



COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE CONSERVACIÓN DE CUENCAS Y TECNOLOGÍA FORESTAL

VALIDACIÓN DEL USO DE ENERGÍA RENOVABLE PARA SU APLICACIÓN EN EL SUBSECTOR AGRÍCOLA

PROYECTO RD-1307.1

INFORME FINAL



Diciembre, 2013.

Directorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Director General

M.I. Víctor Javier Bourguett Ortíz

Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Nahun Hamed García Villanueva

Subcoordinador de Conservación de Cuencas y Tecnología Forestal.

Dr. José Javier Ramírez Luna.-Jefe de proyecto

Equipo técnico

Dr. José Jassón Flores Prieto, Profesor invitado del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Ing. Emir Delgado Quezada. Esp. En Hidráulica.

de la Subcoordinación de Conservación de Cuencas y Tecnología Forestal

M.C. Olga Xóchitl Cisneros Estrada. Esp. En Hidráulica

de la Subcoordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola

Apoyos:

Ing. Ivonne Vega Ramírez

Ing. Cesar Soriano Catana

Ing. Laura Bautista Álvarez

Lic. Zenaida García Galván

Resumen Ejecutivo

En distintas partes de México existen zonas con alto potencial agrícola donde la tecnología de riego es poco competitiva o aún no es una realidad y éste depende de la explotación de pozos con agua de reducida calidad. En algunos casos, el agua es salobre, misma que limita la productividad agrícola en distintos grados, reduciendo así el rendimiento de los cultivos. Ante tal situación, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, a través de la Coordinación de Riego y Drenaje se propuso desarrollar tecnología que aprovechara las bondades de la energía renovable, para obtener agua de mejor calidad para lograr un uso más eficiente del riego agrícola. Para tal fin por un lado se desarrolló un Sistema Desalador Autónomo Solar (SDASANS), que mejora la calidad del agua; el sistema trabaja con energía fotovoltaica y utiliza membranas de nanofiltración, por ósmosis inversa, que operan a baja presión. Por otro lado se desarrolló y validó un sistema de riego presurizado (por goteo) que funciona mediante energía solar fotovoltaica, el cual permite hacer un uso más eficiente del agua. También se identificó un sistema para suministro eléctrico híbrido fotovoltaico-eólico mediante paneles solares y aerogeneradores, el cual puede ser controlado mediante un acoplado; tecnología que puede ser utilizada para el bombeo del riego.

La funcionalidad del SDASANS se validó en términos del permeado (efluente filtrado), en relación a la disponibilidad del recurso solar (Intensidad Energética, *IE*) y observando la aceptación de los usuarios de la tecnología. La tecnología desarrollada, permite que en sitios aislados se trate agua salobre para uso agrícola con contenidos menores que 5000 TDS, para obtener valores tolerables de TDS, y SO_4 . A fin de verificar la funcionalidad de la tecnología desarrollada, se llevaron a cabo pruebas en condiciones de laboratorio y pruebas en campo del sistema desalador y pruebas en campo del sistema de bombeo presurizado. El desarrollo de las soluciones para la desalación del agua, la operación para el bombeo y el riego presurizado utilizando energías alternas, se hicieron por separado, dado que las tecnologías debían desarrollarse en paralelo para cumplir con los tiempos del proyecto.

En el caso de la tecnología de riego presurizado fotovoltaico, para validarla, se seleccionó un cultivo de calabaza en una de las unidades de riego del Municipio de Jalpan, Querétaro. Para el sistema de desalación en campo se seleccionó agua salobre con sólidos disueltos totales de 3430, donde los sulfatos es lo que principalmente afecta la calidad del agua, esto en el municipio de Rio Verde, SLP. Las pruebas a nivel de laboratorio se realizaron en las instalaciones del IMTA en Jiutepec, Morelos. En la etapa de pruebas de laboratorio se realizó una evaluación y optimización del sistema de desalación por nanofiltración solar. Para esto, se generaron muestras sintéticas de agua salobre con concentraciones de 1107 TDS (2080 $\mu S/cm$), bajo una insolación promedio de 4.1 kWh_pico/día. El sistema inicialmente trabajó a una presión promedio de 57 ± 15 mca, produciendo 1.45 m³ de agua a

razón de $0.35\text{m}^3/\text{h}_{\text{pico}}$, con una intensidad energética de $2.83\pm 0.4\text{ kW-h}/\text{m}^3$. Lo que significa que en Jiutepec, Morelos donde se presenta una insolación promedio-anual de $5.0\text{ h}_{\text{pico}}$, esta versión del SDASANS puede entregar $2.2\text{ m}^3/\text{día}$ de agua apta para riego agrícola. Una vez modificando el sistema, optimizado sus circuitos hidráulicos y eléctricos, considerando el punto de máxima potencia, en su segunda versión, logró trabajar 54% por arriba de la capacidad inicial, con una IE de $1.83\text{ kW-h}/\text{m}^3$, pudiendo entregar $0.55\text{ m}^3/\text{h}$ bajo las mismas condiciones de radiación solar.

Por otro lado, los resultados obtenidos en campo durante la validación del SDASANS, permitieron determinar que el sistema puede trabajar con una intensidad energética de $1.98\text{ kWh}/\text{m}^3$, $0.1\text{ kWh}/\text{m}^3$ por arriba de las condiciones de laboratorio, lo que indica que en una zona con $6.3\text{ h}_{\text{pico}}$ de insolación (equivalente a 6.3 horas con 1000W solares, como lo que se tiene en Rio Verde, SLP) es posible permear (filtrar) hasta $3.18\text{ m}^3/\text{día}$, con una alta eficiencia de remoción de sulfatos (97.5%). Durante las pruebas se observó que el desempeño del sistema de desalación es bueno y que es una tecnología viable de ser utilizada en campo con alto potencial para su aprovechamiento en riego agrícola, por su facilidad para operarlo y por la alta calidad del agua que entrega. El sistema de riego presurizado fotovoltaico se operó en una parcela de una hectárea con cultivo de calabaza; perteneciente a la Unidad de Riego Jalpan, Qro., donde las pruebas realizadas permitieron observar que el sistema trabaja con una intensidad energética de $0.17\text{ kWh}/\text{m}^2$, (suministrando $6.05\pm 0.76\text{ m}^3/\text{kWh}$), con una eficiencia electromecánica del $59\pm 7\%$ bajo las condiciones climatológicas de la zona de estudio. En general, se observó que utilizando energía fotovoltaica se puede mejorar la calidad del agua salobre para riego y bombear el agua para riego presurizado de manera viable. El riego presurizado fotovoltaico tuvo un costo energético de $0.17\text{ kWh}/\text{m}^3$ y la desalación implicó un costo energético de $1.98\text{ kWh}/\text{m}^3$, por lo que la intensidad energética de la solución integrada propuesta en este trabajo es de sólo $2.15\text{ kWh}/\text{m}^3$, cabe resaltar que el sistema integrado presentó una alta aceptación entre los productores de las zonas de estudio.

Para las pruebas de los generadores eólicos se realizó la conexión a un banco de baterías comerciales; las cuales se conectaron en paralelo, ya que esto permite obtener una salida de dos veces la capacidad de las pilas individuales, manteniendo el mismo voltaje nominal, obteniendo una tensión de salida de 12 Voltios y una capacidad total de 330 AMH , que es la capacidad que identifica la máxima cantidad de carga que puede almacenarse en el banco de baterías, misma que es posible utilizar como energía para el bombeo. Concluyéndose que el quipo funciona satisfactoriamente de acuerdo a las pruebas realizadas, monitoreando variables de voltaje y corriente (voltios y amperes), de cada aerogenerador, así como también del banco de baterías; el sistema de control funcionó correctamente ya que tiene integrado un sistema de protección contra sobrecorrientes en la parte de generación (generador eólico), y protección contra corto circuito en la parte de carga (baterías), así

como también se integró un controlador de carga, que monitorea el estado de carga de las baterías y los aerogeneradores.

ÍNDICE

Capítulo I.-Desarrollo Tecnológico para la desalación de agua salobre con generación híbrida de paneles solares y aerogeneradores.....	10
I.1 Solución comercial para desalación y bombeo	10
I.1.1 Tipos de Turbinas	10
I.1.2 Solución integrada	11
I.2 Diseño para la solución integrada de aprovechamiento de energía alterna	14
I.2.1 Acoplamiento Control de carga – Bomba.....	15
I.2.2 Funcionamiento del sistema de energía	15
I.2.3 Armado y prueba del gabinete de control con soluciones comerciales.....	17
I.3 Implementación de la solución comercial para aprovechar la energía eólica	20
I.3.1 Recomendaciones para la instalación de los generadores eólicos	24
Características y conexión del banco de baterías:	27
Monitoreo de voltaje de las baterías de ciclo profundo a 12 V de 110 AMH.	30
Monitoreo de voltajes de los aerogeneradores eólicos de 300 Watts a 12 VCD.....	31
Capítulo II. Sistema de Bombeo solar para riego presurizado.....	31
II.1 Selección del sitio para probar el sistema de bombeo solar para riego presurizado.....	32
II.2 Evaluación hidráulica y energética del sistema	32
II.3 Evaluación del sistema de riego presurizado de baja presión (Goteo con cintilla)	33
II.4 Datos de la evaluación del sistema	34
II.5 Bases constructivas del sistema de bombeo presurizado operado con energía solar.....	36
II.6 Análisis costo-beneficio	39
Capítulo III. Sistema de desalación solar por nanofiltración.....	40
III.2 Implementación del sistema de desalación solar por nanofiltración	42
Membranas.....	42
III.3 Validación del sistema de Desalación en Laboratorio	43
III.3.1 Monitoreo y Evaluación en laboratorio.....	45
III.3.2 Resultados y recomendaciones de la validación de laboratorio	47
III.3.3 Conclusiones	53
III.4 Validación del sistema de Desalación en campo.....	53
III.5 Análisis Costo-Beneficio de la implementación de la tecnología del SDASANS	56
IV. Sistema integrado Desalador +Riego con energía solar.....	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Rotor Savonius, Turbina Darrieus y Molino de viento con velas..... 10

Figura 1. 2. Molino de viento, Multi-pala de bombeo para ganado y aerogenerador moderno 11

Figura 1.3 Circuito de convertidor CA-CD..... 13

Figura 1.4 Circuito de control de carga..... 14

Figura 1.5 Diseño del circuito impreso para el control de carga..... 15

Figura 1. 6 Circuito de acoplamiento potencia-control..... 15

Figura 1.7 Circuito de acoplamiento con relevadores 16

Figura 1. 8 Circuito de acoplamiento con relevadores y baterías..... 16

Figura 1.9 Circuito de acoplamiento con relevadores y sistema de protección con resistencias 17

Figura 1.10 Relación RPM Vs Voltaje de aerogeneradores..... 19

Figura 1. 11 Armado de circuito de control de los aerogeneradores..... 20

Figura 1. 12. Partes del aerogenerador..... 21

Figura 1.13 Ensamblado de Turbinas..... 22

Figura 1. 14 Turbina armada de 6 aspas o palas. 23

Figura 1. 15 Curva que relaciona la velocidad del viento (m/s) Versus la generación de electricidad en (Kw/h). 24

Figura 1.16 Relación entre la altura de turbinas con % de aprovechamiento del viento..... 25

Figura 1.17 Gabinete de 400mm x 500mm x 210 mm..... 26

Figura 2- 1 Localización de la parcela 32

Figura 2- 2 Eficiencia de bombeo y radiación solar..... 33

Figura 2- 3 Ubicación de los puntos de aforo del riego por goteo 34

Figura 2- 4 Lecturas de los aforos. 34

Figura 2- 5 Ubicación de los goteros 35

Figura 2- 6 Construcción del reservorio..... 37

Figura 2- 7 Construcción del cárcamo 37

Figura 2- 8 Colocación de módulos fotovoltaicos..... 38

Figura 2- 9 Instalación del sistema de riego..... 39

Figura 3- 1 Diagrama de flujo del proceso..... 42

Figura 3- 2 Sistema de desalación por Nanofiltración. 43

Figura 3- 3 Gráfica I-V para diferentes niveles de irradiancias de los módulos del SFV 45

Figura 3- 4. Diagrama de la operación del sistema 46

Figura 3- 5 Instrumentación del equipo de desalación.....	47
Figura 3- 6. Intensidades energéticas evaluadas del SDASANS	48
Figura 3- 7 Comparativo del SDASANS respecto a trabajos reportados.....	48
Figura 3- 8 Desempeño del SFV con el acoplamiento de la bomba de agua.	50
Figura 3- 9 Comparativo de Potencia SBF vs PMP	51
Figura 3- 10 Comparativo de Potencia SBF vs PMP	51
Figura 3- 11 Comparativo de Potencia SBF vs PMP	52
Figura 3- 12 Optimización del sistema de desalación solar por nanofiltración.	53

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Prueba 1. Datos obtenidos experimentalmente del acoplamiento del motor de corriente directa al generador eólico	18
Tabla 2. Prueba 2. Datos obtenidos experimentalmente del acoplamiento del motor de corriente directa al generador eólico	19
Tabla 3. Resultados de eficiencias.	33
Tabla 4. Resultados de aforos en los goteros.	35
Tabla 5. Costos del proyecto	39
Tabla 6. Beneficios de la tecnología integrada.....	40
Tabla 7. Balance de materia (Agua y sales) y de presiones en el prototipo de desalación.....	42
Tabla 8. Calidad del agua utilizada en las pruebas del SDASANS.....	44
Tabla 9. Eficiencias de remoción obtenidas con el SDASANS.	48
Tabla 10. Comparativo de presiones y flujos en las diferentes membranas.....	49
Tabla 11. Resultados de Pruebas de Funcionamiento	55
Tabla 12. Análisis de costos	56
Tabla 13. Productividad y eficiencia energética.	57

Introducción

En América Latina y en particular en México existen grandes extensiones de tierras salitrosas en donde la vegetación es escasa o nula. De acuerdo al ILRI Annual Report 1995 y Pulido-Madrigal en 1996, se observa que el 15% del suelo nacional tiene exceso de sales que limitan las actividades agrícolas. La combinación de factores entre ellos el suelo salitroso y agua de riego de muy baja calidad, y alta incidencia de radiación solar hacen de este tipo de lugares verdaderos páramos. En muchos de los casos la salinidad de las tierras se debe a que se encuentran ubicadas en cuencas endorreicas, que es donde convergen escurrimientos pluviales con deficiente drenaje, por lo que se almacenan cantidades de agua considerables, que en seguida se evaporan en tiempo de estiaje dejando a su paso sales, por lo que con el transcurrir de cada ciclo, la salinidad de estas tierras se intensifica; más aún, con prácticas agrícolas que incrementan la concentración de sales. En estas zonas gran parte del agua almacenada permanece a sólo unos pocos metros de la superficie, por lo que la obtención de agua para su reutilización es viable, pero debido a su concentración salina no es adecuada para actividades agrícolas. Con lo anterior, y considerando la importancia del abasto de alimentos y los requerimientos de espacios agrícolas que demanda el país, en el IMTA se propuso desarrollar y validar un sistema con viabilidad para el tratamiento de aguas salobres con nanofiltración y energía solar, considerando mantos acuíferos con exceso de contenido de sales disueltas, donde el agua se encuentre a menos de 10 metros de profundidad. Para esto, en este trabajo se reporta la implementación y resultados del desempeño de un sistema de desalación mediante nanofiltración solar y de un sistema de riego presurizado, donde el desalador se evalúa en términos del porcentaje de reducción de substancias, del permeado, y los dos sistemas acoplados en términos de la Intensidad Energética (*IE*), considerando la disponibilidad del recurso solar.

