

***CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
AVANZADOS, S.C.***

**“ESTUDIO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE RIEGO
POR GOTEO POR MEDIO DE ENERGIA SOLAR
PARA INVERNADERO”**

*TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
ENERGÍAS RENOVABLES*

Presentan:

Erik Juárez Cortes

Ing. Industrial

Alberto Vera Camacho

Ing. Electromecánico

Director de tesis:

Dr. Iván Alziri Estrada Moreno

Co-director de tesis:

Dr. Rocío Berenice Domínguez Cruz

Agradecimientos

A **Dios** por darme la fortaleza de ser constante en todo lo que realizo, por haber llegado a obtener un grado más en la formación de mi vida profesional al culminar satisfactoriamente la Maestría en Energías Renovables, área Fotovoltaica.

Agradezco al **Dr. José Alberto Duarte Moller** Coordinador de la Maestría y a cada uno de los doctores del CIMAV que estuvieron involucrados para que este proyecto se realizara, gracias por su conocimiento transmitido y por su valioso tiempo fue posible la culminación del mismo.

Agradezco al **Ing. Gustavo Vera Cruz**, por su asesoría en la parte técnica, al **Técnico Armando Burgos** por apoyarnos incondicionalmente y a cada uno de mis compañeros que estuvieron involucrados para la realización de nuestra maestría.

Alberto Vera Camacho

A **Dios** por permitirnos terminar satisfactoriamente esta Maestría.

Agradezco a los doctores del CIMAV, ya que gracias a su empeño y dedicación lograron transmitirnos sus conocimientos y experiencia.

A nuestros directores de Tesis **Dr. Iván Alziri Estrada Moreno** y **Dra. Rocío Berenice Domínguez Cruz** por su gran ayuda en la redacción de esta Tesis, muchas gracias por todo el tiempo, paciencia y apoyo para poder realizar las mejoras y modificaciones.

Agradecer a nuestros compañeros de trabajo, en especial a **Armando Burgos** por apoyarnos incondicionalmente para realizar y terminar este trabajo.

Erik Juárez Cortes

Dedicatorias

Esta Maestría la dedico a mi Padre **Enrique Vera Carrasco**, QEPD, A mi Madre **Yolanda Camacho Soto**; gracias por haber creído en mí, gracias por haberme motivado a seguir adelante, les agradezco a ambos lo que ahora soy en la vida siempre estarán presente en todo lo que realice, los quiero.

Dedico con mucho Amor esta maestría a mi esposa **Elvira Andrade Ramos** por su valioso apoyo incondicional por alentarme a seguir preparándome profesionalmente, te amo mi vida.

A mis dos grandes amores **Brigitte Vera Andrade** y **Fabiola Vera Andrade**, a ustedes hijas les dedico esta maestría ya que fueron mi motivación para culminar este proyecto, las amo eternamente.

A mis hermanos **Norma**, **Angur** y **Enrique** les dedico con mucho cariño este trabajo.

Alberto Vera Camacho

El presente trabajo está dedicado a mi compañera de vida **Eve**, mis hijos **Erika** e **Iker**, quienes son fundamentales en todo lo que hago, son una motivación e inspiración extra para superarme como persona, a todas aquellas personas que formaron parte de este proceso como estudiante.

En especial, quiero agradecer a mis padres, **Sara** y **Federico (†)**, a mi papá **Juanito**, mis hermanos **Juan Antonio**, **Wendy**, **Jhaen**, **Luis Fernando** y **Armando (†)** por el constante apoyo que me brindan día a día.

Dedicado a mis amigos, personas que siempre estuvieron conmigo cuando los necesité, aquellos con los cuales espero compartir por mucho tiempo más.

Muy en especial a nuestro amigo y compañero **José Luis Muñoz Díaz**, QEPD. Siempre te llevaremos en el corazón.

