrastre y de sustentación en función de α

III.2.3.3.4 Rendimiento aerodinámico η

Se ha definido el rendimiento aerodinámico η como la relación entre la potencia generada por el aerogenerador y la energía del viento que atraviesa el rotor, de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\text{Potencia del aerogenerador}}{\text{Potencia del viento}} = \frac{N}{\frac{\rho A v^3}{2}} = \frac{2N}{\rho A v^3}$$

En las Figuras III.27 a III.31 se indica la relación entre el rendimiento aerodinámico η , la velocidad específica TSR y el número de palas, para una relación $\frac{D}{L} \rightarrow \infty$.

III.2.3.3.5 Coeficiente de par C_M

Se define el coeficiente de par C_M en la siguiente forma:

$$C_M = \frac{\text{Par del aerogenerado}}{\frac{\text{Potencia del viento}}{v} R} = \frac{C}{\frac{1}{2} \rho A v^3 R} = \frac{C}{\frac{1}{2} \rho A v^2 R} = \frac{\frac{N_{\text{util}}}{R \omega}}{\frac{N_{\text{viento}}}{v}} = \frac{\frac{N_{\text{util}}}{R \omega}}{\frac{R \omega}{v}} = \frac{\eta_{\text{aerod}}}{TSR} = \frac{C_N}{TSR}$$

Para el caso particular de un rotor de hélice, el valor del área frontal barrida es $A = \pi R^2$ y el coeficiente de par C_M correspondiente:

$$C_M = \frac{2C}{\rho \pi v^2 R^3}$$

El par motor se puede expresar también en función del rendimiento aerodinámico o coeficiente de potencia C_N y de la potencia útil del viento en la forma:

$$C = \frac{N_u}{\omega} = \frac{\eta_{aerod} N_{viento}}{\omega} = \frac{C_N N_{viento}}{\omega}$$

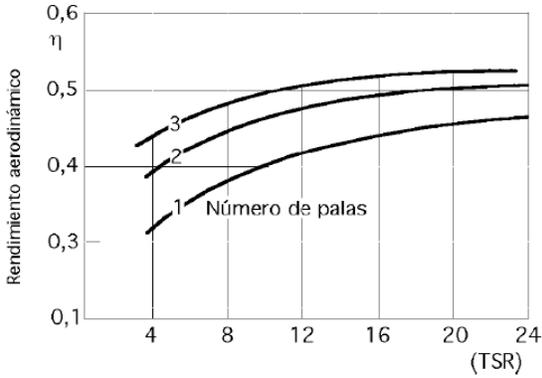


Figura III.27 Relación entre el rendimiento aerodinámico TSR y el Número de palas para D/L

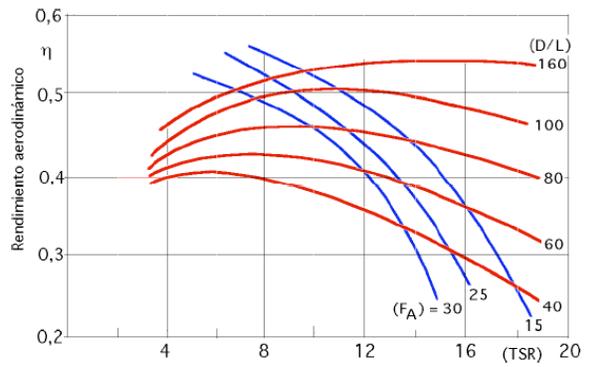


Figura III. 28 Relación entre el rendimiento aerodinámico, el TSR y la relación D/L.

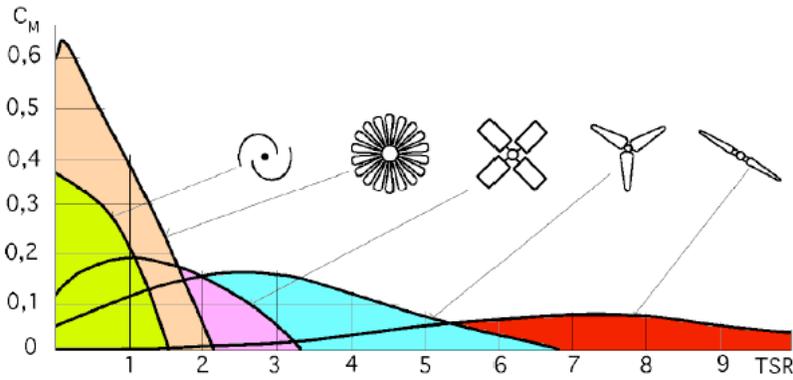


Figura III.29 Relación entre el coeficiente de par y el TSR.

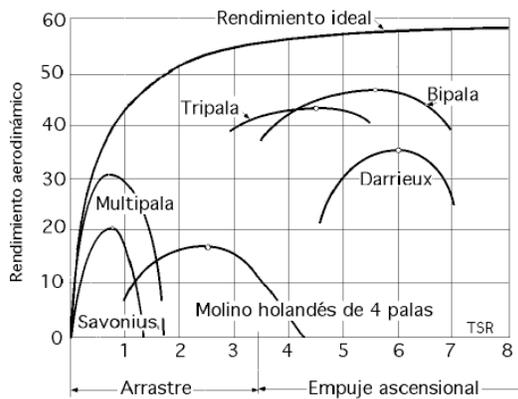
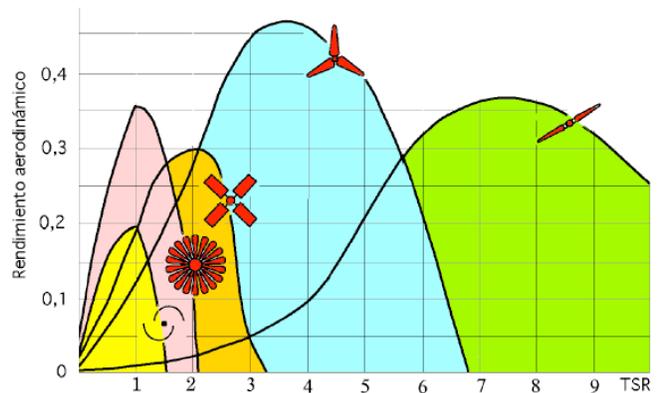


Figura III.30. Curvas ($\eta_{aerod} - TSR$)



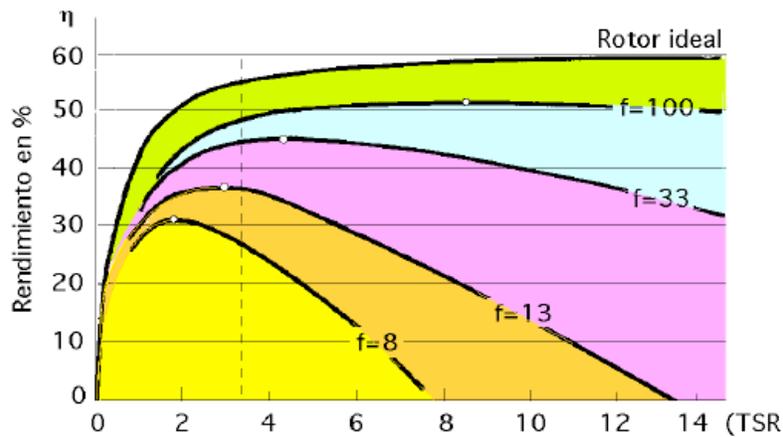


Figura III.31 Curvas $(\eta_{aerod} - TSR)$, para hélices.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede determinar la calidad de una máquina eólica, considerando las curvas del tipo $(\eta_{aerod} - TSR)$, de las que se puede hacer una clasificación como lo mostraron las figura anteriores, y de la cuáles se desprenden las siguientes conclusiones:

- Los molinos multipala y Savonius obtienen su máximo rendimiento aerodinámico para TSR pequeños, es decir, giran a baja velocidad; asimismo funcionan con velocidades \vec{v} del viento pequeñas.
- El rendimiento aerodinámico y la potencia útil son superiores en los aparatos Darrieux y hélice.
- El rendimiento aerodinámico se mantiene siempre por debajo del límite de Betz, y se aproximaría a él, si el TSR tendiese a infinito.
- Si el TSR es mayor que 3.5 las palas funcionan principalmente por empuje ascensional, y si es menor que 3.5 funcionan por arrastre.

En la Figura 19 se ha hizo una representación $(\eta_{aerod} - TSR)$ en función del nº Z de palas, relaciones $\frac{D}{L}$, $f = \frac{F_{asc}}{F_{arr}} = \frac{C_y}{C_x}$ respectivamente, y en la Figura III.32 se presenta una relación entre la fuerza tangencial y la longitud de la pala

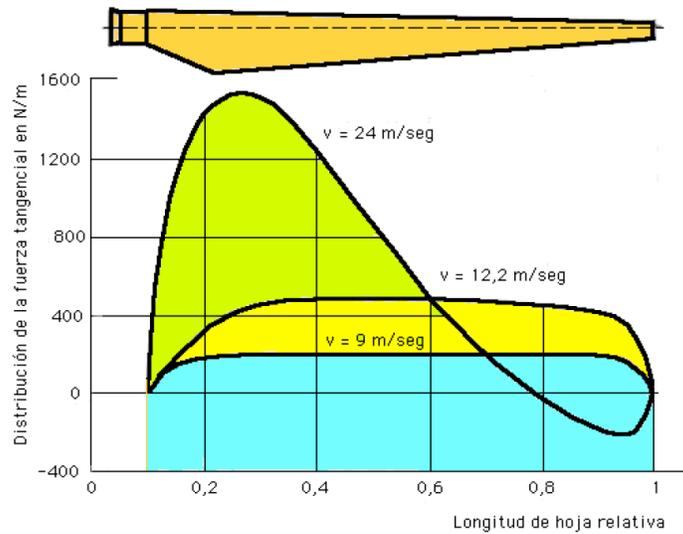


Figura III.32 Relación entre la fuerza tangencial y la longitud de la pala.