Capítulo I.-Desarrollo Tecnológico para la desalación de agua salobre con generación híbrida de paneles solares y aerogeneradores

I.1 Solución comercial para desalación y bombeo

A fin de generar una propuesta de solución comercial que integrara una tecnología para desalación del agua de riego así como para el bombeo para el sistema de riego presurizado aprovechando la energía eólica y/o solar fotovoltaica a corriente directa o alterna, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica, destacándose lo siguiente.

I.1.1 Tipos de Turbinas

En el mercado se encuentra una amplia variedad de generadores eólicos, destacando las turbinas Savonius, turbinas Darrieus, turbinas verticales, molinos de viento, aerogeneradores y las turbinas horizontales.



Figura 1.1. Rotor Savonius, Turbina Darrieus y Molino de viento con velas.

Las turbinas Savonius son de tipo eje vertical, y son utilizadas para convertir el poder del viento en torsión sobre un eje rotatorio. El arranque es a baja velocidad del viento, son de fácil fabricación; tienen una velocidad de giro pequeña, sin embargo, su rendimiento energético es bajo, en la figura 1.2 se muestran algunos tipos de turbinas.

Las turbinas Darrieus también son de tipo eje vertical. Estas turbinas requieren de vientos de 4 a 5 m/s, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento energético.

Las turbinas verticales son de fácil fabricación y requieren de una torre de estructura, las palas del rotor son verticales y no se requiere una orientación específica al viento, porque siguen funcionando aun cuando éste cambia rápidamente de dirección, se pueden ubicar cerca del suelo, para facilitar su mantenimiento. Pueden sacar ventaja de aquellas

irregularidades del terreno que incrementan la velocidad del viento, ya que están diseñadas para requerir una menor velocidad del viento para iniciar el giro y resistir vientos fuertes.



Figura 1. 2. Molino de viento, Multi-pala de bombeo para ganado y aerogenerador moderno

Los molinos de viento son estructuras bajas, generalmente de cuatro aspas (construidos en Europa desde el siglo XII). El Multi-pala es típico en México con uso de abrevadero para ganado.

Las turbinas eólicas modernas o aerogeneradores surgieron en los años 80 y son de origen Danés. Son usadas en parques eólicos para la producción comercial de electricidad, tienen una eficiencia alta y son controladas por computadora.

Las turbinas horizontales tienen aspas de ángulo de ataque óptimo, permiten que el ángulo de ataque sea ajustado para proporcionar un gran control, de modo que la turbina puede recoger la máxima cantidad de energía eólica, las torres altas permiten acceder a vientos más fuertes.

I.1.2 Solución integrada

Para la propuesta inicial, se observa la conveniencia de un controlador de carga inteligente para generador eólico. La principal característica de funcionamiento de un controlador o regulador de carga, es alargar la vida útil de la batería dentro de un sistema de aprovechamiento de energía alterna, en este caso eólica.

I.1.2.1 Principios de regulación

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento, la energía eólica, es en realidad energía cinética del aire en movimiento, la cual proporciona energía mecánica a un rotor o hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor del generador, normalmente en disposición eléctrica trifásica, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Esta energía eléctrica generada en corriente alterna trifásica, se tiene que convertir en corriente directa, que es el tipo de energía que se puede almacenar en una batería. Para tal fin se utiliza un rectificador trifásico o convertidor trifásico que es un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada en una corriente continua de salida, mediante dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes corrientes como diodos, tiristores, entre otros. El rectificador trifásico cumple con la misma función que un rectificador monofásico, con la diferencia que estos rectificadores son alimentados por fuentes trifásicas, por lo que son más eficientes y pueden manejar grandes corrientes.

I.1.2.2 Rectificador trifásico no controlado

Este tipo de rectificadores emplea como semiconductor el diodo. Se denomina de este modo porque no se puede controlar la potencia de salida, es decir, para una tensión fija de entrada la tensión de salida es también fija. En un circuito rectificador trifásico no controlado de 6 pulsos, los diodos se enumeran en el orden de las secuencias de conducción y cada uno conduce 120°. La secuencia de conducción para los diodos son D1-D2, D3-D2, D3-D4, D5-D6 D1-D6 (Figura 1.3).

En un sistema trifásico balanceado los voltajes de línea a neutro están definidos por:

$$v_{an} = V_n \text{sen}(wt)$$

$$v_{bn} = V_n \text{sen}\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{cn} = V_n \text{sen}\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Los voltajes correspondientes de línea a línea V_{LL} son:

$$v_{ab} = \sqrt{3} V_n \text{sen}\left(wt + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{bc} = \sqrt{3} V_n \text{sen}\left(wt - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$v_{ca} = \sqrt{3} V_n \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

El voltaje promedio de salida se puede determinar mediante:

$$V_{DC} = \frac{2}{2\pi/6} \int_{\omega t=0}^{\pi/6} \sqrt{3} V_n \cos(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_n$$

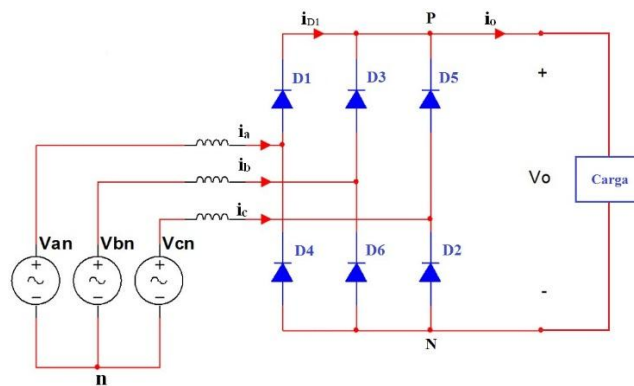


Figura 1.3 Circuito de convertidor CA-CD

Para prolongar la vida útil de la batería se asigna un límite de descarga de 11V ya que a medida que es más profunda la descarga hay más grado de sulfatación y por lo tanto habrá más deterioro en la batería. El límite superior de carga lo podemos tomar de la ficha técnica del fabricante, en general para baterías de 12V es de 13.5V.

Cuando el voltaje está dentro de los límites de carga y descarga no hay ningún problema pero una vez rebasado el límite inferior, el controlador de carga debe estabilizar el voltaje de la batería alcanzando el límite superior. Esto es controlado mediante el freno del aerogenerador, cuando el límite inferior es rebasado el aerogenerador gira libremente hasta alcanzar el límite superior, cuando las baterías estén cargadas el controlador hará que el aerogenerador se frene evitando la sobrecarga de las mismas, la forma de realizar este frenado es mediante pulsos eléctricos, esto es introduciendo cargas resistivas controladas.

El frenado está orientado al aumento de la seguridad y disminución del desgaste del equipo sufrido por los elementos mecánicos del sistema, y consiste en un contador de los pulsos de frenado, los cuales disminuyen la velocidad de giro del aerogenerador de forma automática, cuando este contador rebasa un límite establecido el equipo deduce que la batería está completamente cargada. Otra situación para activar el freno es cuando las velocidades del viento son muy altas y el aerogenerador genera mucho más de lo que la batería puede soportar, para esto se instala un sensor de corriente que monitorea en todo momento esta variable, y dependiendo de estos valores también de manera automática se le frena

introduciendo cargas resistivas controladas. El controlador también es capaz aceptar energía generada con paneles fotovoltaicos. En dado caso que la energía generada por los paneles fotovoltaicos o el aerogenerador no sea suficiente o no se genere nada, el controlador de carga puede emitir una señal visual prendiendo una luz, esta señal es para que el operador o encargado de administrar el sistema accione de manera manual un equipo de bombeo a gasolina o diésel (moto-bomba), para suplir la demanda de energía temporalmente.

I.2 Diseño para la solución integrada de aprovechamiento de energía alterna

Para el diseño del circuito de control de carga se tomó en cuenta las características de carga y descarga de la batería así como la protección de los equipos contra sobre-corrientes (Figuras 1.4. y 1.5). Para tal fin se consideró un acoplamiento óptico entre la parte de control y el equipo de generación, y sensores de corriente y voltaje.

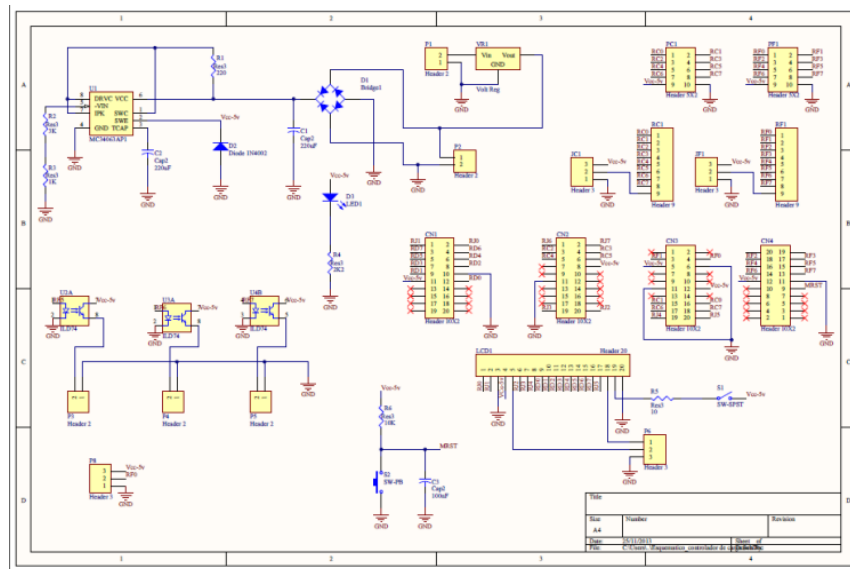


Figura 1.4 Circuito de control de carga

Para la fabricación de la tarjeta electrónica de control, se diseñó el circuito impreso

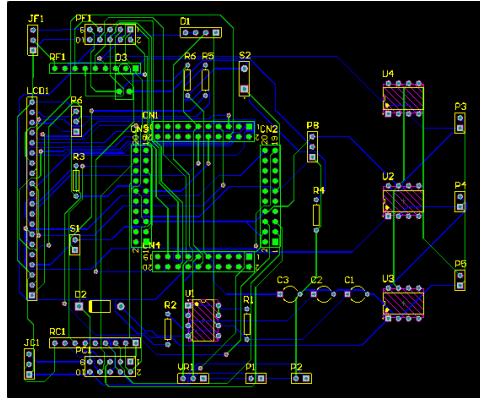


Figura 1.5 Diseño del circuito impreso para el control de carga

I.2.1 Acoplamiento Control de carga – Bomba

La etapa de control (Controlador de carga) debe de estar debidamente protegido contra cualquier posible falla o corto circuito en la etapa de potencia (ejecución del bombeo), para ello el controlador de carga está equipado con opto-acopladores que son dispositivos de emisión y recepción, que funcionan como un interruptor activado mediante la luz emitida por un diodo led que satura un componente opto-electrónico, normalmente en forma de fototransistor o foto-triac (Figura 1.6).

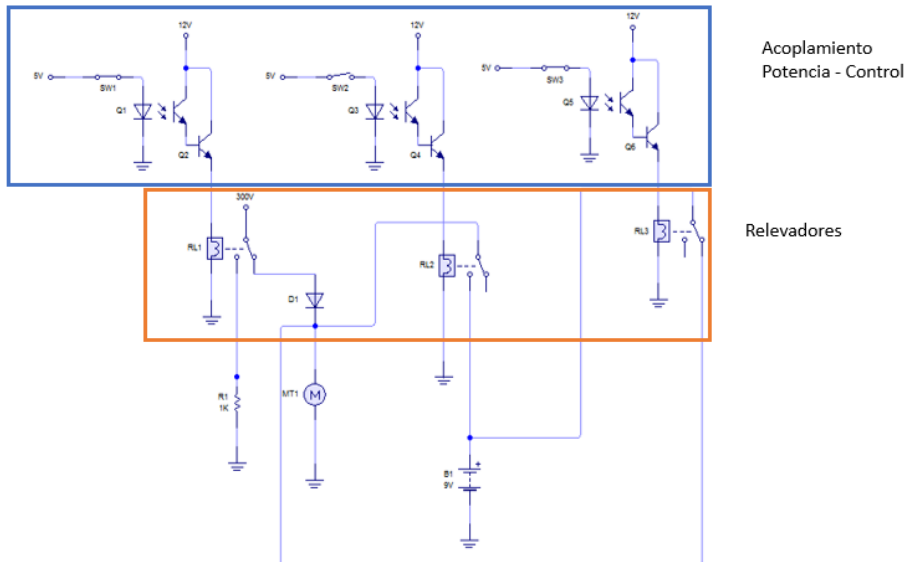


Figura 1. 6 Circuito de acoplamiento potencia-control

La parte de los relevadores es la que controla la interacción entre aerogenerador, batería, y resistencias de frenado.

I.2.2 Funcionamiento del sistema de energía

Los tres opto-acopladores son controlados por un microcontrolador, el cual monitorea niveles de corriente entregados por el aerogenerador y en función de esta corriente se accionan los diferentes opto-acopladores.

De inicio los opto-acopladores están deshabilitados, permitiendo que la energía generada por el aerogenerador llegue directamente al motor de la bomba a través del RL1 (relevador) en su pin normalmente cerrado (NC), al mismo tiempo la batería está conectada en paralelo a través del RL3 en su pin NC, esto para que el motor de la bomba no prenda y apague en el momento que se llegue a desconectar el aerogenerador y entre en función la batería (Figura 1.7).

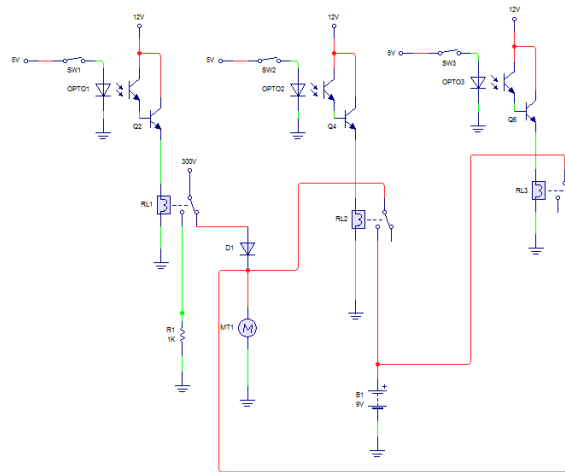


Figura 1.7 Circuito de acoplamiento con relevadores

Cuando la energía generada es suficiente para mantener funcionando el aerogenerador y recargar la batería, el micro-controlador manda un pulso, el cual acciona el opto-acoplador 2 (OPTO2) accionado el RL2 que es el que permite la conexión entre el aerogenerador y la batería (Figura 1.8).