Erik Juárez Cortes

Resumen

Este trabajo trata acerca de un sistema de riego por goteo mediante un sistema fotovoltaico para la Universidad Tecnológica de Tecamachalco. La zona de Tecamachalco, Puebla. Se localiza en la parte central del estado de Puebla; sus coordenadas geográficas son $18^{\circ} 52' 0.12''$ N, $97^{\circ} 43' 0.12''$ W, tiene una superficie de 218.15 km^2 que se ubica en el lugar 55 con respecto a los demás municipios del estado, su altitud media sobre el nivel del mar es de 2.055 m, las colindancias del municipio son al norte con Quecholac y Palmar de Bravo, al sur con Xóchitlan Todos Santos, al oriente con Yehualtepec y al poniente con San Salvador Huixcolotla.

Para dicho propósito se utilizó la elevada radiación solar con que cuenta la zona, convirtiendo la energía proveniente del sol, en energía eléctrica, a través de paneles fotovoltaicos.

El objetivo principal en la realización de este proyecto es diseñar un sistema de riego por goteo mediante paneles solares, para un invernadero que a su vez este automatizado por medio de un micro controlador (Arduino).

Para determinar los requerimientos del sistema, se consideraron las dimensiones del invernadero de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco, para realizar el cálculo del sistema de riego por goteo para el óptimo desarrollo del cultivo.

De igual manera, se realizó la selección de accesorios de riego y se utilizó el panel solar disponible de la Universidad, el cual es necesario para accionar la bomba para dicho sistema de riego, así también, fue necesaria la orientación e inclinación óptima para el panel solar.

Para finalizar, se dio una estimación del costo que significaría instalar este tipo de sistema en la zona de estudio.

Palabras clave: Invernadero, sistema fotovoltaico, riego por goteo.

Abstract

This work is about a drip irrigation system using a photovoltaic system for the Technological University of Tecamachalco, Puebla. Tecamachalco it is located in the central part of the state of Puebla; its geographical coordinates are $18^{\circ} 52' 0.12''$ N, $97^{\circ} 43' 0.12''$ W. It has an area of 218.15 km^2 that is located in the 55th place concerning the other municipalities of the state; its average altitude above sea level is 2,055 m. The boundaries of the municipality are to the north with Quecholac and Palmar de Bravo, to the south with Xóchitlan Todos Santos, to the east with Yehualtepec and to the west with San Salvador Huixcolotla.

For this purpose, the high solar radiation of the area was used, converting the energy coming from the sun, into electrical power, through photovoltaic panels.

The primary objective of this project is to design a system of drip irrigation employing solar panels, for a greenhouse that in turn is automated using a microcontroller (Arduino).

To determine the requirements of the system the dimensions of the greenhouse of the Technological University of Tecamachalco were considered, to perform the calculation of the drip irrigation system for the maximum development of the crop.

In the same way, the selection of irrigation accessories was carried out, and the available solar panel of the University was used, which is necessary to operate the pump for the irrigation system, as well as, the orientation and optimum inclination for the panel were essential solar.

Finally, an estimate of the cost of installing this type of system in the study area was given.

Keywords: Greenhouse, photovoltaic system, drip irrigation.

Índice

Agradecimientos.....	I
Dedicatorias	II
Abstract	IV
Índice.....	V
Índice de Tablas.....	VIII
Índice de Figuras.....	VIII
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Antecedentes	3
1.1.1 Producción mundial del petróleo.....	3
1.2 Motivación del estudio.....	6
1.3 Planteamiento del problema	7
1.4 Justificación	8
1.5 Hipótesis	9
1.6 Objetivos	9
1.7.1 Objetivo general.....	9
1.7.2 Objetivos específicos	9
Capítulo II. Marco Teórico	10
2.1 La energía solar	11
2.1.1. Unidades de medida.....	12
2.1.2 Instrumentos para medición de radiación solar directa.....	14
2.1.3 Instrumentos para medición de radiación solar global.....	14
2.1.4 Instrumentos para medición de radiación global e infrarroja.....	15