III.2.3.4 Dimensionado de un rotor eólico

III.2.3.4.1 Área frontal barrida por la pala

El área A barrida por el rotor, es un parámetro que se utiliza con cierta frecuencia en los cálculos para el aprovechamiento de la energía eólica.

Para un rotor de hélice de diámetro D de eje horizontal, esta área A es la superficie total barrida por las palas y es perpendicular a la dirección del viento:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Para máquinas de eje vertical (viento transversal), con un radio uniforme alrededor del eje de rotación igual a $\frac{d}{2}$ y altura h , el área A barrida es:

$$A = altura \cdot Anchura = hd$$

La cuál se aplica al rotor Savonius y a los rotores de palas tipo giromill.

En un rotor Darrieux, la curva envolvente que conforma el perfil (catenaria) proporciona el área A . Sin embargo, en algunos casos, esta curva envolvente se puede aproximar bastante bien, mediante dos medias parábolas, por lo que el área frontal sería, aproximadamente, igual a:

$$A = 0.67 d h$$

Siendo d el diámetro máximo de giro y h la altura del aparato, (distancia entre los extremos del rotor).

El tamaño y dimensiones de un rotor eólico se determinan calculando:

- El área frontal A del mismo; para ello se le puede suponer como una máquina motriz, a la que de antemano se tiene que prefijar y asignar la energía que se desea generar
- El promedio de energía que se puede obtener a partir de los recursos eólicos del lugar donde se vaya a instalar el aerogenerador.

Conocidos los datos energéticos, del máquina y de la fuente energética, se igualan, y se determina el área A barrida por el rotor, y la longitud de las palas. El diseño del aerogenerador es relativamente sencillo, mientras que el estudio y elección del lugar con recursos eólicos puede ser más complicado, pudiéndose obtener resultados muy ajustados entre la energía que se desea obtener y la energía del viento disponible y la necesaria para conseguirla.

Estos promedios de energía eólica necesarios N_{util} vienen dados por la ecuación:

$$N_{util} = N_{viento} \cdot \eta = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta \Rightarrow A = \frac{2N_{util\ aerog}}{\rho v^3 \eta} = \frac{93N_{util\ aerog}}{\eta F C_A C_T}$$

Siendo:

N_{util} La potencia útil en kW

$\eta = \eta_{aerod}$ El rendimiento aerodinámico global del aerogenerador, en las que:

F Es un factor que depende de la velocidad del viento y cuyos valores se indican en la Tabla III.10

C_A y C_T son dos factores de corrección de la densidad del aire, en función de la altitud (en metros) y de la temperatura del lugar en °C, valores que vienen indicados en la Tabla III.11.

Tabla III.10 Valores del factor de potencia F.

<i>v mph</i>	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>F</i>	1.07	1.78	2.63	3.74	5.13	6.82	8.86	11.3	14.1	17.3	21	25.2
<i>v mph</i>	18	18	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
<i>F</i>	29.9	35.2	42	47.5	54.6	62.4	70.9	80.1	90.1	101	113	125

Tabla III.11 Factores de corrección de la densidad del aire.

<i>Altitud m</i>	C_A	<i>Temperatura °C</i>	C_T
0	1	-18°	1.13
750	0.898	-6°	1.083
1500	0.819	+4°	1.04
2250	0.744	+16°	1
3000	0.676	+27°	0.963
		+38°	0.929

Si se dispone de un aerogenerador eólico ya instalado y se conoce la eficiencia del mismo, la fórmula anterior permite comprobar si el área frontal del aparato se corresponde con las necesidades energéticas programadas de antemano; por eso, cuando se diseña un aerogenerador es preciso fijar en forma aproximada la eficiencia del mismo, que es un factor desconocido, para lo que se puede hacer uso de la Tabla III.12.

Tabla III.12 Valores estimados de eficiencia para pequeños aerogeneradores.

Maquina Eólica	Eficiencia en %	
	Construcción simplificada	Diseño optimo
Bomba de agua multipala	10	30
Bomba de agua de palas de tela	10	25
Bomba de agua Darrieux	15	30
Aeromotor Savonius	10	20
Prototipos de aeromotores pequeños menores a 2kW	20	30
Prototipos de aeromotores medianos de 2 a 10 kW	20	30
Prototipos grandes de más de 10 kW	--	30 a 40
Generador eólico Darrieux	15	35

En general, para un aerogenerador de eje horizontal, la potencia extraída del viento es:

III.2.3.4.2 Tamaño de las palas y coeficiente de solidez

Cuando un aerogenerador dispone de un número determinado de palas Z , la superficie total de las mismas se puede calcular mediante la expresión:

$$\text{Área total de las palas} = Z \cdot S = \text{Solidez } \Omega \cdot \text{Área A barrida por el rotor}$$

Por lo que la solidez Ω del rotor se puede interpretar como la relación entre el área geométrica de la pala ($S = RL$) y el área barrida por ella en su giro, es decir:

$$\Omega = \frac{ZS}{\pi R^2} = \frac{ZRL}{\pi R^2} = \frac{ZL}{\pi R}$$

Para obtener la superficie de una pala se divide el área total así obtenido por el número de ellas. El coeficiente de solidez Ω guarda una relación inversa con el TSR. En la Figura III.33 se ha hecho una representación en función del número de palas, sin tener en cuenta sus características; sin embargo, en los actuales aerogeneradores con valores del TSR mayores de 10 la solidez es del orden de 2.5 por ser las palas muy delgadas.

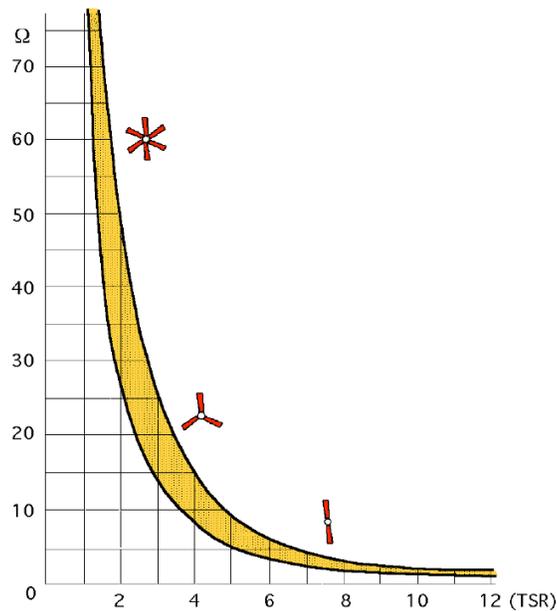


Figura III. 33 Relación entre el coeficiente de solidez Ω y el TSR

III.2.3.5 Resistencia aerodinámica del rotor

III.2.3.5.1 Fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga empuja las palas hacia afuera y tiende a arrancarlas del cubo del rotor, dicha fuerza se calcula con la ecuación:

$$F_{cent} = \frac{1}{2} G \frac{u^2}{r_G} = \frac{G \left(\frac{\pi r_G n}{30} \right)^2}{2 r_G} = \frac{\pi^2 G (r_G n)^2}{r_G} = \frac{\pi^2 G \left[\frac{kv(SR)_G}{0.105} \right]^2}{r_G} = \frac{0.1034 G [kv(SR)_G]^2}{r_G}$$

Donde:

G = Es el peso de la pala en kg, y k un valor que depende de las unidades.

$(SR)_G$ = Se calcula en el centro de gravedad de la pala a la distancia r_G

r_G = Es la distancia en metros, desde el eje de rotación del rotor al centro de gravedad de la pala

Como la velocidad del viento está elevada al cuadrado, un aumento brusco de la misma originaría un gran aumento en la fuerza centrífuga.

Existen dos condiciones operativas a tener en cuenta para el cálculo de la fuerza centrífuga:

Lo primero que hay que prever, cuando todavía el rotor está en fase de diseño, es la velocidad del viento máxima que podrá soportar el aparato antes de que el regulador comience a limitar su número de revoluciones.

Una vez construido el aerogenerador hay que prever la máxima velocidad que puede permitírsele alcanzar; si el aerogenerador es pequeño, puede soportar un exceso en la velocidad de rotación de hasta un 50%, pero si es grande, en estas circunstancias, quedaría dañado e inutilizado.

III.2.3.5.2 Resistencia aerodinámica de la pala

Una fórmula aproximada para determinar la resistencia aerodinámica de un aerogenerador en rotación, inmerso en una corriente de aire de velocidad \vec{v} , se puede expresar de la siguiente forma:

$$F_{aerod} = 0.062 A v^2$$

En la que A viene dada en m^2 , y v en m/seg.

Si el aerogenerador está detenido, pero inmerso en la corriente de aire, la resistencia estática aerodinámica por pala se calcula mediante la expresión:

$$F_{estatica\ aerod} = 2\Omega F_{aerod\ en\ movimiento}$$

Momento flector de la pala

Este momento actúa en el plano de rotación, estando localizada la tensión máxima en la zona de implantación de cada pala con el rotor; el par aumenta con el coeficiente de solidez Ω .

El momento flector de la pala se calcula a partir de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas, que son paralelas al eje de giro, a la distancia r_G del mismo, de la forma:

$$M_{flector\ de\ la\ pala} = r_G F_{aerod}$$

Donde la fórmula proporciona sólo un valor aproximado, por cuanto los factores que intervienen en el cálculo, son también aproximados, pero suficientes para gran número de aplicaciones; para valores exactos sería precisa una formulación más compleja.

Momento de torsión del eje de giro

El momento de torsión de las palas respecto al eje de giro (par motor), viene dado por la fórmula:

$$C = \frac{N_{generada\ en\ el\ rotor}}{\omega} = \frac{N_{util} D}{2(TSR)v} \text{ con } \begin{cases} N_{util} \text{ en (Kg/seg)} \\ D \text{ en metros y } v \text{ en (m/seg)} \end{cases}$$

O también

$$\frac{51 N_{util} D}{(TSR)v} \text{ con } \begin{cases} N_{util} \text{ en kW} \\ D \text{ en metros y } v \text{ en (m/seg)} \end{cases}$$

El par motor C así obtenido es el total, por lo que para calcular el par originado por cada pala, habrá que dividirlo por el número de palas Z .