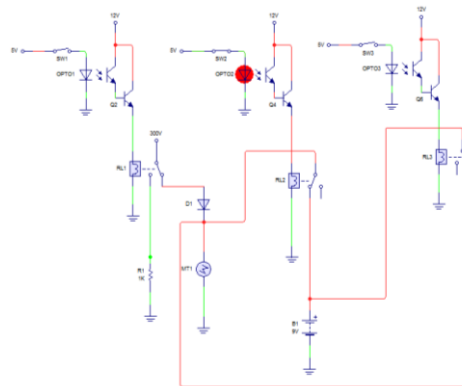


Figura 1. 8 Circuito de acoplamiento con relevadores y baterías

Como sistema de seguridad el micro controlador en todo momento está monitoreando la corriente que está generando el aerogenerador, y en el momento que sobre pase los valores de los parámetros nominales (previamente establecidos) de funcionamiento del equipo de bombeo, el micro controlador mandará un pulso para activar el opto-acoplador 1, el cual acciona RL1 permitiendo que la corriente excesiva se disipe en un set de resistencias (Figura 1.9).

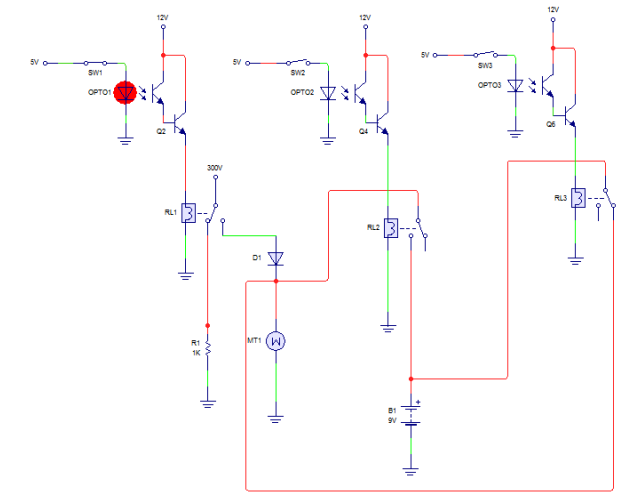


Figura 1.9 Circuito de acoplamiento con relevadores y sistema de protección con resistencias

I.2.3 Armado y prueba del gabinete de control con soluciones comerciales



El gabinete de control que se armó para probar las soluciones comerciales consta de las siguientes partes: Encendido y freno del aerogenerador.- formado por un interruptor trifásico que permite el suministro de energía eléctrica generada al sistema, este mismo interruptor es el que acciona el frenado eléctrico, de forma manual.

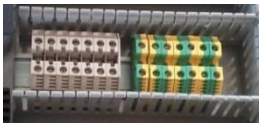
Interruptores Termo-magnéticos, son los que protegen al sistema de cualquier sobre carga o corto circuito, se seleccionaron a 20A.



Convertidor o rectificador trifásico, como se explicó al principio de este documento, nos permite convertir de corriente alterna a corriente directa, en este caso son dos, ya que el generador eólico que probamos cuenta con doble generador.



Clemas para conexiones, se utilizan para facilitar la instalación en cuanto a poder conectar y desconectar un equipo con mayor rapidez y que las conexiones sean más seguras.



a) Multímetro el voltaje una sobre suministrarle



digital, se utiliza para monitorear de manera visual generado por el aerogenerador, y en dado caso de carga saber en qué momento aplicar el freno, o una pequeña carga resistiva.

Se acopló un motor de corriente directa (CD), al generador eólico para suministrarle energía mecánica, teniendo control sobre las revoluciones por minuto (rpm) y comprobando el voltaje generado realizando 2 pruebas de funcionamiento, cuyos resultados se muestran en la tabla 1 y 2 y figura 1.10.

Tabla 1. Prueba 1. Datos obtenidos experimentalmente del acoplamiento del motor de corriente directa al generador eólico

Motor CD (%)	Rpm	Con Carga (V)	Sin Carga (V)
10	75	6.5	6.4
20	115	12.5	12.6
30	145	20.2	20.2
40	175	25.6	25.7
50	225	31.2	31.15
60	290	38.4	38.38
70	300	42.01	42.5
80	300	48.6	48.7
90	300	23.4	23.25
100	300	58.1	58.14

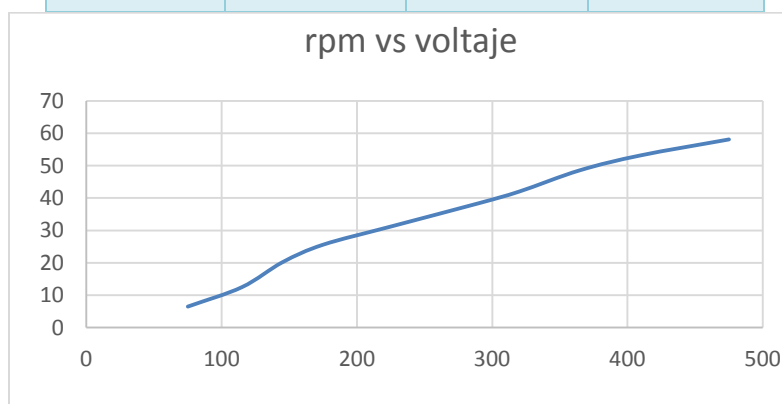


Tabla 2. Prueba 2. Datos obtenidos experimentalmente del acoplamiento del motor de corriente directa al generador eólico

Motor CD (%)	Con Carga (V)	Sin Carga (V)	Corriente (A)
10	3.5	6.7	0.28
20	7.6	12.5	0.56
30	11.6	18.7	0.79
40	15.88	25.89	1.07
50	19.56	30.02	1.4
60	23.25	35.36	1.58
70	28.1	43.8	1.84
80	31.65	48.98	1.98
90	35.7	52.95	2.34
100	38.4	58.16	2.54

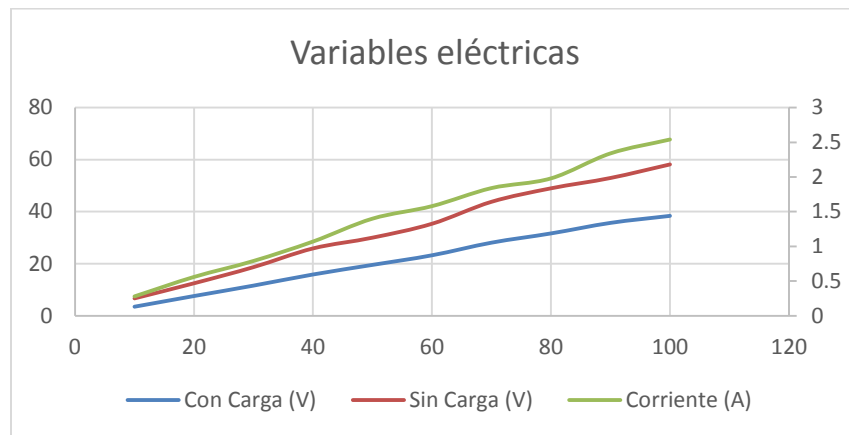


Figura 1.10 Relación RPM Vs Voltaje de aerogeneradores

En la figura 1.11 se muestra el armado completo de los componentes de control de los aerogeneradores.



Figura 1. 11 Armado de circuito de control de los aerogeneradores

I.3 Implementación de la solución comercial para aprovechar la energía eólica

Las energías renovables son vitales en la lucha contra el cambio climático, estas energías se producen de forma continua y son inagotables. En el sol está el origen de todas ellas, porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. por tal motivo, en este proyecto se empleó el uso de generadores eólicos, que cumplen con las características técnicas necesarias para producir electricidad aprovechando la energía natural del viento (energía eólica), una de las ventajas que se tienen al usar aerogeneradores es, que se trata de energía limpia que prácticamente nunca se agota, la cual en su transformación de energía cinética a energía eléctrica no produce emisión de gases de efecto invernadero y no emite sustancias tóxicas. La descripción de un aerogenerador se observa en la figura 1.12.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN AEROGENERADOR

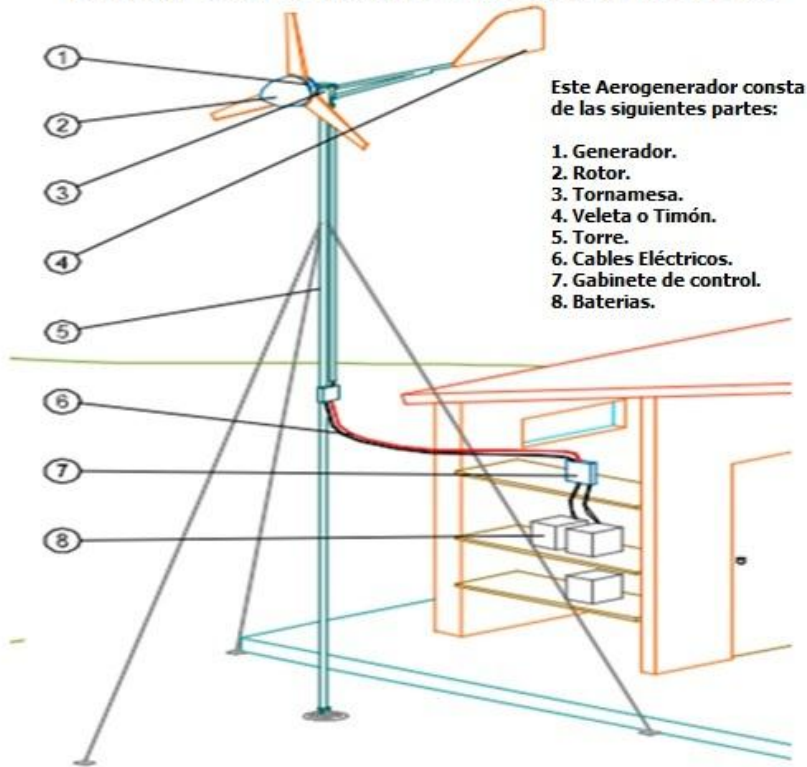


Figura 1. 12. Partes del aerogenerador.

Así mismo en la figura 1.13 se presenta el ensamble del rotor del generador con sus respectivas aspas o palas.

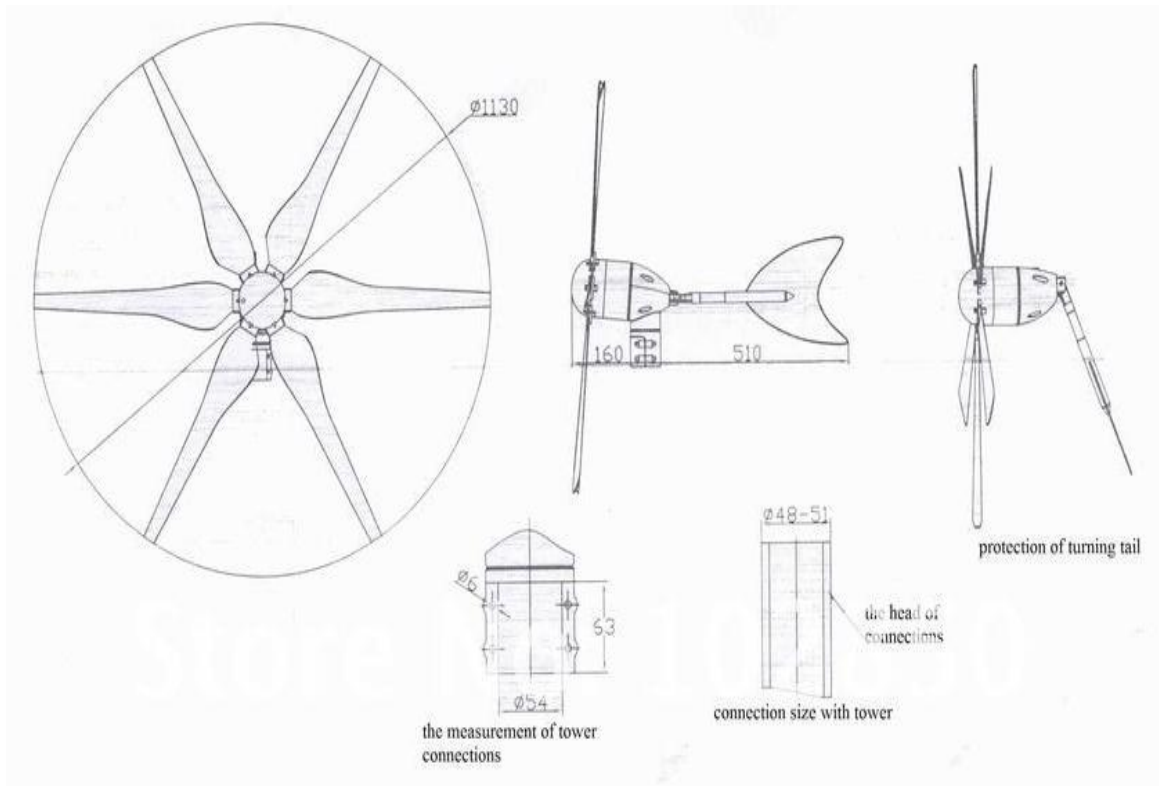


Figura 1.13 Ensamblado de Turbinas

En la primera imagen de izquierda a derecha, se muestra el cabezal de los aerogeneradores eólicos; donde después de quitar la tapa del cabezal se montaron las 6 palas de cada aerogenerador como se observa en las imágenes restantes.

La mayoría de las turbinas, genera electricidad a partir de que el viento logra vencer el torque del generador, para lo cual se requieren vientos a una velocidad de entre 3 y 4 metros por segundo. El viento pasa sobre las palas del aerogenerador y provoca una fuerza giratoria. Las palas hacen girar el eje que hay dentro de la góndola que entra a una caja de cambios. La caja de cambios incrementa la velocidad de rotación del eje proveniente del

rotor e impulsa al generador que utiliza campos magnéticos para convertir la energía rotacional en energía eléctrica.



Figura 1. 14 Turbina armada de 6 aspas o palas.

En la figura 1.14 se observan los generadores Eólicos de 300 Watts a 12 Voltios de corriente directa, instalados listos para generar energía eléctrica proveniente del viento, que fueron utilizados durante las pruebas antes mencionadas.