2.1.5 Irradiación	16
2.1.6 Insolación.....	17
2.2 Posición y orientación de la superficie captadora	18
2.3. Introducción a los sistemas fotovoltaicos	20
2.3.1 Fenómeno fotovoltaico.....	20
2.4 Unión n-p	21
2.5 Tecnología de fabricación de celdas solares	23
2.5.1 Celdas de silicio mono y policristalino.....	24
2.5.2 Celdas de silicio amorfo.....	25
2.6 Sistema de bombeo fotovoltaico	27
2.6.1 Panel fotovoltaico (PF).....	27
2.6.2 Motores.....	33
2.6.3 Equipo de bombeo.....	34
2.6.4 Inversor	34
2.6.5 Baterías	36
2.7 Riego por goteo	38
2.7.1 Elementos básicos que componen un equipo de riego por goteo	40
2.7 Sistema de riego con energía solar.....	43
2.8 Cálculo del sistema fotovoltaico.....	45
2.8 Arduino.....	45
2.8.1 Ventajas del arduino	46
2.9 Invernadero.....	47
Capítulo III. Implementación del sistema de riego.....	49
3.1 Metodología de trabajo	50
3.1.1 Análisis del sistema de riego tradicional, SRT	50
3.1.2 Diseño del SAR.....	50

3.1.3 Instalación del sistema de generación de energía fotovoltaica, SGEF	51
3.1.4 Puesta en marcha del SGEF	51
3.1.5 Diseño del sistema de control del SAR.....	52
3.1.6 Puesta en marcha del SAR en el invernadero	52
3.1.7 Costo del SAR implementado	53
Capítulo IV. Resultados y Discusión	54
4.1 Análisis del sistema de riego tradicional, SRT	55
4.1.1 Sistema utilizado actualmente	57
4.1.2 Secciones de riego	58
4.1.3 Invernadero para el cultivo de fresas	59
4.3 Diseño del SAR.....	61
4.2.1 Cálculo de la bomba	62
4.2.2 Cálculo del panel fotovoltaico (PF)	64
4.3 Instalación del sgef	64
4.3.1 Orientación e inclinación del panel fotovoltaico (PF)	65
4.4 Puesta en marcha del SGEF	66
4.5 Diseño del sistema de control del SAR	67
4.6 Puesta en marcha del SAR en el invernadero	70
4.7 Costo del SAR.....	71
Conclusiones.....	73
Recomendaciones y Trabajo Futuro	75
Referencias	77
Anexos	79
Anexo 1	80
Anexo 2.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Resumen de las Tecnología Fotovoltaica</i>	26
<i>Tabla 2. Ventajas y desventajas de los sistemas solares</i>	44
<i>Tabla 3. Costos de inversión del sistema automático de riego y tradicional para un invernadero</i>	72
<i>Tabla 4. Costos de mantenimiento del sistema tradicional para el invernadero de la UTTecam</i>	72

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Producción de barriles de petróleo a través de los años. (Industry database, 2003)</i>	4
<i>Figura 2. Ejemplo de invernadero</i>	8
<i>Figura 3. Esquema de los efectos de la atmósfera sobre la radiación</i>	11
<i>Figura 4. Representación de horas pico</i>	13
<i>Figura 5. Pirheliómetro (http://www.labsolar.utfsm.cl, 2016)</i>	14
<i>Figura 6. Piranómetro (Lado izq.) y Cúpula de vidrio (lado Der.) (http://www.atmosfera.cl/, 2016)</i>	15
<i>Figura 7. Radiómetro de flujo neto (http://www.atmosfera.cl, 2016)</i>	16
<i>Figura 8. Irradiación durante un día despejado (www.ec.upc.es, 2016)</i>	17
<i>Figura 9. Irradiación y horas solares pico (Insolación). (http://www.re.sandia.gov, 2016)</i>	18
<i>Figura 10. Ilustración del movimiento del sol respecto a un panel fotovoltaico</i>	19
<i>Figura 11. Unión N-P de una Celda Solar (http://revistaurbanismo.uchile, 2016)</i>	22
<i>Figura 12. Granos de Silicio Monocristalino y Policristalino (http://www2.ing.puc.cl, 2016)</i>	24
<i>Figura 13. Módulo de celdas solares de Silicio Monocristalino. (http://www.siemenssolar.com, 2016)</i>	25
<i>Figura 14. Módulo de celdas solares de Silicio Multicristalino. (http://www.inelsacontrols.com, 2016)</i>	25
<i>Figura 15. Diagrama típico de un sistema fotovoltaico para bombeo de agua</i>	27
<i>Figura 16. Detalle de un panel fotovoltaico</i>	28
<i>Figura 17. Curva característica I-V</i>	29
<i>Figura 18. Factor de forma o de llenado</i>	30
<i>Figura 19. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación, considerando una irradiancia de 1,000 W/m² (http://www.re.sandia.gov, 2016)</i>	32
<i>Figura 20. Forma de onda cuadrada</i>	35
<i>Figura 21. Forma de onda senoidal modificada</i>	35
<i>Figura 22. Forma de onda senoidal pura</i>	36
<i>Figura 23. Esquema general de un sistema de riego por goteo (Bustamante, J. 1996)</i>	40