Hay que tener en cuenta que la potencia N_{util} a utilizar es la que se tiene en el eje del rotor, y no en el eje de salida del generador u otro aparato impulsado por la Aero turbina.

III.2.3.5.3 Diseño y calculo simplificado de los aerogeneradores eólicos

Diámetro del rotor

Para calcular el diámetro del rotor, se iguala la potencia específica proporcionada por el generador, a la potencia de salida del sistema a la velocidad máxima del viento; un aumento de la velocidad del viento implica una disminución del diámetro de las palas para obtenerla misma potencia (Tabla III.13).

Tabla III.13 Diámetros de Aeroturbinas pequeñas tipo hélice.

Diámetros del rotor en metros	Numero de r.p.m.		Potencia en kW	
	$v = 5m/seg$	$v = 7m/seg$	$v = 5m/seg$	$v = 7m/seg$
1	935	1340	0.07	0.2
2	470	670	0.27	0.8
3	310	450	0.60	1.8
4	235	335	1.07	5
10	95	134	6.7	20
15	62	90	15	45
20	47	67	26.8	80
30	31	45	60	180
40	23	33	107	320
50	19	27	168	500

Para un rotor que funciona con un TSR fijo, la fuerza centrífuga crece con el cuadrado de la velocidad del viento.

III.2.3.5.3.1 Acoplamiento rotor eólico-generador eléctrico

Dado que el proyecto involucra el desarrollo tecnológico para la desalación de agua salobre con generación híbrida de paneles solares y aerogeneradores, a continuación se especifica la metodología para la construcción de este acoplamiento.

En el acoplamiento del rotor a un generador eléctrico, a través del multiplicador, se tomó en cuenta el número de rpm a que va a funcionar el generador.

Solidez y número de palas

Una vez seleccionada la relación de multiplicación del acoplamiento rotor-generator y por tanto del TSR se determinó la solidez Ω , calculando la relación de velocidades SR correspondiente a secciones de las palas, y el número Z de palas como se muestra en la tabla III.14 y la figura 26; por ejemplo deduciéndose que para un TSR= 6 la solidez tiene que ser del orden de un 5% y el rotor tripala. Sin embargo, el número de palas de un aerogenerador no es de gran importancia en su actuación, por cuanto sus criterios de selección son más bien económicos, ya que a más palas mayor costo; y a mayor número de palas mayor par de arranque.

Tabla III.14 Número de palas en función del TSR.

TSR	1	2	3	4	5 ^a 8	8 a15
Numero De Palas	6 a 20	4 a 12	3 a 8	3 a 5	2 a 4	1 a 2

Perfil de la pala

Interesan perfiles con altos valores de $\frac{D}{L}$ del orden de 60 y C_y próximo a la unidad; el espesor del perfil disminuye desde el tronco con el cubo a la periferia; cuando el espesor del perfil aumenta, disminuye la relación $\frac{D}{L}$ y el perfil transmite menos fuerza al rotor.

Como los perfiles gruesos, por razones estructurales, deben estar más próximos al cubo, producen muy poco par y, por ello, teóricamente, se podrían suprimir en esa zona; concretamente, en el 10% ó 15% de la pala próximo al cubo no sería necesario poner perfiles aerodinámicos, siempre que los problemas de fijación al cubo estuviesen resueltos, que no es el caso en los actuales aerogeneradores; en la periferia de las palas, éstas nunca deben superar espesores del 18%.

Para perfilar una pala se procede en primer lugar a hacer un esquema de la misma, Figura III.34, dividiéndola en varias secciones, calculando la relación de velocidades SR correspondiente a cada una de ellas.

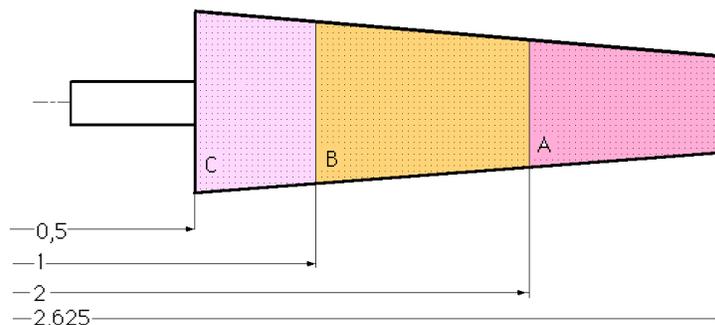


Figura III.34 Secciones de una pala del aerogenerador.

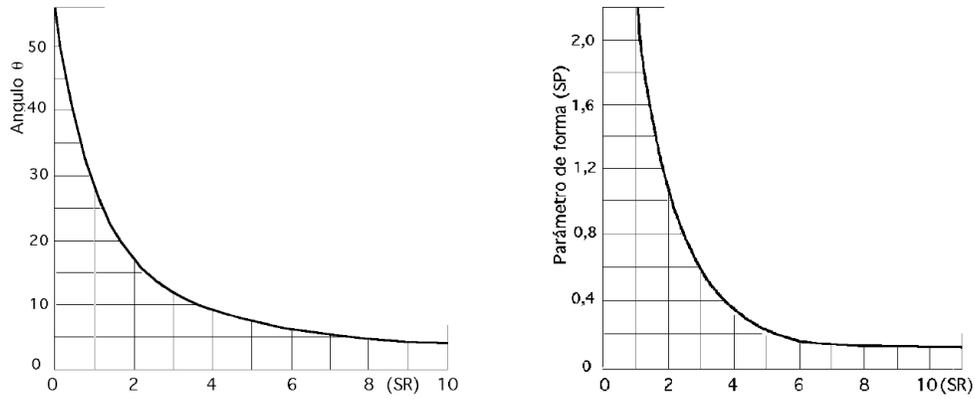


Figura III.36 Valores de θ y de SP en función del SR.

Corrección del ángulo de incidencia

El ajuste del ángulo de ataque α para un valor óptimo de la relación $\frac{C_y}{C_x}$ se puede hacer mediante la siguiente ecuación empírica:

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{C_y}{0.11} \left(1 + \frac{3}{\Delta L} \right)$$

Fuerza electromotriz inducida en una bobina de un generador de flujo axial

Un generador de flujo axial es el que posee un campo magnético paralelo al eje de giro. Por su sencillez de construcción, es el más usado en proyectos piloto con aerogeneradores “sencillos”. Consiste en un disco de hierro, en cuya superficie, y cerca del borde del mismo, van “pegados” los imanes, como se aprecia en la figura III.37:

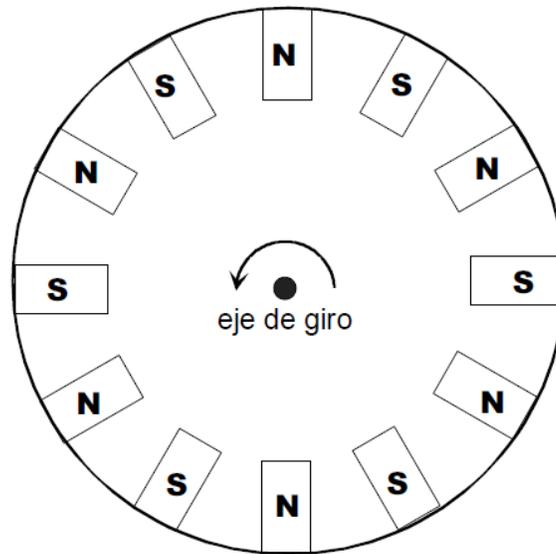


Figura III. 37 Esquema del disco de hierro con la disposición de los imanes.

Donde los imanes giran por delante de un grupo de bobinas de N espiras cada una, que en el caso de un generador monofásico, coincide con el número de imanes (Figura III.38)..

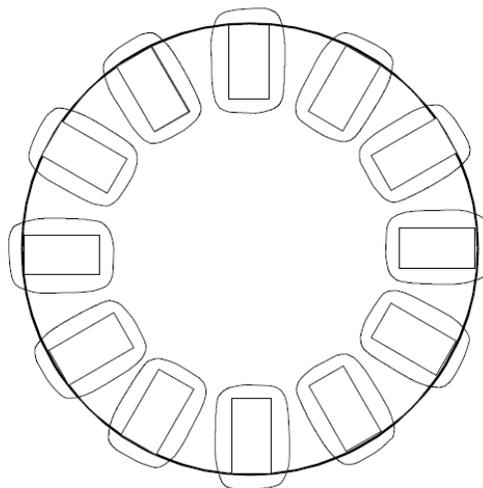


Figura III.38 Esquema de la ubicación de las bobinas en la cara posterior del disco

La fuerza electromotriz inducida en cada una de las bobinas de este generador, se puede obtener a partir de la expresión de Lorentz, (fem inducida en un conductor móvil en el seno de un campo magnético) puesto que aunque, son los imanes los que se mueven realmente por delante de las bobinas, puede considerarse que éstos están quietos y son las bobinas las que giran en el sentido contrario, enfrente de los imanes. En primer lugar obtendremos la fem inducida en un segmento conductor que se mueve con un movimiento circular en el seno de un campo magnético paralelo al eje de giro (perpendicular al círculo).

$$\varepsilon = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} = \oint vBdl = \oint \omega rBdl = \omega B \int_{R_1}^{R_2} r dr = \omega B \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} = \omega B \frac{(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)}{2}$$

$$\varepsilon = \omega B \frac{(R_2 + R_1)}{2} L \quad (1)$$

La expresión (1) es la *fem* inducida en un segmento conductor cuando se mueve enfrente de un imán con su campo magnético perpendicular al círculo. Si el campo magnético es vertical hacia arriba, la polaridad de la *fem* es la indicada en la figura III.39.