En las curvas de potencia (del fabricante) se observa que el aerogenerador rompe con el torque del generador o empieza a generar electricidad a partir de los 2 m/s, con 900 revoluciones por minuto, la potencia máxima es de 300 watts a una velocidad del viento de 12.5 m/s y 25 Amperes, es capaz de soportar una velocidad máxima de 40 m/s que corresponden a una potencia máxima de 350 Watts, la electricidad mensual que genera es de 28 kw/h con velocidades de viento mínimas de 5.8 m/s (Figuras 1.15 y 1.16).

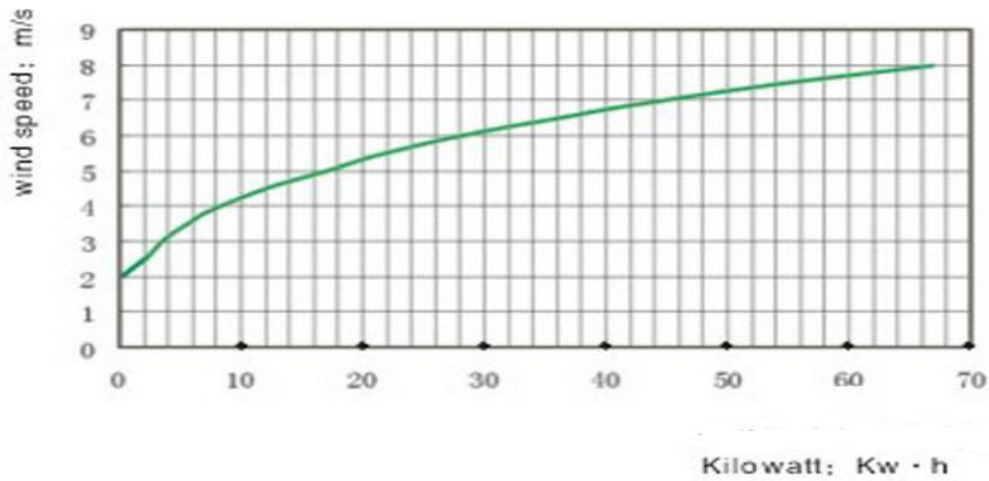


Figura 1. 15 Curva que relaciona la velocidad del viento (m/s) Versus la generación de electricidad en (Kw/h).

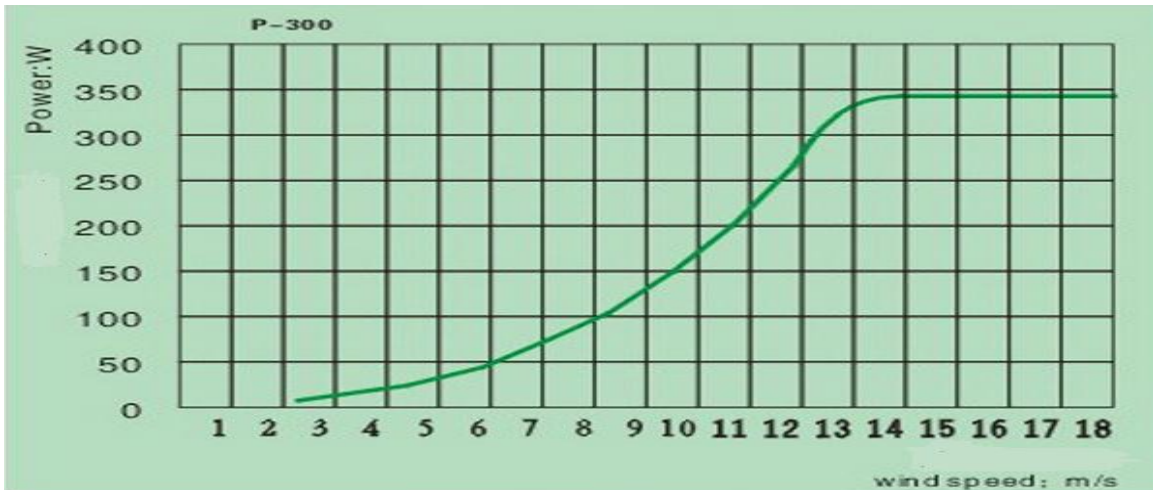


Figura 1.16. Curva que relaciona la potencia eléctrica generada (Watts) por la velocidad del viento (m/s).

I.3.1 Recomendaciones para la instalación de los generadores eólicos

Se instalarán de tal forma que el rotor capte la mayor cantidad de viento posible, evitando obstáculos que desvíen o alteren el curso del viento, como se observa en la figura 1.17.

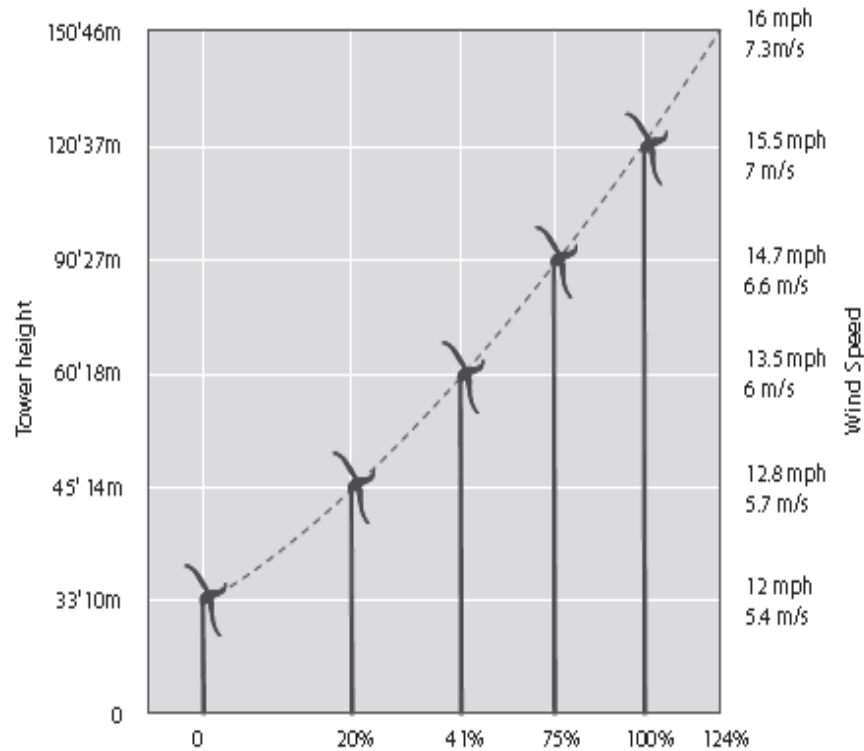


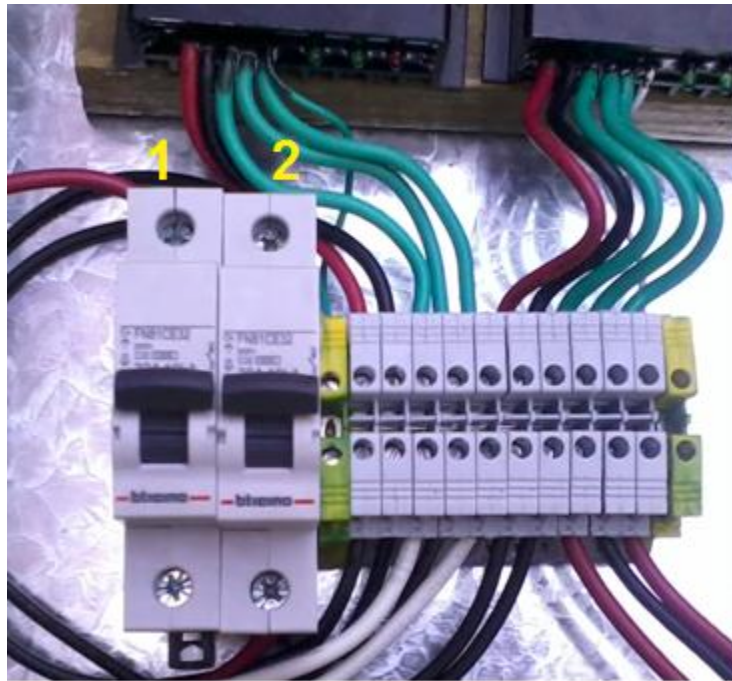
Figura 1.16 Relación entre la altura de turbinas con % de aprovechamiento del viento.

Para llevar a cabo la instalación se utilizó un gabinete de control, que en su interior cuenta con los componentes y/o equipos: 2 interruptores electromagnéticos de 35 Amperes a 10 kA, donde uno de ellos se encarga de interrumpir el suministro de energía eléctrica proveniente del generador eólico o la carga generada del mismo, el segundo interruptor termomagnético controla la carga consumida por las baterías, cuando el aerogenerador supere o exista un exceso de energía que dañe a las baterías solares de 12 voltios y pudiera poner en riesgo la integridad de los conductores y los elementos que lo conforman como son rectificadores de carga, baterías y el controlador de carga de igual manera cuenta con: clemas para las posibles conexiones entre cada componente y cable del # 12 AWG para interconectar cada elemento.

En la figura 1.18 se muestra el gabinete con las dimensiones y los componentes que lo conforman:



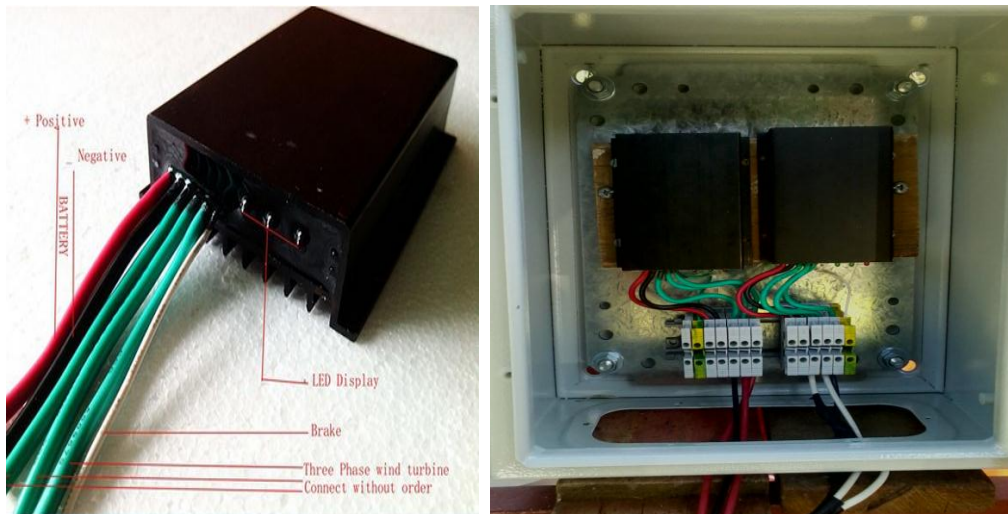
Figura 1.17 Gabinete de 400mm x 500mm x 210 mm



Anclaje de los interruptores termomagnéticos de 30 Amperes a 10 KA, el primero interrumpe el suministro de energía eléctrica proveniente del generador eólico o la carga generada del mismo, y el segundo controla la carga consumida o la carga que se utiliza para cargar las baterías.



Controlador de carga **Solar Steca** de 12 Voltios de CD a 20 Amperes, este controlador permite monitorear e indicar el estado de carga de las baterías ya que trae integrado diodos led de diversos colores, que proporcionan información sobre el estado de la carga de la batería y asegura el óptimo cuidado de éstas; los controladores están equipados con un fusible que cumple con la tarea de proteger el sistema eólico de sobrecargas y sobre descargas; para llevar a cabo la tarea de protección contra sobrecargas funciona como controlador derivado **MAI** (modulación de amplitud de impulsos) el cual garantiza una carga eficiente para las baterías de Ciclo Profundo LTH de 12 Voltios a 110 AMH.



Conexión de los rectificadores de carga, que realizan la conversión de corriente alterna proveniente de los aerogeneradores de 300 W, a corriente directa la cual alimenta y/o carga las baterías. Los rectificadores se conectan en serie ó paralelo según sea la conexión adecuada para obtener un voltaje de 12 V en paralelo ó 24 V en serie, de igual manera estos van interconectados con el controlador de carga Solar Steca.

Características y conexión del banco de baterías:

Los acumuladores de ciclado profundo están especialmente diseñados para soportar un alto número de descargas profundas, y ser recargados sin afectar su desempeño, básicamente un

ciclo se describe como una descarga y una carga del acumulador, no importando el porcentaje de descarga que haya sufrido. Estos acumuladores son utilizados principalmente, para proveer energía eléctrica a equipos que no tienen un sistema de generación propia y están contruidos con materiales activos de alta densidad y con aditivos especiales y de aleaciones en sus placas que cumplen con el propósito de lograr un mejor desempeño en sus ciclos de carga y descarga profunda. Con esto disminuyen el reblandecimiento y desprendimiento del material activo de las placas positivas, prolongando la vida del acumulador.

Características técnicas de las baterías:

BATERIA ACIDO PLOMO LTH

MODELO: L-31T/S-190- SOLAR-12V

APLICACION: CICLADO PROFUNDO/ SOLAR

VOLTAJE: 12V

CAPACIDAD: 110AMH / 20HR

DIMENSION: 329 X 171 X 244 MM

PESO HUMEDO: 29.8 KG



Para terminar la instalación de los generadores eólicos se realizó la conexión del banco de baterías comerciales; las cuales se conectaron en paralelo, ya que esto permite obtener una

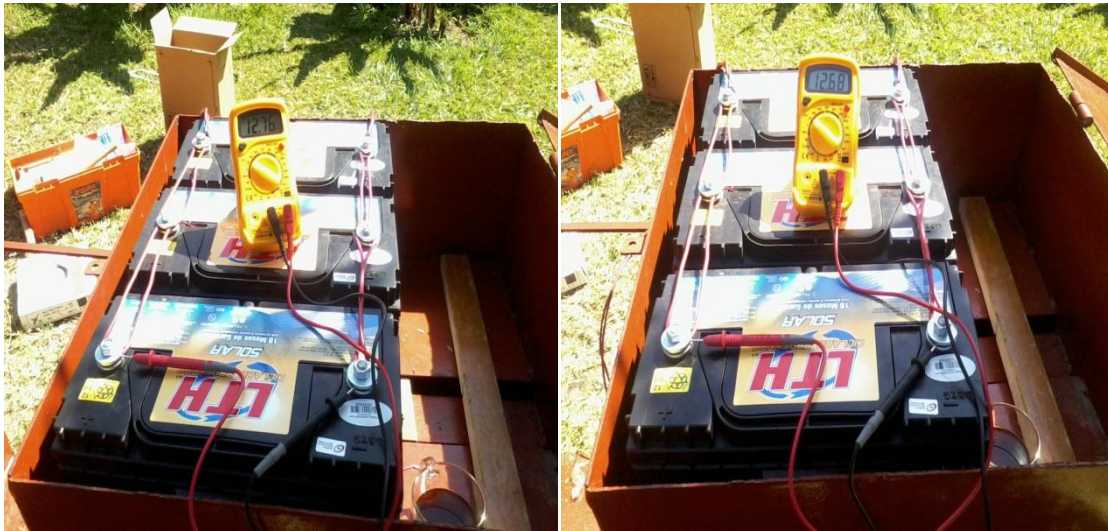
salida de dos veces la capacidad de las pilas individuales, manteniendo el mismo voltaje nominal, obteniendo una tensión de salida de 12 Voltios y una capacidad total de 330 AMH, que es la capacidad que identifica la máxima cantidad de carga que puede almacenarse en el banco de baterías.