Figura 24. Gotero de laberinto en línea.....	43
Figura 25. Ubicación de Tecamachalco, Puebla.	44
Figura 26. Diseño del SAR.	51
Figura 27. Ubicación de los invernaderos con respecto a la infraestructura de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco.....	56
Figura 28. Cultivos de los invernaderos, 1) jitomate (Izq.) y 2) fresa (Der.).....	56
Figura 29. Sistema de riego y bomba (5 HP) del invernadero 1.....	57
Figura 30. Bomba (3 HP) utilizada en el invernadero 2.	58
Figura 31. Vista del invernadero 2 (fresa).	59
Figura 32. Estados con mayor producción de fresa en México.....	60
Figura 33. Sección del riego en las líneas de cultivo de fresa.	61
Figura 34. Esquema y componentes del sistema automático de riego propuesto.	62
Figura 35. Imagen de la simulación realizada del invernadero 2, en el Recuadro una sección.	63
Figura 36. Disposición de los componentes del SGEF, que emplea un panel fotovoltaico de 80W.	65
Figura 37. Inclinación del PF mediante aplicación PV Solar Power.	66
Figura 38. Aplicación PV Solar Power - lectura de latitud y grados de inclinación.....	66
Figura 39. Puesta en marcha del sistema (izq.) y pruebas con carga (der.).....	67
Figura 40. Sistema de control, Arduino y sección de salidas.	68
Figura 41. Sensor de temperatura DHT11.	68
Figura 42. Revisión de la instalación del SAR en las secciones de fresa.	71
Figura 43. Esquema de una bomba centrífuga sumergible. (http://www.re.sandia.gov , 2016).....	81
Figura 44. Esquema de una bomba volumétrica de cilindro. (http://www.re.sandia.gov , 2016).....	82

Capítulo I. Introducción

El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los comienzos de la historia, puede llegar a satisfacer gran parte de las necesidades, si se sabe cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente se irradia sobre el planeta.

El empleo de la energía por parte del hombre ha sido una necesidad y un reto, y las energías renovables han jugado un papel importante desde que se ha descubierto su gran potencial.

El desarrollo de la tecnología y el descubrimiento de nuevos vectores energéticos han permitido que, con el paso del tiempo, las energías renovables tengan un peso dentro de ellos, por lo que ahora es posible aprovecharlos con otros fines, como es la producción de la electricidad.

Vivimos en un país que depende de la producción del petróleo para cubrir su demanda energética, uno de los componentes de la economía más sensibles a la carencia de este producto es la agricultura bajo riego, en la actualidad en el sistema de riego es común utilizar un motor de combustión interna (moto bomba) que requiere de combustibles fósiles que afectan directamente los costos de producción y trae consecuencias nefastas para la emisión de CO₂.

Por lo que se vuelve necesaria la aplicación de una fuente de energía alterna que sea amigable con el ambiente como lo es el sistema de riego por goteo utilizando energía solar fotovoltaica.

Este sistema consiste en extraer agua de pozos o fuentes superficiales mediante bombas de agua, con la aplicación de paneles fotovoltaicos, ya que estos dispositivos captan la radiación solar, que es una fuente de energía inagotable y sin residuos.