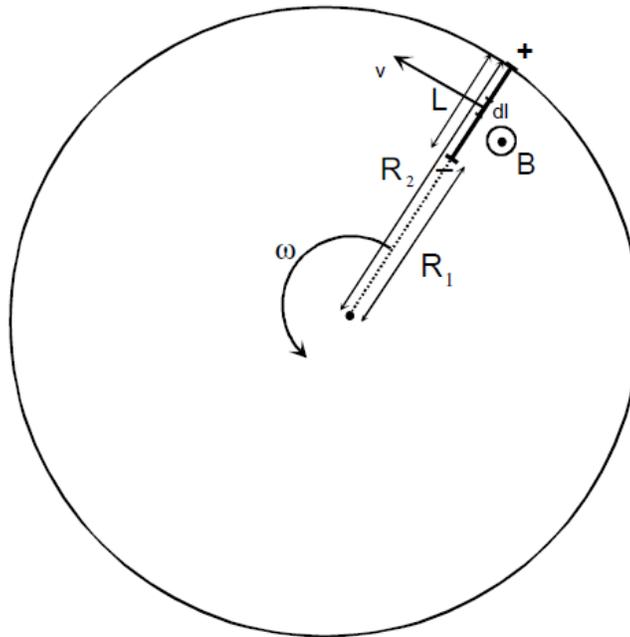


Figura III. 39 Esquema gráfico de la obtención de la fuerza electromotriz inducida.

Cuando una espira como la que se muestra en la Figura III.40, con dos lados en la dirección del radio de la circunferencia, L_1 y L_3 , y los otros dos perpendiculares a dicho radio, L_2 y L_4 . Solo en los lados L_1 y L_3 se puede generar *fem* inducida, cuando se muevan (giren) enfrente de un imán. Si la espira gira enfrente de un imán de un tamaño muy parecido al de la espira, solo uno de los lados estará enfrente al imán, por lo que se generará *fem* en un lado solo, y luego en el otro, pero no en ambos a la vez. Si en vez de tener un solo imán, se tiene un grupo de imanes, alternados en sus polos magnéticos, al girar la espira enfrente de estos imanes, los lados L_1 y L_3 estarán, casi todo el tiempo, enfrente a imanes de polos opuestos por lo que las *fems* generadas en ellos serán opuestas también, y la *fem* total generada en la espira será el doble de la generada en un solo lado.

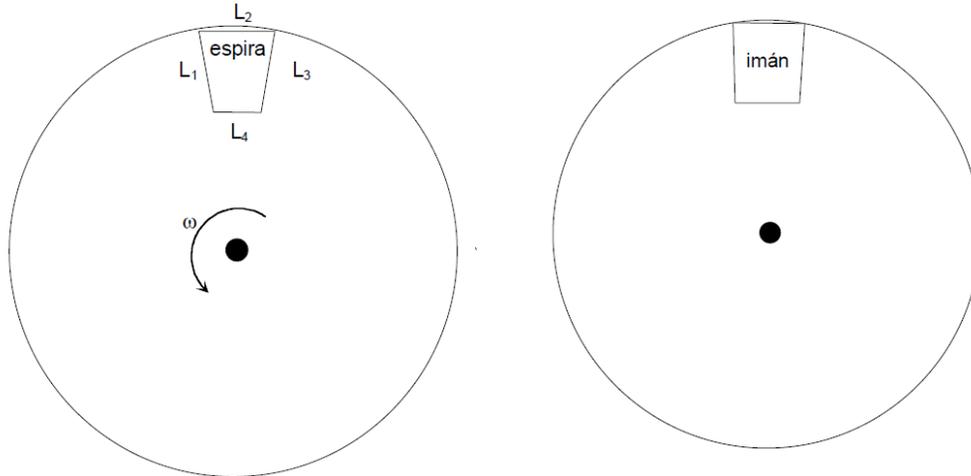


Figura III.40 Esquema de ubicación de la espira y el imán en el disco

$$\varepsilon = 2\omega B \frac{(R_2 + R_1)}{2} L = \omega B (R_1 + R_2) L \quad (2)$$

Entonces una bobina de N espiras, está formada por N segmentos conductores en cada uno de los lados “radiales” de la misma. Por tanto, la *fem* generada en la bobina, será N veces la generada en una de sus espiras.

$$\varepsilon = \omega B (R_1 + R_2) N L \quad (3)$$

La expresión (3) corresponde a la *fem* “alterna” máxima, o de pico, inducida en la bobina. Donde la *fem* “eficaz” estará dada por:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega B (R_1 + R_2) N L \quad (4)$$

Como se ve en la expresión (4), la *fem* eficaz inducida en una bobina de un generador de flujo axial, es proporcional a la velocidad angular, que se mide en vueltas por segundo. Es costumbre medir la velocidad angular en revoluciones por minuto (rpm), en cuyo caso se tendría la expresión

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} (rpm) B (R_1 + R_2) N L \quad (5)$$

Donde *las* (rpm) corresponden a la velocidad de giro de la bobina expresada en vueltas o revoluciones por minuto, R_2 es el radio del disco de hierro donde van “pegados” los imanes, y R_1 es igual a R_2 menos la longitud radial, o altura radial, del imán, $R_1 = (R_2 - L)$. B es el flujo magnético creado por los imanes, que para el caso de imanes de Neodimio, suponiendo que se tienen dos imanes enfrentados y separados a una distancia aproximada de 20 mm, puede llegar a valer 5000 gauss, esto es 0.5 Teslas.

La fórmula (5) no es exacta, sino aproximada, siendo tanto más exacta, cuantos más imanes hay en el disco de giro y consecuentemente, menos espiras existen en la bobina. Esta fórmula, aun siendo aproximada, permite predecir la *fem* que se generará en una bobina de un generador de flujo axial en función de la velocidad angular, en *rpm*, del giro del disco de imanes, dando un valor que es ligeramente superior al valor real. Para obtener un valor más aproximado al real con la expresión (5), se puede introducir un factor geométrico, que tenga en cuenta la superficie de campo magnético.

Como todo el disco no está repleto de imanes, sino que hay una separación entre ellos, el factor geométrico corrector de la fórmula (5) es la superficie de todos los imanes dividido por la superficie total de la corona circular donde esta colocados los imanes, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{S_{\text{imanes}}}{S_{\text{corona circular}}}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}}(rpm)B(R_1 + R_2)NLf_c \quad (6)$$

Para aumentar esta *fem*, se colocan varias bobinas, igual al número de imanes para un generador monofásico, que se pueden conectar en serie, formando grupos de bobinas, donde habrá que multiplicar el valor de la *fem* de una bobina, por el número de bobinas conectadas en serie. Además, se suelen montar dos discos de imanes enfrentados entre sí, separados de modo que en medio de los imanes se pueden colocar las bobinas, en cuyo caso hay doble número de imanes que de bobinas. Evidentemente, los polos de dos imanes enfrentados entre sí deben ser opuestos, como se ve en la figura III.41.

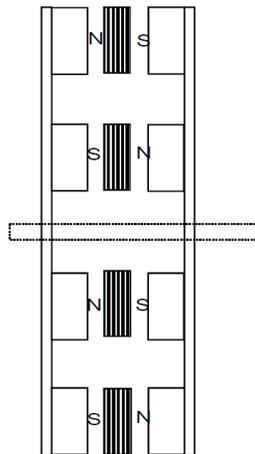


Figura III. 41 Esquema de la colocación de las bobinas y los imanes.

III.2.3.5.3.1 Planos de diseño de la estructura base del aerogenerador

Los planos para la construcción del aerogenerador, se trazaron en Autocad mostrándose en las figuras III.42 a III.49.

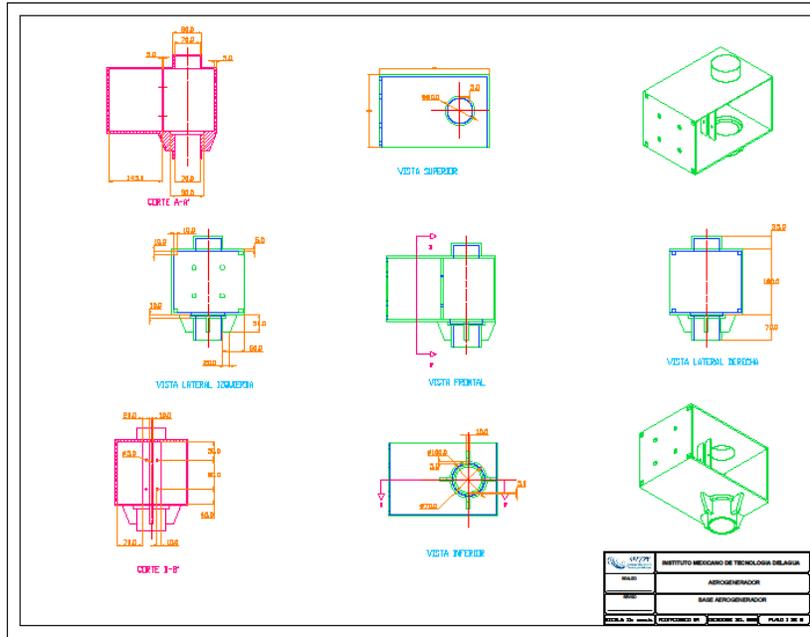


Figura III.42 Plano de la estructura de ensamble de la base del aerogenerador.