Se concluye que el quipo funciona satisfactoriamente de acuerdo a las pruebas realizadas, monitoreando variables de voltaje y corriente (voltios y amperes), de cada aerogenerador, así como también del banco de baterías; el sistema de control funciona correctamente ya que tiene integrado un sistema de protección contra sobrecorrientes en la parte de generación (generador eólico), y protección contra corto circuito en la parte de carga (baterías), así como también se integró un controlador de carga, que monitorea el estado de carga de las baterías y los aerogeneradores.



En la imagen se observa un voltaje de 12 VCD suministrado por el generador eólico, y el controlador de carga se encuentra monitoreando el estado de carga de las baterías.



Monitoreo de voltaje de las baterías de ciclo profundo a 12 V de 110 AMH.



Monitoreo de voltajes de los aerogeneradores eólicos de 300 Watts a 12 VCD.

Capítulo II. Sistema de Bombeo solar para riego presurizado

El sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los inicios de la Historia, puede satisfacer casi todas nuestras necesidades, cuando se aprende como aprovechar de forma racional la radiación solar, de la cual se obtiene calor y electricidad. El aumento de la demanda de energía –tanto en cantidad como en calidad– está directamente relacionado con el desarrollo socioeconómico de un país. Las poblaciones rurales asentadas en lugares aislados en la mayoría de los países en desarrollo han quedado marginadas de los servicios públicos entre ellos la electricidad. Poco parece haber cambiado desde que se plantearon por primera vez las cuestiones y los problemas para dotar de energía a las poblaciones rurales donde las fuentes tradicionales de energía (leña, residuos de biomasa, tracción humana y animal) siguen siendo los principales y con frecuencia los únicos recursos energéticos disponibles para millones de familias rurales, con limitaciones y efectos bien documentados en el bienestar rural en ámbitos como la salud, la seguridad alimentaria y la producción agrícola.

El aprovechamiento de energías alternas como la solar y la eólica tienen amplias aplicaciones, en el sector agropecuario, sin embargo han sido poco utilizadas pero poseen gran potencial sobre todo en la operación y funcionamiento de equipos en invernaderos, deshidratadoras frutícolas, sistemas de plantas purificadoras de agua o para el bombeo de agua para abastecer sistemas de riego.

Por ejemplo la extracción de agua de pozos y su bombeo para riego agrícola, son acciones que pueden ser llevadas a cabo sin la utilización de combustibles fósiles; donde a partir del aprovechamiento de la energía solar captada por medio de paneles solares y/o el aprovechamiento de la energía eólica a través de aerogeneradores; se puede obtener la suficiente potencia hidráulica requerida, aún en comunidades o sitios aislados

II.1 Selección del sitio para probar el sistema de bombeo solar para riego presurizado

A fin de validar en campo el sistema de bombeo operado por energía solar y con aplicación en un sistema de riego presurizado de baja presión (goteo) se seleccionó una parcela de 1 hectárea (Figura 2.1) ubicada en la Unidad de Riego Jalpan, en el estado de Querétaro. Localizada entre las coordenadas: Latitud 21.307054° N y Longitud 99.5014449° W. La cual posee las condiciones de ser un sitio aislado, pero con potencial de aprovechamiento de agua del Río Jalpan, a través del bombeo, requiriéndose para ello, implementar sólo una fuente de energía.



Figura 2- 1 Localización de la parcela

En este trabajo se aborda la determinación del desempeño (electromecánico) del sistema de bombeo fotovoltaico para operar el sistema de riego presurizado de baja presión (Goteo) y la evaluación del sistema de riego en términos de aplicación del agua, determinación de eficiencias de distribución y aplicación, así como el análisis beneficio costo de esta tecnología integrada.

II.2 Evaluación hidráulica y energética del sistema

En la metodología experimental, se midió la radiación con apoyo de un piranómetro Eppley de primera clase, con precisión de 1%, y se instalaron dos multímetros con los cuales se midió el voltaje y amperaje de salida del sistema fotovoltaico. Se determinó la presión y el caudal y gasto de salida al almacén. De ahí el riego se realizó presurizado con energía potencial. Y los resultados se muestran en la figura 2.2 y Tabla 3.

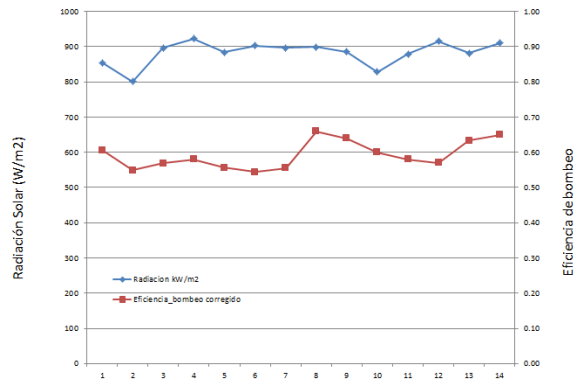


Figura 2- 2 Eficiencia de bombeo y radiación solar

La intensidad de bombeo presurizado resultó en 0.17 kWh/m³ (6.05±0.76 m³/kWh), y la eficiencia resultó de 0.59±0.07.

Tabla 3. Resultados de eficiencias.

<i>G</i> (W/m ²)	<i>Volts</i>	<i>Amp</i>	<i>mgh</i> (W)	<i>Q</i> (m ³ /hora)	<i>IE</i> (m ³ /kWh)	<i>Eficiencia</i>
854.2	146.6	8.312	1218.5	142.29	7.01	0.61
800.6	138.3	8.308	1149	118.54	6.19	0.55
897.3	143.3	8.304	1190	124.04	6.25	0.57
923.1	154.3	8.311	1282.4	120.27	5.63	0.52
884.4	157.5	7.304	1150.4	123.68	6.45	0.56
903.1	156.6	7.481	1171.5	120.19	6.16	0.54
896.6	157.7	7.495	1182	120.78	6.13	0.56
899.5	157.7	7.862	1239.8	154.03	7.45	0.69
915.4	150.1	8.311	1247.5	126.75	6.1	0.54
882.2	165.3	3.461	572.1	67.8	7.11	0.63
882.4	160.9	7.221	1161.9	127.89	6.6	0.63
896	157.1	7.787	1223.3	93.99	4.61	0.64
878.7	136.9	8.311	1137.8	98.31	5.18	0.6
885.65	152.48	7.57	1,148.17	118.35	6.22	0.59

La eficiencia media resultó ser del 59%.

La evaluación del sistema de riego, del almacén a la planta, se presenta a continuación.

II.3 Evaluación del sistema de riego presurizado de baja presión (Goteo con cintilla)



Figura 2- 3 Ubicación de los puntos de aforo del riego por goteo

Las pruebas para validar el sistema de riego presurizado con energía fotovoltaica se realizaron en 1 hectárea de terreno cultivado con calabaza, perteneciente a la unidad de riego Jalpan. Para realizar el aforo (Figura 2.3) en el sistema de riego se realizaron las siguientes actividades: ubicación de los puntos de medición a lo largo de los surcos tomando como referencia cuatro puntos de monitoreo: tomando una medida de inicio, 2 medidas intermedias y una final.

En cada uno de los sitios seleccionados se llevó a cabo el siguiente procedimiento: se localizó manualmente la cintilla con la finalidad de no dañarla, y con una pala de jardinería se hicieron hoyos en un tramo de aproximadamente 90 cm de longitud a un costado de la cresta del surco, lo que permitió la colocación de los recipientes -con capacidad de medio litro-, por debajo de la cintilla para el aforo de los goteros. En los tres emisores, se tomó el tiempo de goteo con un cronometro por 4 minutos, posteriormente se realizó aforo de los goteros utilizando una probeta graduada de 500 mililitros. En total se tomaron 18 lecturas de aforos en 16 puntos de referencia dentro de la parcela. Por último se rellenó la excavación hecha, procurando que quedara en condiciones similares a las que se encontraba originalmente antes de los aforos (Figura 2.4).



Figura 2- 4 Lecturas de los aforos.

II.4 Datos de la evaluación del sistema

A continuación se presentan los gastos obtenidos de los aforos de los goteros en los 16 puntos referenciados dentro de la parcela, los cuales se tomaron a intervalos de 4 minutos obteniendo un promedio general de 0.60 l/s (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de aforos en los goteros.

Minutos	lpm	ml/s	Q de gotero	MIN. Q	Promedio total de Q
2	0.08	0.67	0.67		0.67
4	0.156	0.65	0.65		0.65
4	0.156	0.65	0.65		0.65
4	0.075	0.31	0.31	0.31	0.31
4	0.130	0.54	0.54		0.54
4	0.140	0.58	0.583		0.58
4	0.145	0.60	0.60		0.60
4	0.130	0.54	0.54	0.54	0.54
4	0.130	0.54	0.54		0.54
4	0.170	0.71	0.71		0.71
4	0.160	0.67	0.67		0.67
4	0.160	0.67	0.67	0.54	0.67
4	0.140	0.58	0.58		0.58
4	0.150	0.63	0.63		0.63
4	0.1450	0.60	0.60		0.604
4	0.160	0.67	0.67	0.58	0.67
			PROMEDIO	0.49	0.60

La eficiencia de distribución es el porcentaje o volumen de agua efectivamente utilizado por la planta resultó de 0.82.

El gasto de la sección fue de 4.8 l/s, en una sección de 20 surcos de los cuales cada uno tiene una separación de 1.5 metros de espacio entre surco y surco, el área de influencia por goteo es de 0.45 m² la cual representa el área ocupada por la porción más significativa de las raíces del cultivo, la longitud de la cabecera mide 28.5 m, el número de goteros de la sección es de 8000 goteros, los cuales se encuentran a una separación de 30 cm entre cada gotero a lo largo de las líneas regantes (Figura 2.5).



Figura 2- 5 Ubicación de los goteros

La superficie de cultivo de la sección tiene un área de 0.342 m² y se le aplicó una lámina de 2.7 mm en un tiempo de 2 horas. La ETo para la zona se estimó en 2.55 mm/día y el coeficiente de cultivo fue de 0.93 del valor de kc, la lámina media por reponer es de 2.37 mm. La eficiencia de aplicación fue de 88% que junto con la eficiencia de distribución permiten estimar el coeficiente de uniformidad, el cual resultó ser del 92 % esto quiere decir que el sistema de riego por goteo operado con energía fotovoltaica funcionó óptimamente.

De acuerdo con los datos anteriores, se obtuvo una productividad del agua de 42 kg/m³ para el cultivo de calabaza. Considerando la intensidad energética obtenida de 0.17 kW-h/m³, se tiene que es posible obtener una relación de 248.2 kg/kWh fotovoltaico suministrado, a esto se le denomina productividad por kilowatt generado.

El estudio para determinar la relación beneficio costo del sistema se realizó con la información proporcionada por el productor.

I.15 Bases constructivas del sistema de bombeo presurizado operado con energía solar

Para aprovechar la energía solar es necesario contar por una parte con unas bases para colocar los paneles solares y por otra parte construir un almacenamiento del agua bombeada del río, de donde posteriormente saldrá para surtir el sistema de riego que suplirá la demanda de agua del cultivo (Figuras 2.6 a 2.9).

PROCESO CONSTRUCTIVO

El proceso constructivo inicia con la construcción del almacén de agua, que servirá de reservorio para el agua que se bombee de la fuente de agua.





Figura 2- 6 Construcción del reservorio

Seguido de la construcción del almacén de agua, se procede con la construcción del cárcamo de bombeo.



Figura 2- 7 Construcción del cárcamo

Como tercer paso se procede a la construcción de la base para colocar los paneles solares, sobre esta base se colocan los doce paneles solares requeridos para aportar la energía para accionar las 2 bombas, con salidas de 2 pulgadas cada una.



Figura 2- 8 Colocación de módulos fotovoltaicos

Finalmente, se procede a la instalación del sistema de riego, para completar la tecnología.





Figura 2- 9 Instalación del sistema de riego

II.6 Análisis costo-beneficio

Para establecer un sistema de “Riego por goteo con uso de Energía Renovable”, en una hectárea de terreno agrícola de cultivo, se identificó el siguiente análisis de costos (Tabla 5).

Tabla 5. Costos del proyecto

Análisis de Costos del proyecto ejecutivo del sistema de riego presurizado operado por energía solar		
No.	Conceptos	\$
1	Búsqueda, selección e identificación de la zona de aprovechamiento de la tecnología.	\$10,000.00
2	Levantamiento topográfico de la zona.	\$15,000.00
3	Identificación de la fuente y tamaño del almacenamiento, localización del punto y acceso del agua al cárcamo.	\$6,000.00
4	Diseño del sistema de riego y proyecto ejecutivo.	\$30,000.00
5	Supervisión de obra.	\$56,153.00
6	Construcción del almacén de agua.	\$40,000.00
7	Construcción del cárcamo de bombeo.	\$62,553.00
8	Suministro e instalación de bombas sumergibles de corriente directa.	\$64,000.00
9	Suministro e instalación de estructura metálica y paneles solares.	\$81,260.00
10	Suministro e instalación de sistema de riego.	\$73,352.00
11	Instalación y prueba de todo el sistema de distribución de agua y energía	\$36,000.00
12	Suministro e instalación de sistema de riego para el cultivo en la	\$20,000.00

	zona de proyecto.	
Total		\$494,318.00

El total del proyecto ejecutivo para riego presurizado es de \$494,318.00 a precios de Noviembre de 2013.

Los beneficios de la instrumentación de la tecnología se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Beneficios de la tecnología integrada

Análisis de Beneficios con la tecnología integrada de aprovechamiento de energía solar para riego presurizado.		
No.	Concepto	\$
1	Reducción de pago en mano de obra por fertilizar y regar	\$43,200.00
2	Ahorro de gasolina para regar	\$25,000.00
3	Ahorro de gasolina para operar las bombas de agua	\$30,000.00
4	Aumento en la producción de cultivo, por pasar de siembras de temporal a riego	\$46,200.00
Total		\$101,200.00

La relación costo-beneficio está dada por el costo total de todo el sistema de riego contra los beneficios que se obtengan al llevar a cabo el proyecto, entre los cuales está el ahorro de gasolina que normalmente se utiliza para poner en funcionamiento las bombas que permiten llenar el tanque de agua y llevar el agua a la zona de cultivo.