La energía solar absorbida por las celdas fotovoltaicas pondrá en operación la bomba de agua, ubicada en la cercanía del área de cultivo de donde es descargada mediante cinta de riego por goteo que trabajan a baja presión.

El sistema bombea agua para el desarrollo y la producción del cultivo de manera automatizada, mediante un micro controlador (Arduino), por lo cual, es necesaria una batería que permita almacenar la energía para el funcionamiento del sistema ya que operará en diferentes periodos de riego durante el día.

El impacto esperado de este proyecto es la viabilidad de instalar un sistema de riego por goteo mediante energía fotovoltaica, aprovechando varios periodos de siembra en el año ya que los cambios climáticos amenazan la estabilidad de la producción.

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL PETRÓLEO

Una de las razones del aumento de precios es por la falta de suministros de todos los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) están siendo cada vez más escasos y su producción más costosa. En la Figura 1 se ve claramente que la producción mundial de petróleo disminuye en los últimos años.

El mundo no se puede permitir quedarse en la ruta del desarrollo energético “convencional”, perpetrando su dependencia del uso de combustibles fósiles, de la energía nuclear y otras tecnologías obsoletas.

Las energías renovables pueden y deben tener un papel importante en el futuro energético del mundo. Ahora es el momento de cambiar a un futuro energético sostenible y realmente seguro, un futuro construido sobre tecnologías limpias, el desarrollo económico.

En los países de Europa, África y Asia, se están utilizando otras alternativas de energía más seguras y menos contaminantes, el avance tecnológico hace que se mejoren los sistemas y se desarrollen nuevos procedimientos que faciliten su uso. A estas alternativas se les conoce como energías renovables, son aquellas que se producen de manera continua y tienen la ventaja de ser inagotables, limpias y se pueden utilizar en el mismo lugar que se producen.

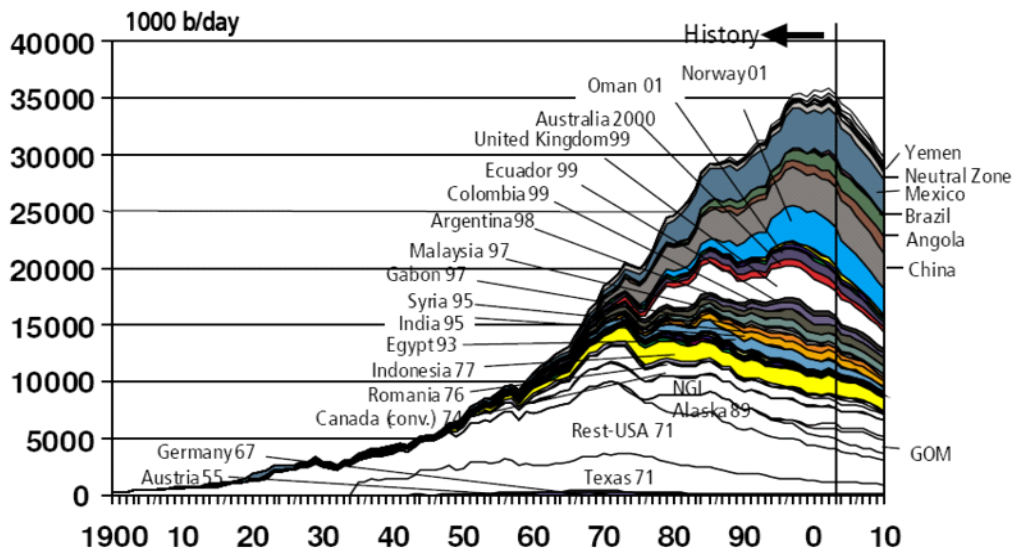


Figura 1. Producción de barriles de petróleo a través de los años. (Industry database, 2003).

El sol es la fuente de energía de la tierra, se recibe en forma de radiación que retiene la atmosfera y permite que la tierra se mantenga a una temperatura más o menos constante posibilitando que exista vida.

La radiación solar además de proporcionar, luz, también se transforma en biomasa por medio de la fotosíntesis, en viento por los gradientes térmicos que se producen en la atmosfera o en la energía hidráulica por la evaporación de los mares. Además, tiene la ventaja de complementarse entre sí, con las energías renovables se pueden obtener las dos formas de energía más utilizadas que son: calor y electricidad.