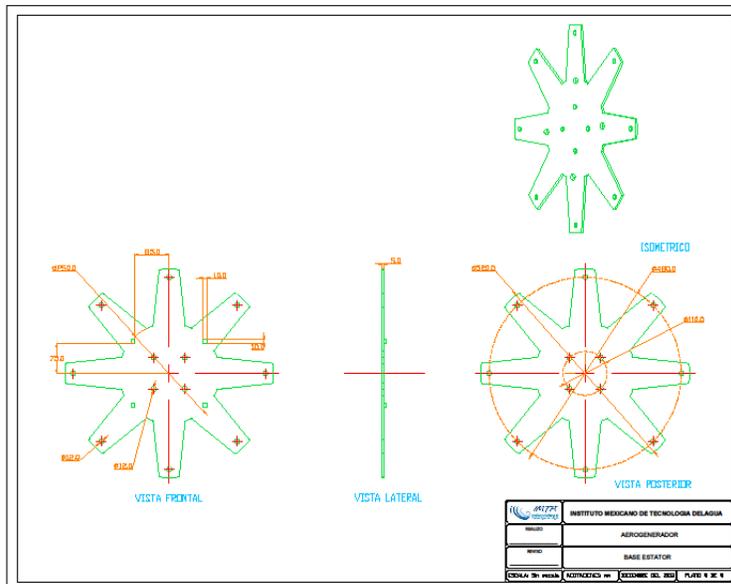


Figura III.43 Plano de base del estator.

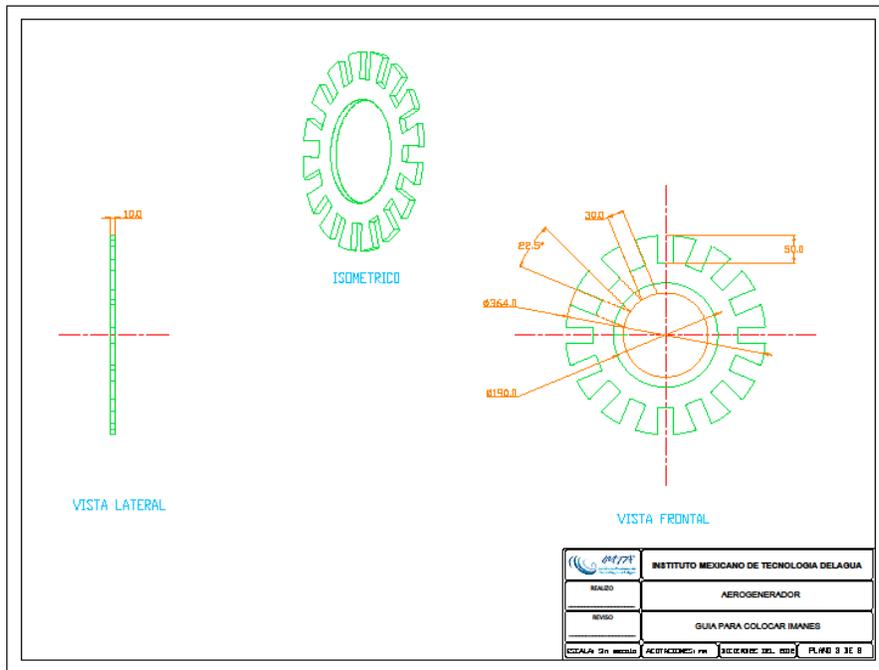


Figura III.46 Plano para la colocación de imanes.

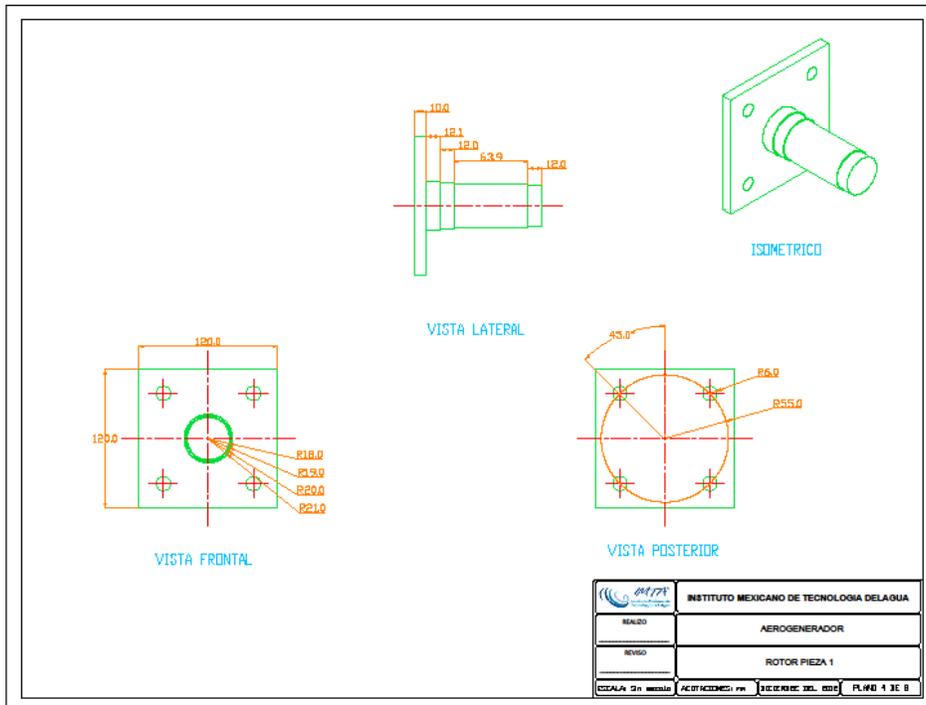


Figura III.47 Plano de montaje del rotor, parte 1.

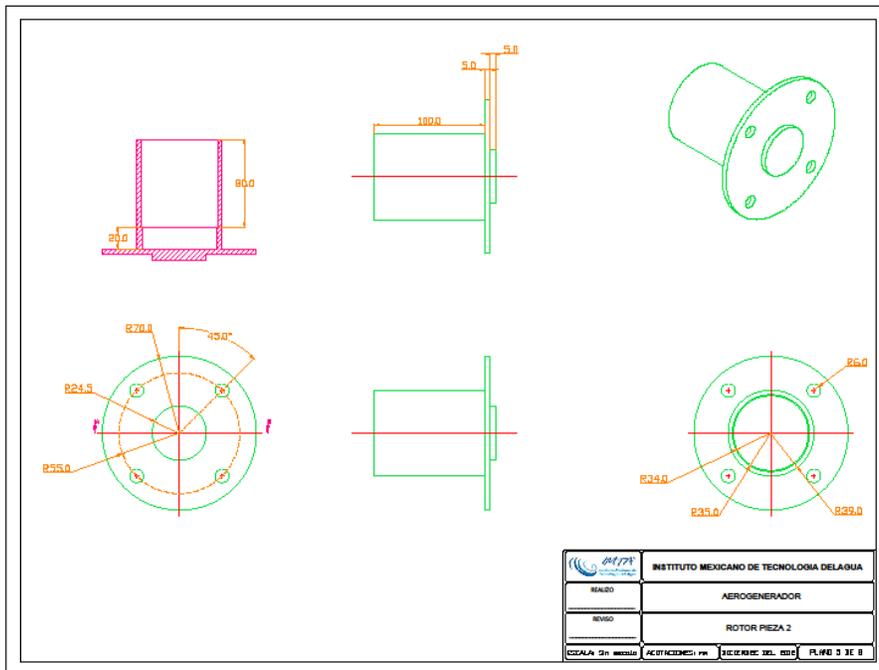


Figura III.48 Plano de montaje del rotor, parte 2.

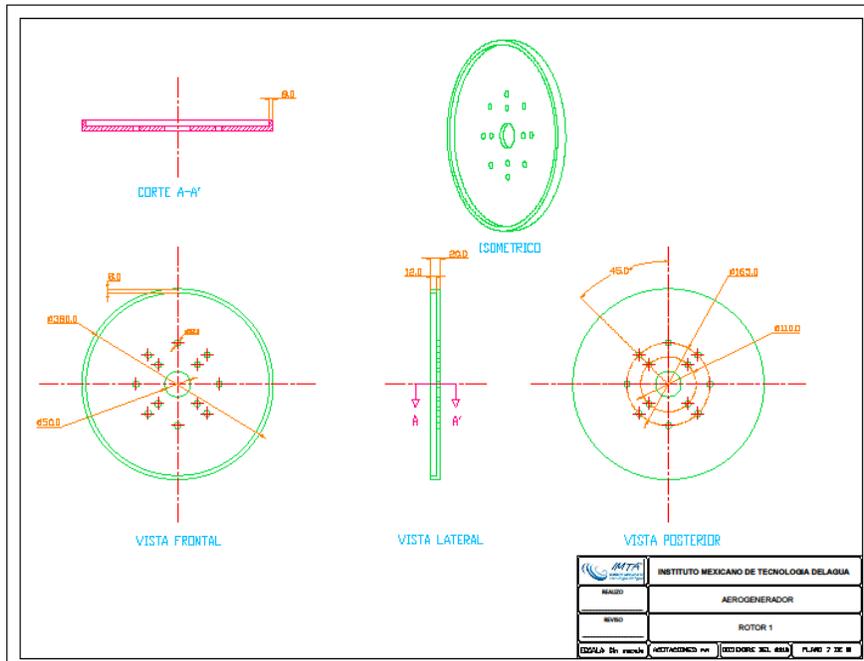


Figura III.49 Plano de la estructura del rotor.

III.2.3.5.3 Diseño del proceso de construcción

El diseño del proceso de construcción debe iniciar con la fabricación de la plantilla para la distribución de los imanes. La plantilla, es un cuadrado de 364 x 364 mm. Donde se trazan los ejes coordenados en el centro; y la intersección está en el centro de la circunferencia (Figura III.50).