Otro beneficio es el ahorro por concepto de mano de obra que actualmente se requiere para regar y fertilizar.

Otro beneficio es el aumento de producción del cultivo, que aumenta en un 25% de manera gradual al otorgar el riego en la cantidad que requiere el cultivo, en el momento justo y con la uniformidad que se recomienda para su completo aprovechamiento.

Del análisis Beneficio-Costo se estima que estableciendo la tecnología integrada de aprovechamiento de energía solar para riego presurizado, el productor puede recuperar la inversión que se requiere para su implementación en un período de 4 años con 10 meses.

Capítulo III. Sistema de desalación solar por nanofiltración

En concordancia con los objetivos del proyecto se realizó un estudio de las características y requerimientos del agua salina proveniente de cuencas endorreicas en el país, con el fin de que sea utilizable en riego agrícola. En el estudio se consideró como muestra representativa de una cuenca endorreica; agua cruda proveniente de la región hidrológica RH26, de la Cuenca del río Pánuco. La Región Hidrológica 26 Pánuco se eligió ya que está constituida por una serie de cuencas cerradas que se caracterizan por la carencia de grandes corrientes superficiales, lo que conlleva a la acumulación de sedimentos salinos, al igual que en la Sub Cuenca Aj Rio verde, de donde puntualmente se recolectaron las muestras. Una vez recolectadas las muestras se determinó el contenido de sales, distinguiendo sus tipos, además de la CE, TDS y el pH de acuerdo al procedimiento descrito en el Manual del colorímetro HACH (2013). En los resultados se obtuvo como datos más relevantes lo siguiente: RAS=11.5, C.E=3430 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$, TDS=2287 ppm, pH=6.95, Cl=87.8 mg/L y $\text{SO}_4=1863$ mg/L; lo que indica que lo que mayormente excede es el contenido de SO_4 , de acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (CNA, 2009) y a la NOM-001-ECOL-1996, por lo que se considera no apta para riego agrícola.

III.1 Diseño del sistema de desalación solar

Con lo anterior, se observa que la muestra considerada representativa resultó clasificada en la Clase C3-S3, que indica alto contenido en sodio y muy alta salinidad. Se contempla que para que la calidad del agua se lleve a la zona de la Clase C2-S1, que corresponde a agua con mediana salinidad y bajo sodio es importante reducir los SO_4 en al menos un 78% y el RAS en al menos un 30%. Para lo cual el tratamiento con nanofiltración se observó factible para el tratamiento, mientras que el uso de la energía solar resulta viable para que tenga un carácter autónomo y se pueda aplicar en regiones aisladas que usualmente es donde mayormente se requiere.

Por otro lado, 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), donde se observó que la presencia del sodio y del exceso de sulfatos limita severamente el uso de esta agua para el cultivo hidropónico de jitomate. En su entonces, la ósmosis inversa se comprobó como una alternativa adecuada para el aprovechamiento del agua de riego en esta zona. Por lo anterior, dado que la mayor parte de las sales del agua de la zona de estudio, está en forma de sulfatos, se consideró que la nanofiltración es una alternativa viable para producir agua apta el riego para la producción de agrícola.

III.2 Implementación del sistema de desalación solar por nanofiltración

Con los resultados obtenidos de la fuente de suministro de agua del vivero Santa Rita, se implementó una tecnología que aprovechará el proceso de ósmosis inversa, misma que se reportó en IMTA-SEMARNAT, 2012.

Membranas.

Las membranas de nanofiltración utilizadas fueron de 4" X 40", modelo NE4040-70 de la casa CSM, cuyas características se mencionan a continuación:

Flujo nominal de permeado 5.7 m³/d

Rechazo de iones monovalentes (NaCl) 40 – 70 %

Rechazo de iones divalentes (MgSO₄) 99.5%

Área efectiva de la membrana 7.9 m²

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.

Para el proyecto se optó por un equipo con cuatro membranas en serie, cada una en su respectiva vasija de presión. En la figura 3.1 se muestra el diagrama del flujo del proceso ajustado, un equipo con cuatro vasijas de presión en serie y cada vasija de presión es de una sola membrana. Asimismo en la tabla 7 se muestran los balances de masa (de agua y de sales disueltas), así como las presiones en cada una de las etapas del proceso.

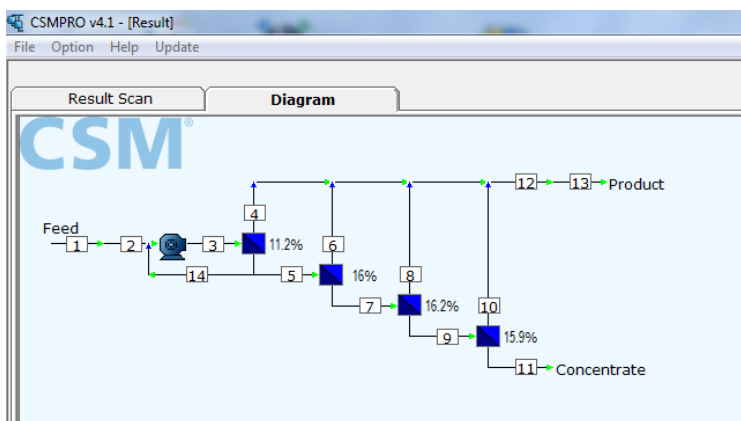


Figura 3- 1 Diagrama de flujo del proceso.

Tabla 7. Balance de materia (Agua y sales) y de presiones en el prototipo de desalación.

Etiqueta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Flujo (m3/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	3568	3568	3737	582	4137	759	4782	968	5518	1242	6324	843	843	4137

(mg/l)														
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

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

En la figura 3.2 se muestra el prototipo de desalación de agua de riego, tal como se construyó, a la que se le adaptó una bomba de corriente directa, con tecnología ecológica-sustentable con amplia adaptación a actividades agrícolas como viveros, invernaderos, huertos o donde se utilice agua de riego a pequeña escala, para mayores detalles ver informe IMTA-SEMARNAT, 2012.



Figura 3- 2 Sistema de desalación por Nanofiltración.

III.3 Validación del sistema de Desalación en Laboratorio

Toma de Muestras de las pruebas

Para las pruebas del sistema de desalación solar por nanofiltración (SDASANS), se utilizó como agua salobre, agua cruda proveniente del pozo del IMTA, adicionada con NaCl y SO₄. (Para hacer muestras sintéticas de agua salobre). Los parámetros de C.E, TDS, pH, Cl⁻ y SO₄ se determinaron de acuerdo al procedimiento descrito en el Manual del colorímetro HACH (2013), cuyos resultados se presentan en la Tabla 8. Así, la muestra resultó no ser apta para riego agrícola, de acuerdo con la concentración de TSD que rebasa los límites

establecidos por la NOM-001-ECOL-1996, así como también los parámetros agronómicos de calidad de agua para riego agrícola, referentes principalmente a salinidad.

Tabla 8. Calidad del agua utilizada en las pruebas del SDASANS

	Unidades	Agua Cruda
C.E.	μS/cm	2080
TDS	mg/l	1107
pH		7.86
Cl ⁻	mg/l	288
SO ₄	mg/l	520

Descripción del SDASANS, en su versión 1

La tecnología integrada del sistema de desalación de agua salobre por nanofiltración, operado por energía solar SDASANS_v1 está compuesto por: a) Sistema de nanofiltración (SNF), b) Sistema de suministro eléctrico fotovoltaico (SFV) y c) Sistema de bombeo de agua a CD (SB) que involucra el acoplamiento con el SFV y un sistema de filtrado con capacidad de remover partículas del orden de 10^{-6} m.

El Sistema de Nanofiltración (SNF) fue diseñado con una capacidad de permeado de 0.2 l/s (12 l/min) cuando se le suministra 60 lpm de agua salobre (relación 1:5 de permeado: suministro), el sistema de filtrado se compone de cuatro membranas de poliamida, modelo ESNA1-LF-4040 dispuestas en un arreglo serial, con un área equivalente total de $7.7 \times 4 = 30.6 \text{ m}^2$. El Sistema de suministro eléctrico fotovoltaico (SFV) se diseñó y construyó con ocho módulos de silicio policristalino con potencia nominal de 240 W cada uno. Ver gráfico que se muestra en la Figura 3.3

El suministro de agua a tratar se realiza mediante una bomba sumergible centrífuga, modelo SQFlex 16 SQF-10. De acuerdo al fabricante, la bomba opera en el intervalo de 30-300 VDC y tiene una operación mayormente óptima por arriba de los 100 VDC, esto de acuerdo al Manual de operación. La bomba puede suministrar agua con una carga nominal de 62 mca, a un caudal máximo de 96 lpm, trabajando a una potencia entre los 400-1400W. El acoplamiento entre el SFV y SB se realizó maximizando el voltaje de salida del SFV mediante una cadena en serie de ocho módulos que pueden entregar un voltaje de salida nominal de 240 VDC en total, esto de acuerdo a las curvas de la figura 3.3 del SFV y a la recomendación del fabricante de la bomba que sugiere trabajarla entre los 100-300 VDC.

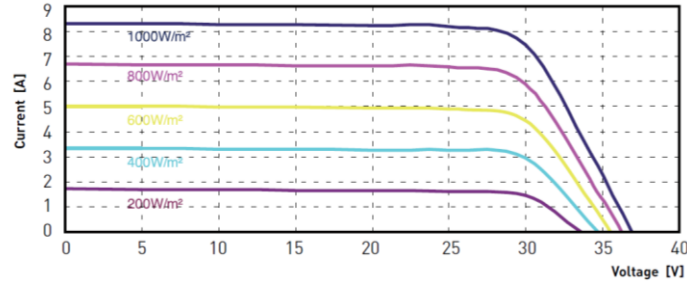


Figura 3- 3 Gráfica I-V para diferentes niveles de irradiancias de los módulos del SFV

III.3.1 Monitoreo y Evaluación en laboratorio

La campaña experimental de Monitoreo y evaluación del SDASANS, se realizó durante los días 4 al 14 de Septiembre de 2013, en el laboratorio del IMTA (ubicado en Jiutepec, Morelos), en condiciones de cielo abierto, presentándose durante el periodo de análisis, cielo medianamente nublado con diferentes niveles de insolación y una insolación de 4.1 kW_ pico promedio en el plano de los módulos fotovoltaicos.

El desempeño del SDASANS_v1 se evaluó en términos del permeado en relación a la disponibilidad del recurso solar y a la Intensidad Energética (IE). Para esto, al mismo tiempo se verificó el contenido de sales del permeado y la relación de flujos al que deben trabajar las membranas de nanofiltración (1:5) y de acuerdo a los requerimientos de reducción de sales del agua salobre para su uso en actividades agrícolas. Adicionalmente, se analizó el desempeño del SBFV considerando la relación entre la potencia a la que trabaja la bomba respecto el punto de su máxima potencia.

La IE se calcula con la relación del flujo del permeado (f_p) y la potencia que entrega el sistema fotovoltaico, P_{sbfv} , de acuerdo a la Ec. 1, a su vez, el f_p se obtiene a partir de mediciones del permeado recolectado en un tiempo.

$$IE = f_p / P_{sbfv} \quad (1)$$

Donde P_{sbfv} está dado por la Potencia nominal de cada módulo, multiplicado por el número de módulos y esto multiplicado por la relación ($G/1000$).

El desempeño electromecánico del SBFV se determina a partir de la potencia que genera el SFV P_{sbfv} en relación al punto de máxima potencia del SFV de acuerdo a las curvas (Figura 3.3) del SFV, considerando la radiación solar (G) y la caída de la potencia máxima de los módulos debido a la temperatura de los módulos fotovoltaicos (T_m), que es de 0.47%/°C de acuerdo al fabricante.

Partiendo de un almacén de agua con capacidad de 1100 litros, el agua salobre se bombea hacia el pre filtrado y luego al sistema de nanofiltración (SNF). Una vez que se trata el agua, el permeado y el agua de rechazo se envían a contenedores de 450 litros por separado. Tanto el flujo de permeado como el del agua de rechazo se determinan por duplicado y se mide su conductividad eléctrica a intervalos de tiempo fijos. Las presiones de trabajo a la entrada del SNF y la presión de salida del agua de rechazo se miden de manera continua y se registran a pasos de tiempo establecidos. Seguido, el permeado y el agua de rechazo se drenan por gravedad al almacén de alimentación donde se mezclan para nuevamente ser bombeada para alimentar al SNF y tener un circuito continuo. En las Figura 3.4 y 3.5 se muestran el diagrama experimental y fotografías del equipo desarrollado, respectivamente.

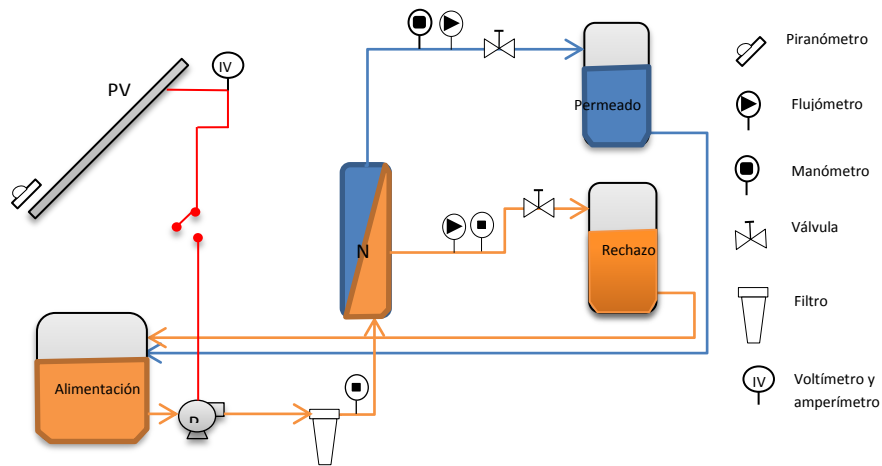


Figura 3- 4. Diagrama de la operación del sistema





Figura 3- 5 Instrumentación del equipo de desalación

III.3.2 Resultados y recomendaciones de la validación de laboratorio

Una vez lograda la instrumentación y puesta a punto de la tecnología desarrollada, las pruebas se realizaron entre el 4-14 de Septiembre de 2013. Período durante el cual se presentaron potencias radiativas solares en el plano de los MFV en el intervalo de 150 a 1020 W/m², esto debido a la variación natural de la radiación solar sobre un plano y a la presencia de nubosidad, con insolaciones promedio de 4.1 kWh_pico/día.

En este estudio se observó que es posible desalar agua salobre (1107 TSD) a niveles adecuados para las actividades agrícolas. En presencia de radiación solar cercanas a un sol estándar, el suministro fotovoltaico se presenta a razón de 1.9 kW; mientras que el SNF entrega 1.45 m³/día bajo una insolación de 4.1kW_h pico, con un suministro de flujo a una presión de 53 mca.