Las ventajas obtenidas con las energías renovables son:

- Son respetuosas con el medio ambiente.

- No emiten gases contaminantes.
- No generan residuos peligrosos.
- Se pueden instalar en zonas rurales y aisladas
- Disminuyen la dependencia de suministros externos.

Favoreciendo su integración, por ejemplo; En una casa habitación se puede utilizar para los días de sol energía solar fotovoltaica, mientras que los días fríos y ventosos, frecuentemente nublados, son los aerogeneradores los que pueden producir mayor energía eléctrica, otro caso, no menos importante, es saber aprovechar los recursos que pueden generarse en las comunidades rurales, como puede ser la utilización de la energía solar en la creación e implementación de un invernadero, mismo que puede tener las siguientes ventajas, la cosecha no sería estacional sino perenne, los costos de producción serían bajos con la automatización del mismo, el uso de agua se puede reducir hasta en un 30%.

Es de vital importancia señalar que este proyecto permite además la creación de fuentes de empleo, el aprovechamiento por el hombre de las fuentes de energía renovable, entre ellas, la energía solar, eólica, hidráulica, es muy antiguo; desde muchos siglos antes de nuestra era ya se utilizaban y su empleo continuo durante toda la historia hasta la llegada de la revolución industrial, en la que, debido al bajo precio del petróleo, fueran abandonadas, durante los últimos años debido al incremento del costo de los combustibles fósiles y los problemas medio ambientales derivados de su explotación, estamos asistiendo a un renacer de las energías renovables, el sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la historia, pueden satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos como usar de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta.

De acuerdo con (Flores, 2013) “desde la formación de la Tierra, hace 4 600 millones de años, el Sol ha estado en el centro del Sistema Solar dando luz y calor, y se ha mantenido tal y como hoy lo conocemos. Los astrónomos calculan que todavía

le quedan 5 mil millones de años más hasta que comience a tener reacciones violentas y explosivas hasta convertirse en una gigante roca”.

No sería racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas menos seguras o simplemente contaminantes.

¿Qué se puede hacer con la energía solar? Básicamente, recogiendo de forma adecuada la radiación solar, se puede obtener calor y electricidad.

El calor se logra mediante los colectores térmicos y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos, ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ni en cuanto a su tecnología ni en cuanto a su aplicación.

Hablaremos primero de los sistemas de aprovechamiento fotovoltaico: energía limpia, sin ruidos, para disfrutar de total autonomía durante muchos años o bien si está abonado a una compañía eléctrica podrá vender la energía sobrante a ésta.

Casi sin mantenimiento en zonas alejadas de la red eléctrica, una instalación de energía solar fotovoltaica es más económica en comparación a un grupo electrógeno a pocos años de vida, si además valoramos el impacto ambiental, la contaminación, residuos y ruidos por supuesto que siempre son más rentables.

Para calentar agua y calefacción son más eficientes los colectores térmicos en lugar de paneles fotovoltaicos.

Sin duda en nuestros días vale la pena generar y aplicar esta nueva tecnología que impacte a la sociedad de manera positiva.

1.2 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

Este proyecto consiste en proponer una solución distinta y aplicable a las comunidades rurales que no cuenten con suministro de energía eléctrica para el riego

de sus huertos o para sus invernaderos, es ideal para ciertas aplicaciones donde se requiera extraer agua para darle algún uso posterior como, por ejemplo: el sistema de riego por goteo a través de energía solar.

Todo lo anterior, con el fin de entregar una opción limpia, de nulo impacto ambiental para zonas rurales, y a su vez contribuir a una mejora en los sistemas de riego en la zona, como también en la calidad de vida de los lugareños.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No contar con una red eléctrica cercana a los invernaderos, motivo por el cual su sistema de riego por goteo funciona mediante una moto bomba que opera con combustible fósil para atender los requerimientos de riego para los cultivos.