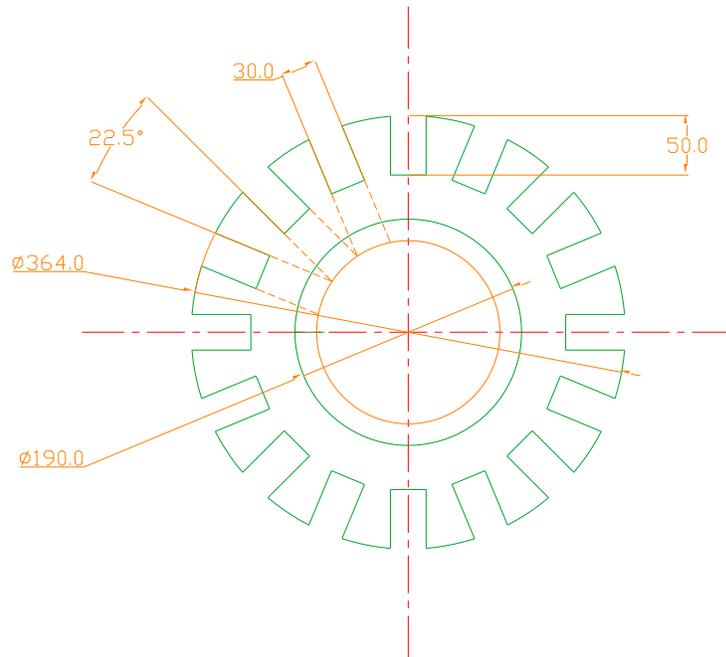
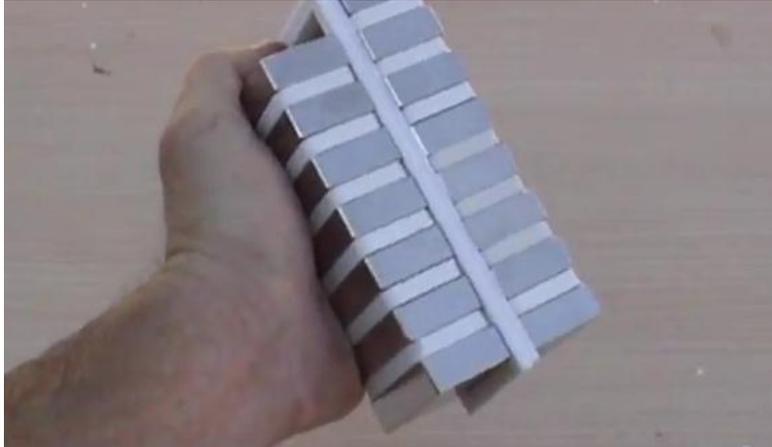


Figura III.50 Plantilla para la colocación de los imanes.

Los números 50 y 30 mm corresponden al largo y ancho del imán que se debe usar para este caso específico. El número de 364 mm es el diámetro del rotor y los 190 mm especifica el sitio por donde debe pasar el eje del aerogenerador.

Teniendo la plantilla y las bases del rotor se deben colocar los imanes.

Los bloques de imanes pueden ser de varias formas geométricas, tales como rectangulares, cuadrados, trapezoidales, circulares, etc. Para la construcción de este generador se debe emplear imanes rectangulares de neodimio.



Cada bloque de imán tiene una cara polo norte “N” (positivo) y otra polo sur”S” (negativa). Para determinar el polo es necesario acercar con mucho cuidado dos imanes, donde el que atraiga al otro será polo norte, y el que tiende a acercarse será polo sur

Para la colocación de los bloques de imanes sobre la superficie del disco, primero se debe limpiar con alcohol, pues no debe haber ningún tipo de suciedad y/o grasa sobre ella. Para colocar los imanes se debe usar la plantilla. Los imanes se deben alternar de la forma N-S-N-S... (polo norte, polo sur, polo norte, polo sur, hasta terminar).



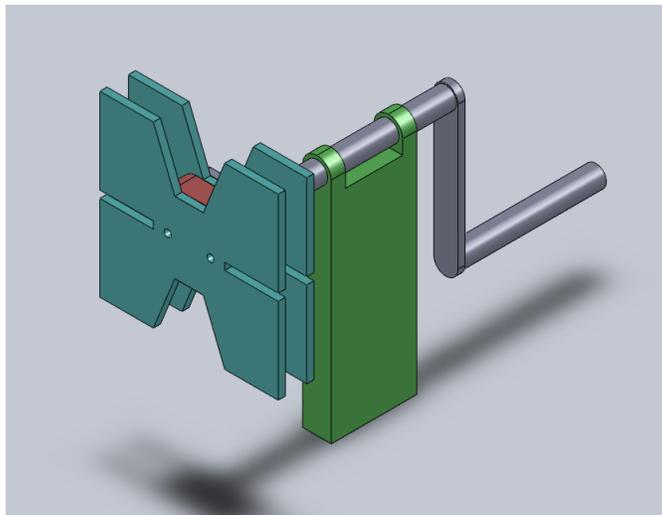
Terminada la ubicación de los imanes sobre la superficie en los discos se deberá colocar una capa de resina industrial para fijarlos. Este procedimiento se realiza para los dos discos que forman el rotor y se dejan secar hasta que ésta seque completamente



Estator

Elaboración de las bobinas

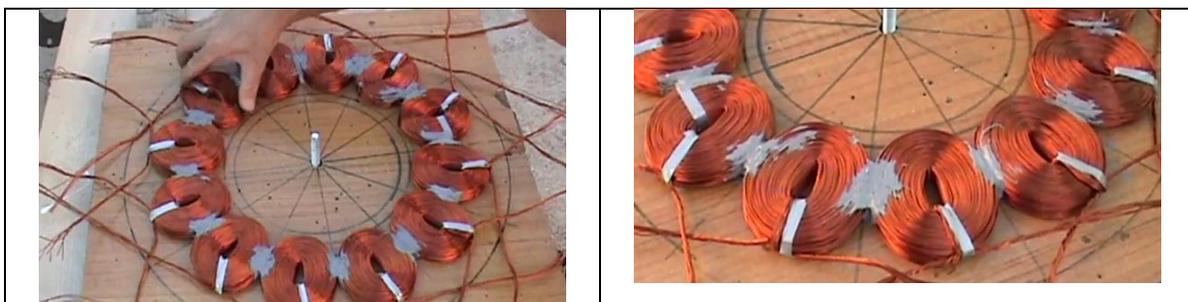
Se requiere de un dispositivo con la forma de las espiras, en este caso de forma cuadrada de 50 x 50 mm. El dispositivo que se puede construir en madera de triplay, conformado por cuatro piezas, dos tipo H, y una de forma rectangular y con una manivela que una todas las piezas. (Las dimensiones se detallan en los planos anexos)



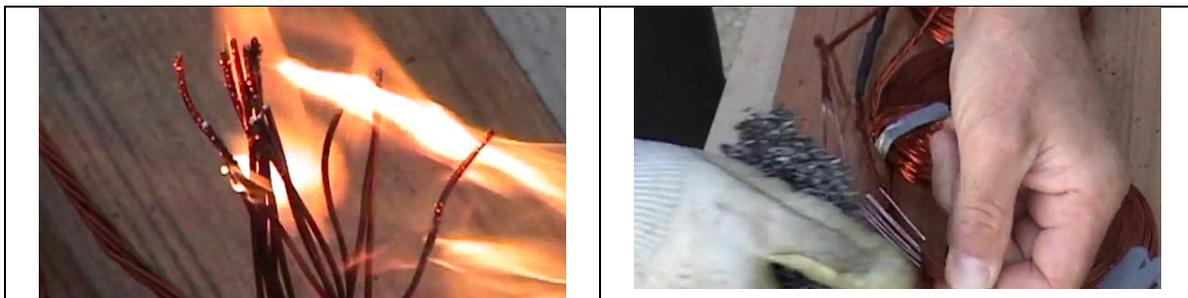
Para la elaboración de cada bobina se requiere de 13 m de alambre de cobre de 0.90mm de diámetro, dividido en siete hilos, para un total de 12 bobinas donde cada una genera aproximadamente 2.30 v a 106 rpm



Una vez construidas las bobinas se deberán colocar sobre la plantilla y se distribuyen de manera uniforme aislando una de otra

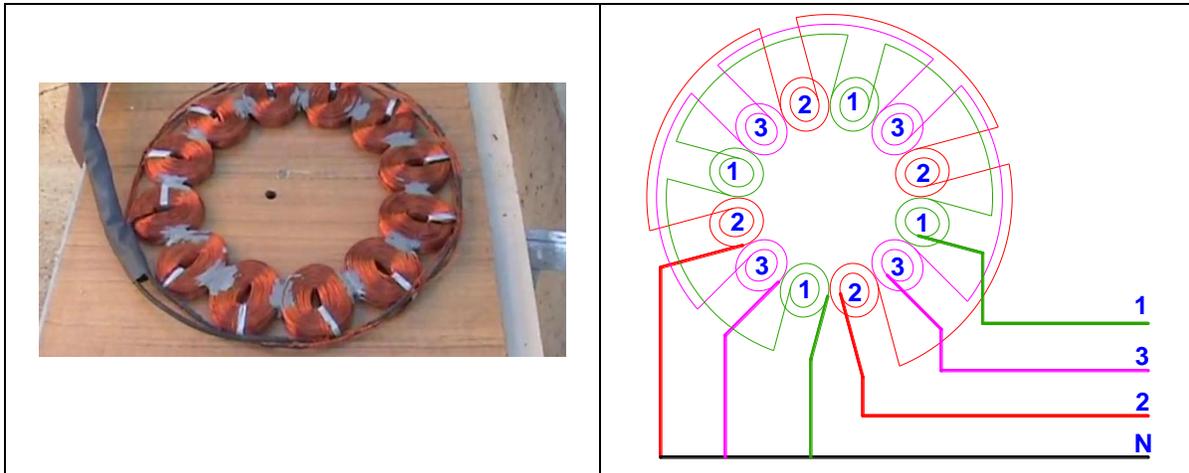


Posteriormente se debe proceder a conectar las bobinas, comenzando por limpiar las puntas lo que se debe hacer con un soplete y posteriormente lijando cada hilo para evitar que pueda haber algún falso contacto