El SDASANS en su primera versión presentó una *IE* de $2.83 \pm 0.4 \text{ kW-h/m}^3$ lo que indica que comparándola en la escala mundial su consumo de energía es por arriba de la media, respecto a otros equipos y muestras similares. Sin embargo, es de aclarar que de acuerdo a la Asociación Internacional de Desalación, la Intensidad Energética para la desalación de agua salobre se reporta en el intervalo de 0.5 a 4 kW-h/m³, en su reporte [IEA-ETSAP and IRENA, 2012]. En la Figura 3.6 se muestra la intensidad energética evaluada en el SDASANS, mientras que la Figura 3.7 muestra un comparativo de las intensidades energéticas reportadas de sistemas de desalación solar similares para agua salobre con lo obtenido con el SDASANS.

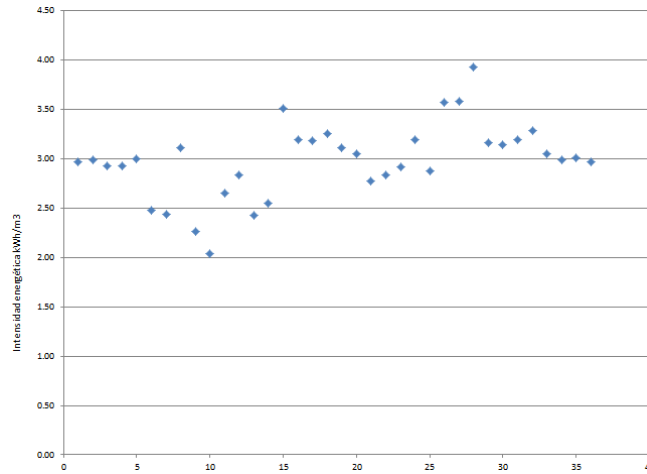


Figura 3- 6. Intensidades energéticas evaluadas del SDASANS

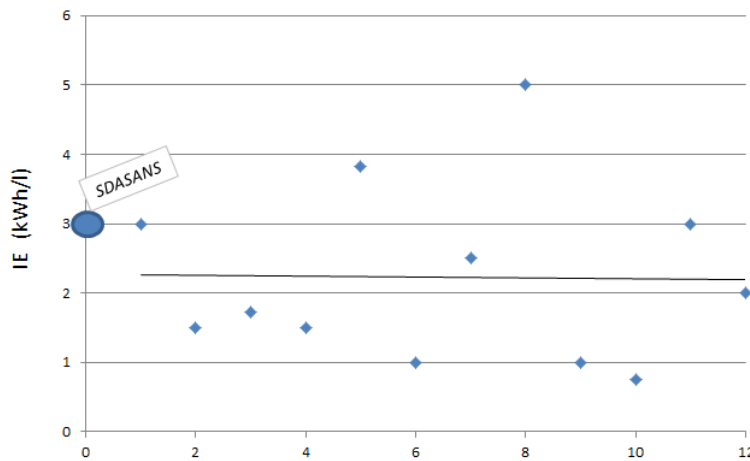


Figura 3- 7 Comparativo del SDASANS respecto a trabajos reportados

En la evaluación se observó que es posible obtener agua con un contenido de 282 TDS, lo que implica que el agua producto del permeado (efluente) se puede utilizar para riego agrícola. Los resultados indicaron que se obtiene una eficiencia de remoción de TDS del 74.56%, del 60% en los Cl^- y del 97.5% en los SO_4 , como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Eficiencias de remoción obtenidas con el SDASANS.

	Unidades	Agua Cruda	Rechazo	Permeado	Eficiencia%
C.E.	$\mu S/cm$	2080	5890	531	74.47
TDS	mg/lts	1107	3007	282	74.56
pH		7.86	7.91	7.49	
Cl^-	mg/lts	288	800	115	60.07

SO ₄	mg/lts	520	1900	13	97.50
-----------------	--------	-----	------	----	-------

También, durante su evaluación se observaron los siguientes cuatro puntos de oportunidad para optimizar el sistema.

1. Durante las pruebas del sistema de desalación se observó que las membranas trabajan a condiciones de presión y flujo diferentes, por lo que el permeado que entregan también es diferente entre ellas. En la Tabla 10 se muestran los promedios de flujos medidos de la entrada (influyente) y salidas (efluentes), esto considerando que se tiene una caída de presión del 15% en cada membrana (valor indicado por el fabricante) y que existe una relación lineal entre el permeado y la presión, como ya se ha reportado en trabajos previos [IEA-ETSAP and IRENA, 2012]. Es de observar que no se considera la diferencia de contenido de sales en el flujo que se presenta entre cada membrana, situación que diferencia mayormente los flujos entre las membranas. El Sistema desarrollado (SDASANS) tiene capacidad de permeado de 12 l/min-membrana de acuerdo a datos reportados por el fabricante, por lo que sólo durante las pruebas del sistema en el laboratorio se utilizó el 20.4, 17.3, 14.8 y 12.5% de la capacidad de cada membrana respectivamente. Considerando la capacidad de bombeo de 30.6 lpm a 70.0 mca, se observó que es posible incrementar en un 25.6% el permeado, suministrando iguales condiciones de flujo y presión a cada membrana. La exploración de configuraciones en serie paralelo de las membranas de nanofiltración y utilizando el arreglo de la tecnología desarrollada permitió verificar esta hipótesis.

Tabla 10. Comparativo de presiones y flujos en las diferentes membranas.

	Presión (mca)	Suministro (lpm)	Permeado (lpm)
Membrana 1	70	30.6	2.45
Membrana 2	60	28.15	2.08
Membrana 3	50	26.07	1.77
Membrana 4	40	24.30	1.50
Permeado actual			7.80
Permeado posible			9.80

2. Durante las pruebas realizadas considerando la potencia de diseño del Sistema Fotovoltaico “SFV” (1.90 kW), se observó que el sistema entrega un porcentaje diferente a la energía fotovoltaica de diseño (punto de máxima potencia), esto debido al acoplamiento SFV-SB. En la Figura 3.8 se puede observar que en general a baja irradiación el SFV logra entregar en promedio los 1.9 kW de potencia para lo que fue diseñado, sin embargo, a potencias mayores el SFV entrega sólo el 75% de la energía que puede entregar. Por lo antes mencionado se recomienda explorar alternativas para acoplar el SFV-SB en el punto de máxima potencia, para suministrar a la bomba un voltaje y amperaje que le permitan al SFV un desempeño mayor. Esto puede lograrse mediante configuraciones en cadenas de módulos FV o utilizando un convertidor CD/CD para suministrar a la bomba un voltaje y amperaje que le permitan un mejor desempeño. En la optimización del SDASANS se considera como punto crítico el acoplamiento con el SFV, debido que este implica el mayor costo, además de que se debe considerar la demanda de agua filtrada o permeada para la que se diseña el sistema.

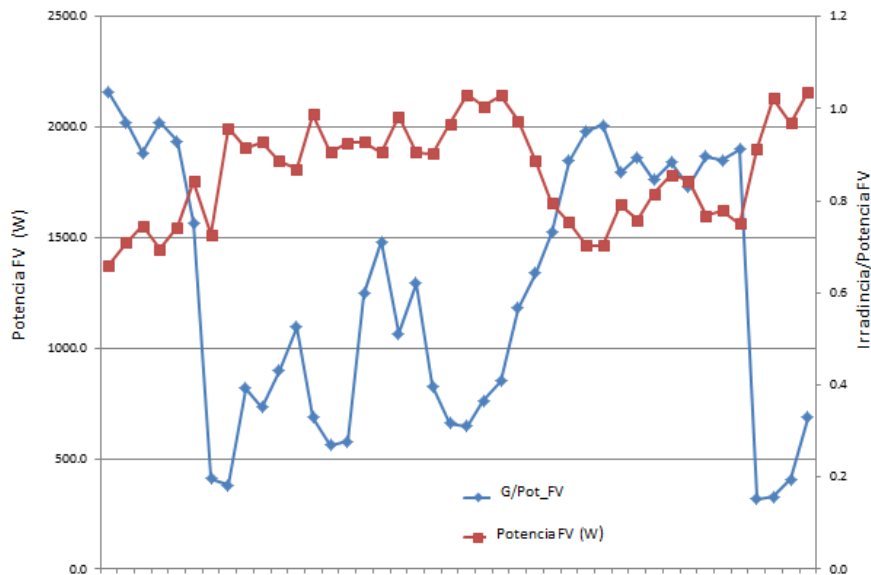


Figura 3- 8 Desempeño del SFV con el acoplamiento de la bomba de agua.

Por otro lado, se observa que aunque el SBFV trabaja cercano al punto de máxima potencia para radiaciones solares por debajo de 700 W/m^2 , mientras que para radiaciones superiores la potencia que entrega puede representar sólo el 75% de lo que podría entregar.

En las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se muestran la desviación de la potencia entregada por la bomba en relación al punto de máxima potencia, para esto la desviación se muestra a diferentes potencias radiactivas y para diferentes potencias del SFV. Observándose las desviaciones del sistema trabajando con 8, 7 y 6 módulos fotovoltaicos respectivamente. Cabe resaltar que el uso de 6 módulos permite que la bomba trabaje más cercana al punto de máxima potencia, con una desviación máxima en 100 W/m^2 de 14%, para 7 módulos la desviación se incrementa al 18% y para 8 módulos la desviación llega a ser del 35%. Con

estos datos se observa que es posible reducir costos del sistema al ajustar el acoplamiento del SFV con el de la bomba hidráulica.

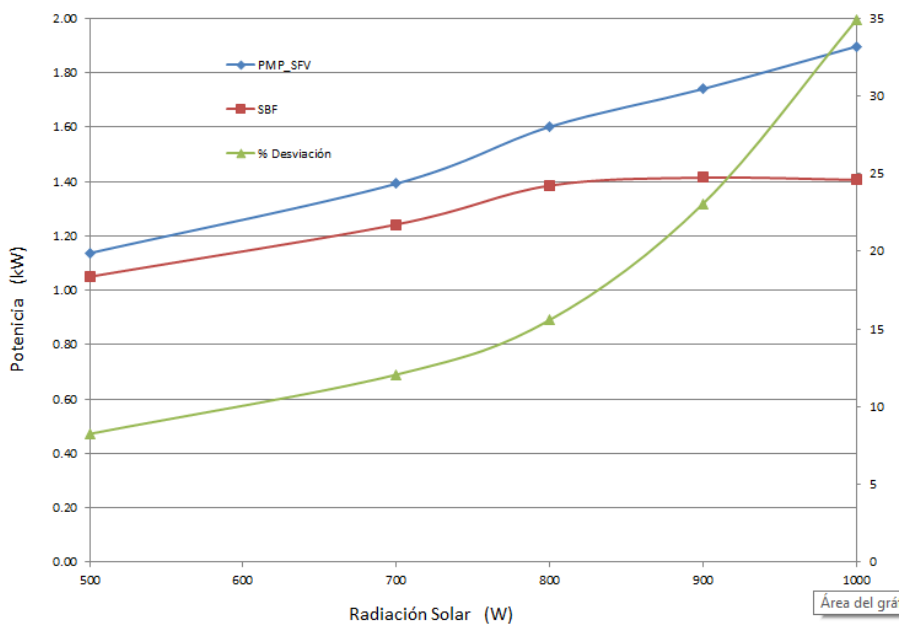


Figura 3- 9 Comparativo de Potencia SBF vs PMP

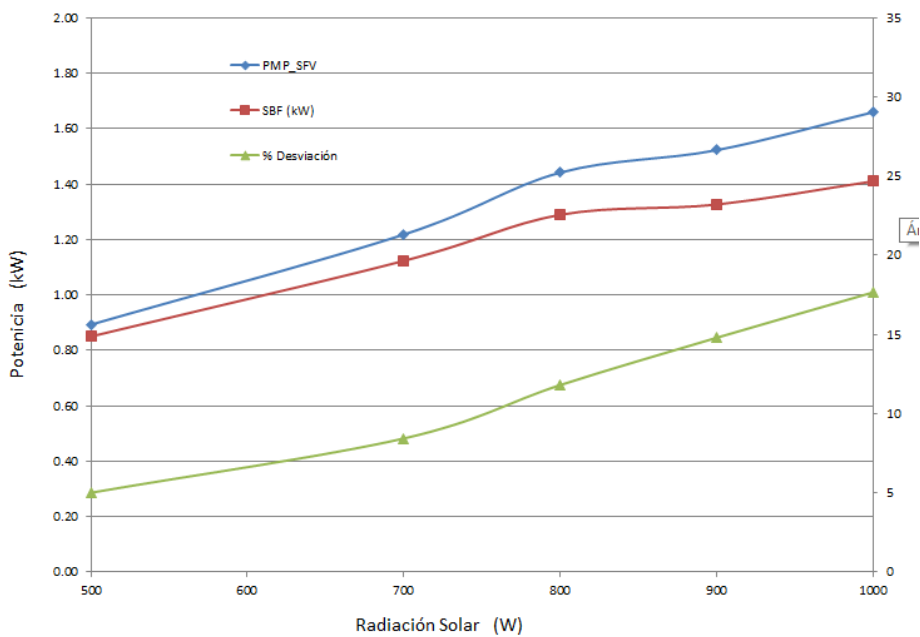


Figura 3- 10 Comparativo de Potencia SBF vs PMP

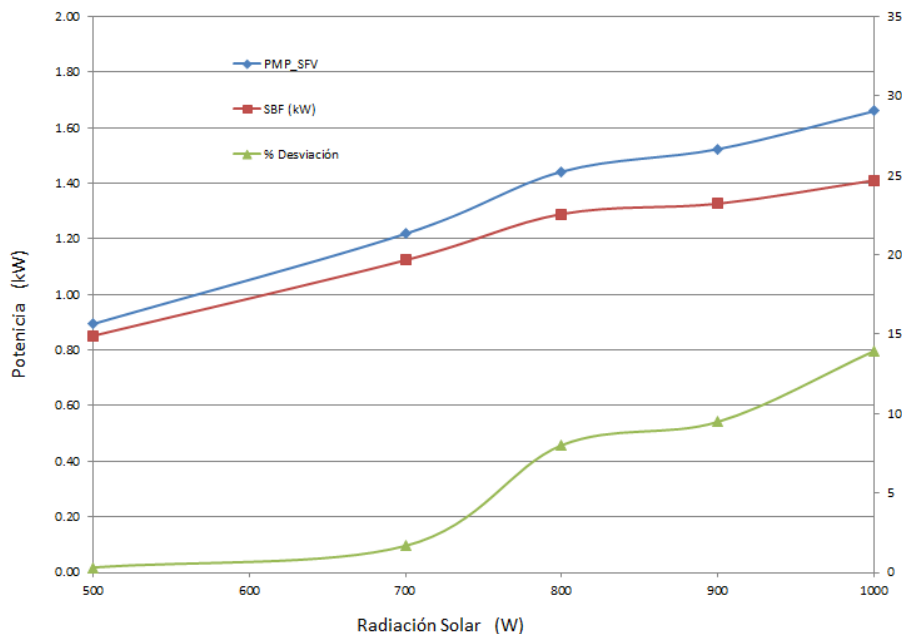


Figura 3- 11 Comparativo de Potencia SBF vs PMP

3. El uso de circuitos hidráulicos en el sistema con elementos rígidos han dado lugar a que surjan fugas a mediano plazo, más aun cuando el sistema se transporta, por lo que se recomienda el uso de circuitos hidráulicos basados en tuberías y conexiones más adecuados para resistir el transporte y/o reemplazo de partes.