La problemática que se tiene, es la de extraer agua de los pozos o fuentes superficiales con técnicas poco eficientes, llegando incluso a no regar en ciertos días por falta de combustibles fósiles, resultado que a la larga dificulta el correcto y debido crecimiento de los cultivos existentes en los huertos o en sus invernaderos.

Teniendo como base y de acuerdo con (Houghton, J. 2002) se define al invernadero como “un lugar cerrado, estático y accesible a pie, que se destina a la producción de cultivos, dotado habitualmente de una cubierta exterior translúcida de vidrio o plástico, que permite el control de la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el desarrollo de las plantas”, Figura 2.

Siendo, el efecto producido por la radiación solar que, al atravesar un vidrio u otro material traslúcido, calienta los objetos que hay adentro; estos, a su vez, emiten radiación infrarroja, con una longitud de onda mayor que la solar, por lo cual no pueden atravesar los vidrios a su regreso quedando atrapados y produciendo el calentamiento.

El cristal o plástico usado para un invernadero trabaja como medio selectivo de la transmisión para diversas frecuencias espectrales, y su efecto es atrapar energía dentro del invernadero, que calienta el ambiente interior.



Figura 2. Ejemplo de invernadero.

También sirve para evitar la pérdida de calor por convección, esto puede ser demostrado abriendo una ventana pequeña cerca de la azotea de un invernadero: la temperatura cae considerablemente. Por lo tanto, se percibe la necesidad de implementar este sistema que sirva de apoyo al agricultor de las zonas rurales del Estado de Puebla, teniendo un piloto en la región de Tecamachalco, ya que ofrece las condiciones adecuadas como son clima, suelo, tierra, ubicación geográfica y acceso, lo que facilita el desarrollo de este proyecto de investigación.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Se ha venido insistiendo en la necesidad de que las instalaciones de invernaderos reúnan un mínimo de características técnicas que permitan la creación de un clima adecuado para los cultivos, pero está claro que ello exige una serie de condiciones que faciliten un adecuado manejo y que a su vez las propias estructuras lo justifiquen.

De los invernaderos se busca conocer si mediante energías de carácter renovable se pueden lograr invernaderos autosuficientes desde el punto de vista energético y si dicha posibilidad es viable para llevarla a cabo con las soluciones técnicas que existen en la actualidad.

En definitiva, se trata de dotar a las explotaciones de invernaderos de energía eléctrica procedente de fuentes de energía alternativa, en este caso energía solar, que resulta aconsejable tanto técnica como económicamente.

1.5 HIPÓTESIS

Es viable diseñar un sistema de riego por goteo mediante paneles fotovoltaicos para invernaderos de manera rentable, aplicando la automatización mediante una interfaz de programación de código abierto (Arduino).

1.6 OBJETIVOS

1.7.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de riego por goteo para cultivos en invernadero a través de la energía fotovoltaica.

1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar los conocimientos adquiridos en el funcionamiento de un sistema de riego por goteo para cultivos en un invernadero.
- Instalar el sistema y programar los ciclos de riego por goteo para el cultivo.

Capítulo II.

Marco Teórico

En el presente capítulo, se pretende entregar ciertas nociones básicas, que permitan un mejor entendimiento de los factores que afectan la captación de la energía solar. Además, describir los principios bajo los cuales funcionan los dispositivos de captación solar y tecnología de fabricación.

2.1 LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar, es la energía radiante producida por Sol, como resultado de reacciones nucleares de fusión, ésta llega a la Tierra a través del espacio que interactúa con la atmósfera y la superficie terrestre. Sin embargo, del total de energía no toda llega a la tierra, ya que solo $\frac{3}{4}$ partes de ella entran a través de la atmósfera.

Esta energía del astro solar, llega a la tierra en forma de radiación, en la Figura 3, se muestran los diferentes procesos que sufre la energía procedente del Sol antes de ser captada por el aparato receptor.