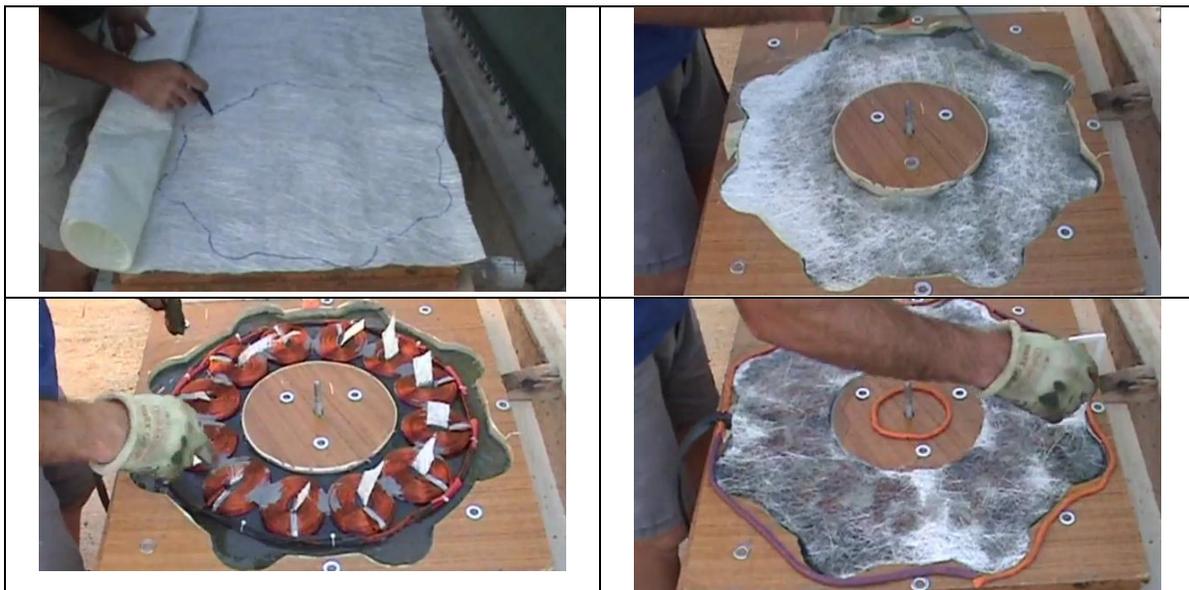


Para la conexión entre bobinas se utilizará soldadura de estaño y soplete, la conexión se debe hacer en estrella, y para proteger la conexión se utiliza un poco de termofit.

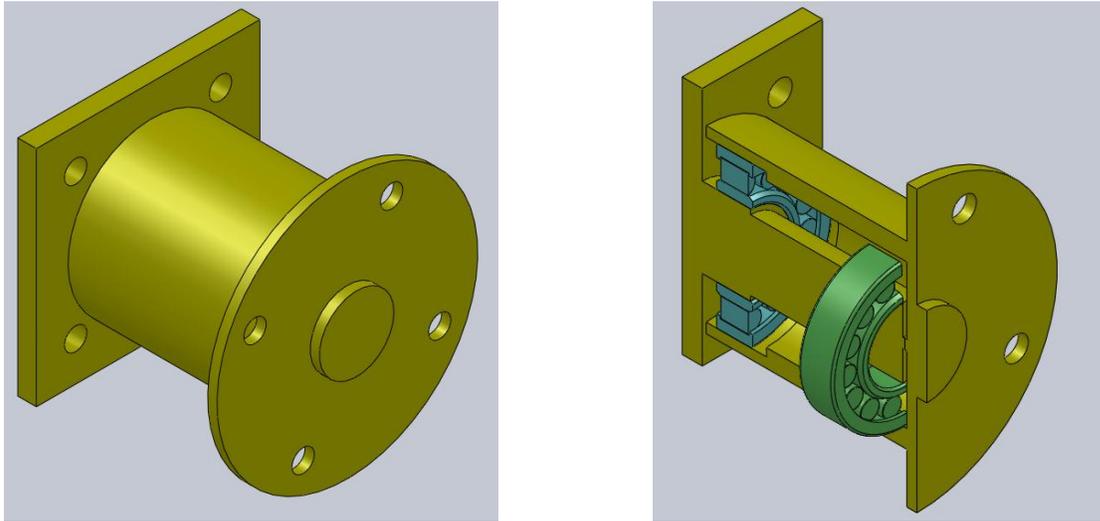




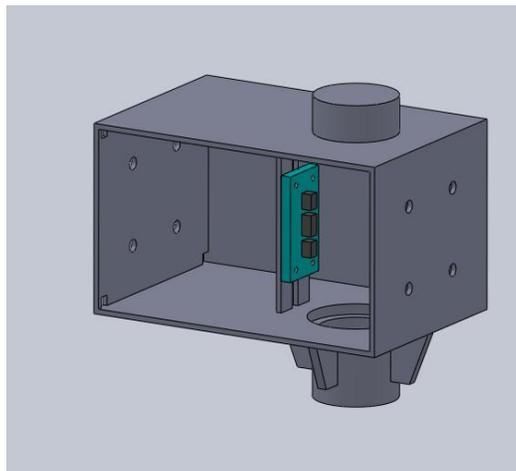
Ya con las bobinas interconectadas, se pasará a recortar la fibra de vidrio con la plantilla hecha previamente. Y finalmente se colocará la tapa.



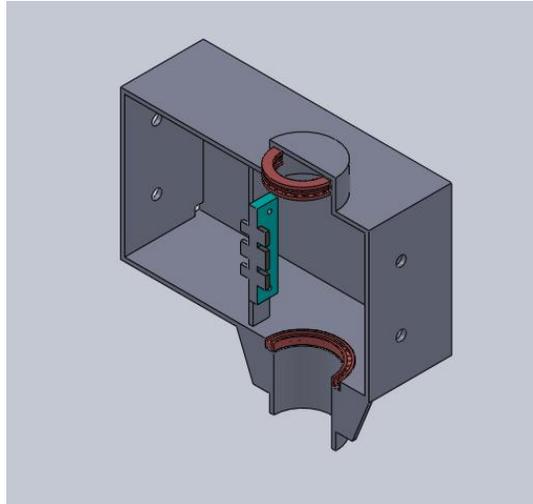
El armado del eje consta de cuatro piezas dos rodamientos de rodillos, una pieza que va fija a la base del aerogenerador y la otra que va unida al rotor



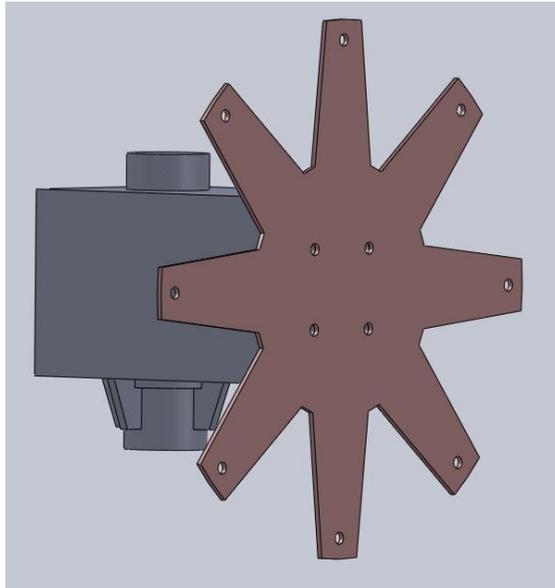
Teniendo armado el estator, el rotor y los dos discos del rotor con los imanes, se procede con el ensamble de todas las piezas. Lo primero será colocar las escobillas que colectan toda la energía que se genera y la manden al banco de baterías.



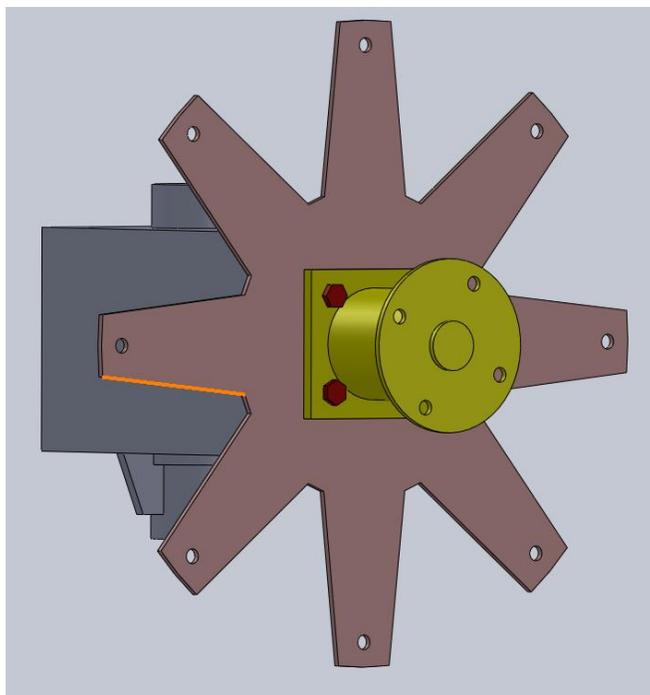
Posteriormente se colocarán los rodamientos que son, uno de rodillos axiales para carga y va colocado en la parte superior del poste que sostendrá el aerogenerador, y el otro es de bolas y es radial y va en la base de la caja que será el cuerpo del aerogenerador.