4. Se observa conveniente implementar en el SDASANS un sistema de lavado y retro lavado, así como también la hidráulica necesaria para que se puedan realizar tratamientos químicos de limpieza para las membranas, a fin de maximizar su eficiencia y extender su vida útil.

El Sistema original para radiaciones solares por debajo de $700\text{W}/\text{m}^2$ trabaja cercano al punto de máxima potencia del sistema de bombeo, sin embargo, para radiaciones superiores (entre 750 a $1000\text{ W}/\text{m}^2$), la eficiencia del sistema de bombeo puede reducirse hasta un 35%. Las caídas de presión en el arreglo serial de membranas de nanofiltración son considerables (70%), por lo que configuraciones en diferentes arreglos es conveniente que se continúen estudiando.

Descripción del SDASANS, en su Versión 2 (optimizado)

Una vez modificado el equipo y probado de acuerdo a la metodología utilizada se observó que la intensidad energética pudo reducirse de 2.83 a $1.83\text{ kWh}/\text{m}^3$. Tal como se muestra la figura 3.12.

Con esto, se observó que el sistema puede entregar $0.55 \text{ m}^3/\text{kWh}$ de agua para riego agrícola, mejorando su desempeño en un 54%.

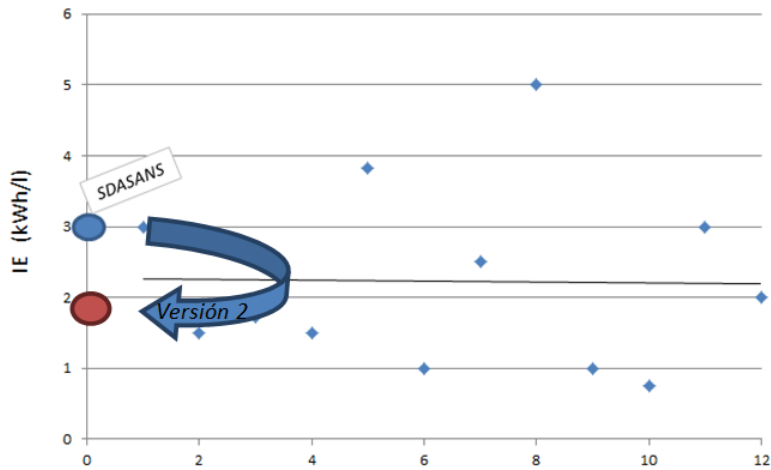


Figura 3- 12 Optimización del sistema de desalación solar por nanofiltración.

III.3.3 Conclusiones

La metodología propuesta para el estudio permitió evaluar y optimizar el desempeño del sistema de desalación por nanofiltración operado con energía fotovoltaica. Con lo que es posible mejorar la calidad del agua salobre a niveles adecuados para actividades agrícolas, logrando una reducción del 74.6% de las sales y del 97.5% de SO_4 . La tecnología de desalación desarrollada, optimizada y validada en condiciones de laboratorio, entregó agua para uso agrícola a razón de $0.55 \text{ m}^3/\text{h-pico}$, con una intensidad energética de $1.83 \pm 0.4 \text{ kW-h}/\text{m}^3$. En un comparativo se observó que el sistema en su versión original consume energía por arriba de la media, respecto a otros equipos y muestras similares en la escala mundial, mientras que en la versión mejorada se ubica por debajo de la media con una intensidad energética de $1.83 \text{ kW-h}/\text{m}^3$.

III.4 Validación del sistema de Desalación en campo

A fin de validar en campo bajo condiciones reales, la funcionalidad del sistema de desalación de agua para riego, operado mediante energía fotovoltaica se instaló la tecnología en el invernadero Santa Rita, Ubicado en el Municipio de Río Verde San Luis. En general se instaló un sistema de 1.92 kW_pico fotovoltaico para abastecer el requerimiento de energía para su funcionamiento, y derivado de que en el sitio existe un sistema de tratamiento del agua basado en osmosis inversa se requirió hacer una adaptación al desalador. Una vez terminadas las adecuaciones se puso en operación el sistema y durante las pruebas se observó que se obtuvo en promedio 4.5 lpm de agua bombeada a una incidencia solar de $450 \text{ W}/\text{m}^2$.

Durante el seguimiento y el monitoreo del funcionamiento del sistema se presentaron problemas de suministro de flujo de agua por taponamiento, debido a la presencia de algas en el depósito de abastecimiento de agua del invernadero; por lo que fue necesario hacer nuevas adaptaciones, entre ellas la reubicación de la bomba hidráulica del depósito, además de la instalación de una electroválvula para el control automático del nivel de agua en el nuevo depósito que alimentaría al sistema desalador. Posteriormente se calibraron y verificaron los dispositivos instalados. Las adecuaciones realizadas fueron exitosas, ya que se eliminaron por completo los problemas de obstrucción por algas en el microfiltro, esto se observó al determinar el desempeño del sistema después de 3 días de operación. También se verificó y evaluó el sistema con las modificaciones hechas y se continuó con la toma de muestras del agua cruda y permeada para su análisis en laboratorio. Registrándose un desempeño del sistema similar a los medidos con anterioridad ($1.98 \text{ m}^3/\text{kWh}$).

La toma de datos de la radiación solar durante la prueba de funcionamiento del sistema que duró tres días, se presentan en la tabla 11. En el periodo de pruebas de funcionamiento del desalador, en su oportunidad se realizó una entrevista personal con el Ingeniero Bernabé Hernández, quien es el experto y encargado del tratamiento del agua por osmosis inversa, que abastece a los Invernaderos de la unidad productora de Santa Rita, quien estuvo presente durante la instalación y pruebas del desalador, opinando que el funcionamiento del sistema es adecuado por su calidad del agua, que no presenta demasiada complejidad para su instalación y operación, externando también que considera que el sistema puede ser aplicado tanto en riego como en otras actividades productivas.

Tanto de las pruebas de laboratorio como de campo en relación a la operación y funcionamiento del sistema, se logró consolidar un buen funcionamiento del equipo desalador de agua de riego operado con energía fotovoltaica y que emplea membranas de nanofiltración para mejorar la calidad del agua, el cual presentó un desempeño y rendimiento energético y de permeado, de acuerdo a lo esperado, aún bajo las condiciones climáticas que se presentaron durante la prueba en el sitio donde se instaló el sistema. Lográndose además buena aceptación por parte del responsable del invernadero Santa Rita y productores de la zona invitados a la demostración del funcionamiento del sistema.

Tabla 11. Resultados de Pruebas de Funcionamiento

No. Prueba	Hora	Voltaje piranómetro (mV)	Radiación (W/m ²)	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Flujo de permeado (l/min)	Presión entrada (Mpa)	Presión desecho (Mpa)
Prueba 1	11:10	2.1	227.03	-	-	-	0.28	0.25
	11:33	2.1	227.03	-	-	-	0.33	0.31
	12:01	2.7	291.89	9.57	1050	6.58	0.39	0.36
	12:25	7.7	832.43	5.25	1020	11.66	0.56	0.52
	13:01	2.7	291.89	8.56	1030	7.22	0.36	0.34
	13:20	2.9	313.51	8.19	1000	7.33	0.39	0.36
Prueba 2	15:26	3.7	400.00	-	-	6.60-	-	-
	15:40	3.1	335.14	-	-	5.84	-	-
Prueba 3	12:58	3.3	356.76	-	-	-	-	-
	13:08	2.4	259.46	-	-	-	-	-
	13:10	3.1	335.14	15.22	1000	3.94	-	-
	13:12	4.8	518.92	9.51	1020	6.44	0.46	0.44
	13:21	2.4	259.46	17.47	1000	3.43	0.24	0.22
	13:41	5.3	572.97	7.32	1030	8.44	0.44	0.41
	14:30	1.4	151.35	16.98	1000	3.53	0.15	0.14
	14:36	4.2	454.05	12.24	1000	4.90	0.4	0.36
	14:44	4.1	443.24	7.77	1010	7.80	0.4	0.38
	14:52	4	432.43	8.14	1010	7.44	0.4	0.38
Prueba 4	15:03	3.7	400.00	8.46	1030	7.30	0.39	0.36
	15:14	2.8	302.70	9.91	1030	6.24	0.36	0.33
	11:18	3.4	367.57	13.04	1010	4.65	0.29	0.27

III.5 Análisis Costo-Beneficio de la implementación de la tecnología del SDASANS

El análisis Costo-Beneficio derivados de la implementación de la tecnología integrada, se desglosa en la tabla 12, a costos de Noviembre de 2013.

Tabla 12. Análisis de costos

Costos del proyecto ejecutivo		
No.		\$
1	Identificación de la zona de muestreo y para las pruebas en campo.	\$10,000.00
2	Estudio del agua cruda y condiciones ambientales prevalentes.	\$10,000.00
3	Identificación de la calidad del agua.	\$25,000.00
4	Diseño del SDASANS	\$30,000.00
5	Construcción de SDASANS	\$83,400.00
6	Suministro e instalación de fuente de poder solar fotovoltaica, estructura metálica y paneles solares, controles y accesorios.	\$51,240.00
7	Puesta punto del SDASANS	\$55,173.00
8	Estudio del desempeño energético y de calidad del agua de la desaladora propuesta (en el IMTA).	\$40,000.00
9	Adecuación del espacio y equipos para la puesta en operación en campo de la desaladora.	\$63,200.00
10	Pruebas en campo	\$64,000.00
11	Prueba de todo el sistema de distribución de agua y energía.	\$36,000.00
T o t a l		\$468,013.00

Es de resaltar que la tecnología permite habilitar zonas que en la actualidad se encuentran improductivas derivado de que las fuentes de agua de suministro del riego poseen mala calidad principalmente por salinidad; lo que limita severamente la productividad agrícola, por lo cual la adopción e implementación de ésta tecnología puede contribuir a detonar el desarrollo económico de éstas zonas.

La tecnología integrada, con el diseño y capacidad actual, puede proporcionar hasta 3.18 m³/día, considerando una insolación anual promedio de 6.3 kWh/día. Por otro lado, si se toma como referencia que el costo de compra de una pipa de agua puesta en campo es de 50 \$/m³, el sistema generaría ahorros por concepto de compra de agua de \$9,600 pesos al mes (95.4 m³/mes), lo que al año sumaría un ahorro de \$57,240.

Por lo anterior, el tiempo de retorno de la inversión del presente proyecto para desalar agua, se estima de 8.2 años. Sin embargo, considerando un costo únicamente de la implementación de la tecnología, ya sin estudios en laboratorio ni en campo, el tiempo de recuperación de la inversión puede abatirse a poco menos de la mitad.

IV. Sistema integrado Desalador +Riego con energía solar

En el estudio de la tecnología integrada de desalación del agua para riego con energía fotovoltaica y nanofiltración solar, se verificó la efectividad de la solución propuesta, llevando a cabo pruebas de funcionalidad en condiciones de laboratorio y pruebas en campo del sistema integrado completo. Donde el agua que entrega el SDASANS en una primera etapa, puede ser tomada por el sistema de riego presurizado en una segunda.

El sistema de riego presurizado operado con energía fotovoltaica que se probó en una hectárea de cultivo de calabaza, trabajó a una eficiencia electromecánica del 59%, suministrando agua a razón de un metro cúbico por cada 0.17 kWh y obteniéndose en el riego una eficiencia de aplicación del 88% con un coeficiente de uniformidad de 92%, con una productividad de calabaza de 42 kg/m³. Con la solución propuesta se observó que utilizando energía fotovoltaica se puede mejorar la calidad del agua salobre para riego mediante nanofiltración solar y que implica un costo energético de 1.98 kW_h/m³ y para bombear el agua para riego presurizado tuvo un costo energético de 0.17 kWh/m³, por lo que la intensidad energética de la solución integrada propuesta en este trabajo es de sólo 2.15 kWh/m³. También, cabe resaltar que el sistema integrado presentó una alta aceptación entre los productores de las zonas de estudio.

Suministrando agua salobre mejorada a través del SDASANS y considerando la intensidad energética del sistema de riego (2.15 kW-h/m³), se obtuvo una producción de calabaza de 19.6 kg/kWh fotovoltaico suministrado, a esto se le denomina productividad por kilowatt generado para el sistema de desalación y riego presurizado. Por otro lado, regando a partir de agua con buena calidad (rio o pozo, <800 ppm), considerando sólo la intensidad energética para el bombeo del sistema de riego de 0.17 kW-h/m³, se determinó que es posible obtener una relación de 248.2 kg/kWh fotovoltaico suministrado, lo que se denomina productividad por kilowatt generado, mientras que para el caso de utilizar desalación y riego a la vez esta relación es de 42.19 kg/kWh, tal como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Productividad y eficiencia energética.

	Desalación	Riego	Desalación + Riego
Productividad calabaza (kg/kwh)	-	248.2	19.6
IE (kWh/m ³)	1.98	0.17	2.15
Requerimiento de riego para calabaza (kg/m ³)	42.19		

El costo total del proyecto ejecutivo de la tecnología de desalación es de \$ 468,013.00 y el correspondiente a riego presurizado es de \$494,318.00. Con lo anterior, se puede observar que la tecnología de bombeo presurizado fotovoltaico desarrollada por el IMTA se puede

recuperar la inversión requerida, en alrededor de 4.10 años, mientras que la correspondiente a desalación es de 8.2 años. Cabe aclarar que la implementación de la tecnología, ya sin estudios en laboratorio ni en campo, el tiempo de recuperación de la inversión puede abatirse a poco menos de la mitad.

Referencias Bibliográficas

1. Comisión Nacional del Agua (CNA). 2009. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua. Diario Oficial de la Federación. 01 de noviembre de 2009. México.
2. HACH, 2013. Manual: Colorimeter Procedures manual DR/890 -HACH, I48470-22, 2013.
3. IEA-ETSAP and IRENA© Technology Brief I12, Marzo de 2012.
4. IMTA-SEMARNAT, 20212. Informe final de proyecto interno RD-1206.1. Uso de energía renovable con tecnología propia para su aplicación en el subsector agrícola. Jiutepec, Morelos, México. 74 pág.
5. NOM-001-ECOL-1996 (NOM-001-SEMARNAT-96). Diario Oficial de la Federación. 24 de diciembre de 1996. México.