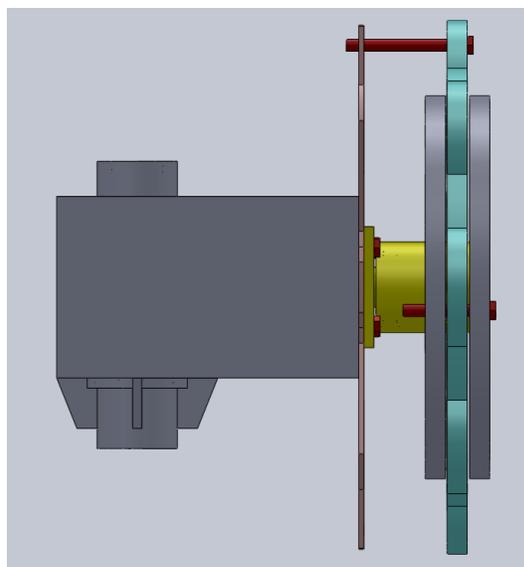
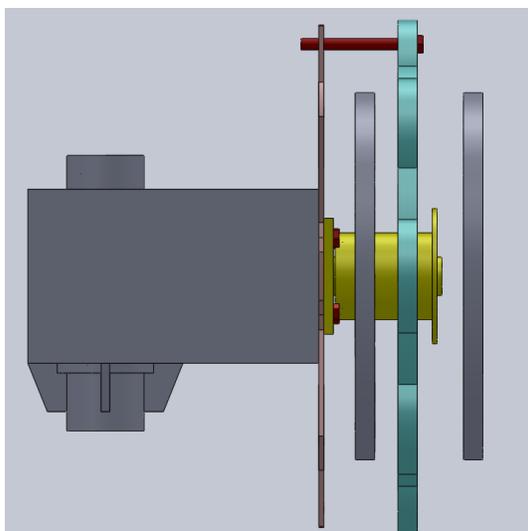
Se continuará con la base sobre la cual se monta el estator, la cual va soldada.

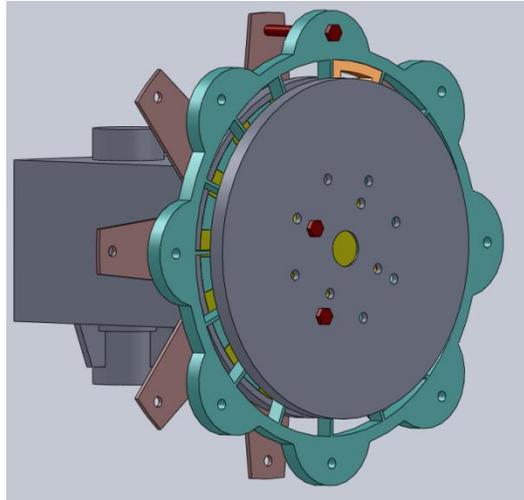


Una vez colocado la base del estator, se continuará con la pieza que servirá como eje de giro de los alabes, que previamente ya se debe haber armado.

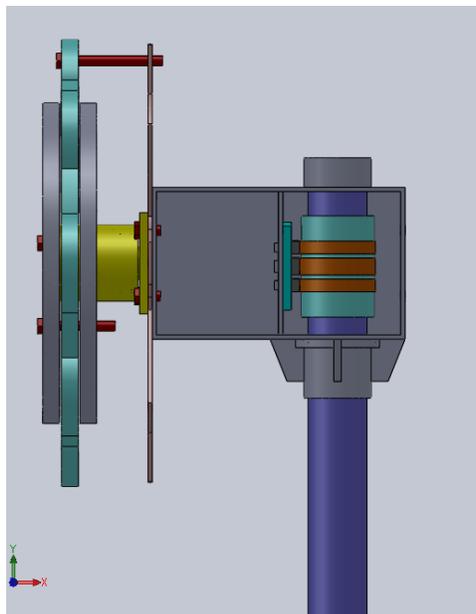


Para colocar el estator, es necesario primero introducir uno de los discos del rotor ya que el estator, queda en medio de los dos discos, después se fijará el segundo disco al eje de giro y se verificará la separación entre los discos del rotor, ya que entre más cerca estén uno del otro será mejor, dejando el espacio suficiente para que no se choque con el estator.

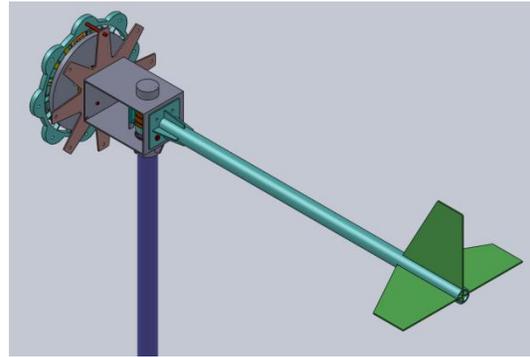
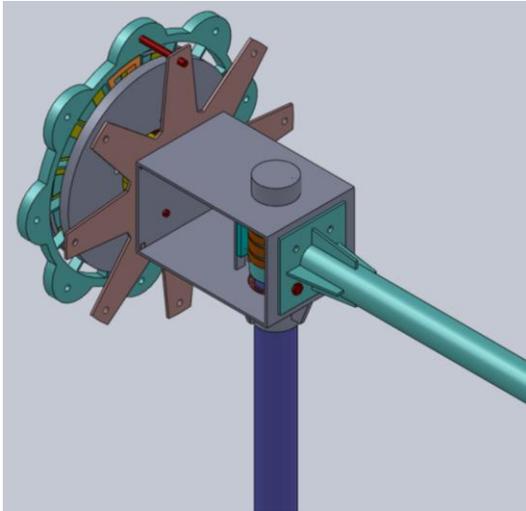




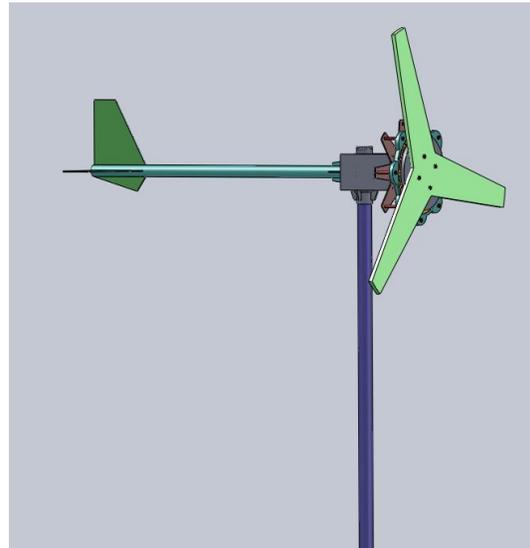
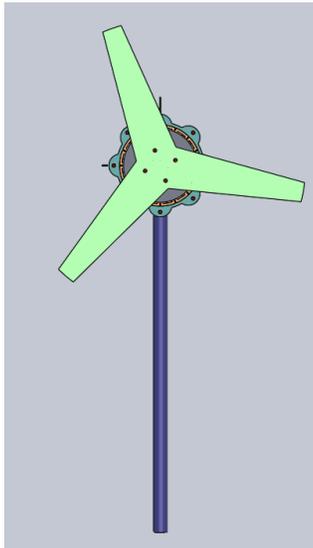
Después de esto se procederá a colocar el tubo sobre el cual estará montado el aerogenerador, y a la par se instalará el colector, que es un contacto deslizante, para que no se vayan a enredar los cables que vienen del alternador axial y pueda girar libremente.



Posteriormente se atornilla la veleta a la parte posterior del cuerpo del aerogenerador.



Finalmente se colocan los alabes



III.2.3.6 Análisis de la viabilidad técnica del uso del aerogenerador para la zona de proyecto.

Dado que en la zona de proyecto (Jalpan Querétaro) se presentan rachas de viento extremo con periodos de no viento, se observó que esto provoca un sobre calentamiento de la bomba, dañando los componentes eléctricos, por lo cual finalmente se llegó a la conclusión de que la aplicación del aerogenerador no constituía una solución apropiada para impulsar el bombeo para riego en la zona, considerándose como única alternativa de impulsión de las bombas, el uso de los paneles solares.

III.2.4 Cárcamo, tanque de almacenamiento, y sistema de riego

Para el suministro del riego fue necesaria la construcción de un cárcamo de bombeo (figura III.51) y tanque elevado de almacenamiento del agua (Figura III.52), el cual tiene una capacidad de 100 m³, por lo que el agua almacenada en éste, permitirá al productor realizar 2 riegos a máxima demanda.

El tanque de almacenamiento para el agua de riego, tiene forma circular con 4.56 mts de diámetro y 2.50 mt de altura, y se encuentra protegido con una tapa, fue construido con membrana de polietileno de alta densidad de 1 mm. Para la unión de las capas entre las membranas, se utilizó la técnica de termofusión; y reforzado con estructura de malla galvanizada, y completado colocándole una brida, un cople y una válvula esfera de 2" para el desfogue.

Las bombas de agua para el bombeo del riego (Figura III.53), son impulsadas por la energía captada en los paneles solares y que es transformada en energía eléctrica (Figura III.54)

Para conducir el agua de almacenamiento del tanque hacia la parcela, para el riego; se consideró una válvula de paso, un filtro de mallas en los primeros 25 metros, y a los 100 metros, una válvula de aire, un sistema inyección (Venturi, pérdida de carga de 6 metros aproximadamente), una T con dos líneas regantes, que constituyen el sistema de riego (Figura III.55); cada con una válvula de operación y al final una válvula de aire.





Figura III.51 Cárcamo de bombeo



Figura III.52 Tanque de almacenamiento elevado



Figura III. 53 Bombas sumergibles para bombeo del riego



Figura III.54 Instalación de los paneles solares que generarán la energía para impulsar las bombas.



Figura III. 55 Instalación del sistema de riego

III.2.5 Sistema de riego.

Dado que el proyecto busca el aprovechamiento de las tecnologías desarrolladas en la actividad agrícola se sugirió complementarlo estableciendo un sistema de riego por goteo. El diseño del sistema propuso un gotero cada 30 centímetros con espaciado de surcos a cada metro (Figura III.56).

Para alimentar el sistema de goteo se requirió de 250 metros de manguera de 2" de diámetro de alta resistencia que se utilizará como conducto principal y 230 metros de línea regante con manguera del mismo tipo y diámetro.

Bajo este esquema cada gotero proporcionará 1 lt/hr de agua de riego. Y cada línea de 100 metros contendrá 334 emisores que al considerar 101 mangueras de suministro por hectárea se tendrá un total de 33,734 emisores capaces de suministrar una lámina de 3.37 mm en una hora, por lo que para suministrar la máxima demanda en términos de 5.5 mm de lámina se deberá regar cada hectárea en un tiempo aproximado de 1 hr con 40 minutos.





Figura III.56 Líneas regantes del sistema de riego.