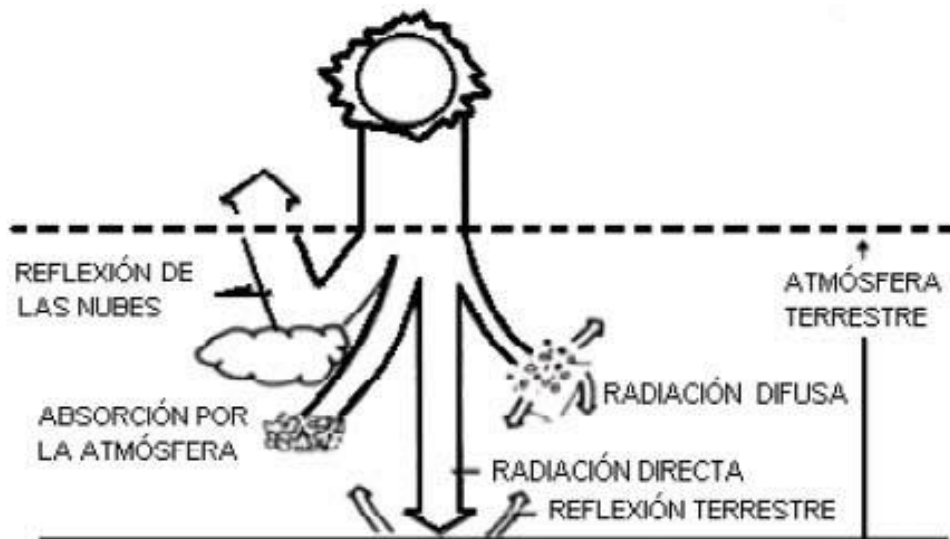


Figura 3. Esquema de los efectos de la atmósfera sobre la radiación.

2.1.1. UNIDADES DE MEDIDA

La Energía incidente en una superficie y a lo largo de cierto periodo de tiempo, se mide en Kilowatt hora por metro cuadrado (kWh/m^2).

Es importante hacer notar que ésta es una unidad de energía y no de potencia, también algunos libros, utilizan como unidad el Mega Joule por metro cuadrado (MJ/m^2) o unidades de calor como calorías por metro cuadrado (Cal/m^2) o BTU/ft^2 .

$$1 kWh/m^2 = 3.61 MJ/m^2$$

$$1 kWh/m^2 = 860 Cal/m^2 = 317.02 BTU/ft^2$$

Dado que la distancia del sol a la tierra es relativamente fija, el valor de la irradiación fuera de la atmósfera terrestre, se fijó en $1,353 W/m^2$. A este valor se le llama constante solar.

Debido a las condiciones de nubosidad, vapor de agua, gases, partículas contaminantes y sólidos en suspensión, a medida que la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre, ésta sufre procesos de reflexión, refracción y absorción, por lo que su magnitud disminuye.

Bajo condiciones de cielo despejado, a la radiación solar máxima que se puede recibir en la superficie terrestre, se le asignó la magnitud de $1,000 W/m^2$ que en realidad la intensidad media de la radiación solar sobre la superficie terrestre es $630 W/m^2$

La radiación que llega a la superficie terrestre se compone de radiación directa y radiación difusa. La primera se refiere a la que logra filtrarse de los procesos atmosféricos anteriormente mencionados y su valor máximo se obtiene en condiciones de cielo despejado. La radiación difusa es la que se recibe después de haber cambiado de dirección debido a los procesos atmosféricos de reflexión y refracción. Al conjunto de ambas componentes se le conoce como radiación global.

A lo largo del día, la irradiación que recibe un captador varía cada instante, en condiciones atmosféricas iguales los valores mínimos se presentarán al amanecer, aumentando hasta llegar a un valor máximo al mediodía y posteriormente disminuir hasta alcanzar valores mínimos al atardecer, este fenómeno es consecuencia de la rotación de la tierra, Figura 4.

A la cantidad de irradiación acumulada durante un tiempo determinado se le llama Insolación, si la unidad de tiempo es una hora (h), entonces las unidades de insolación son Wh/m^2 , generalmente la insolación se reporta como horaria, diaria, mensual, estacional o anual.

Otra forma de expresar la insolación es mediante el término Hora Solar Pico (HSP), el cual se refiere a la energía acumulada durante una hora a una irradiación promedio de $1,000 \text{ W/m}^2$.

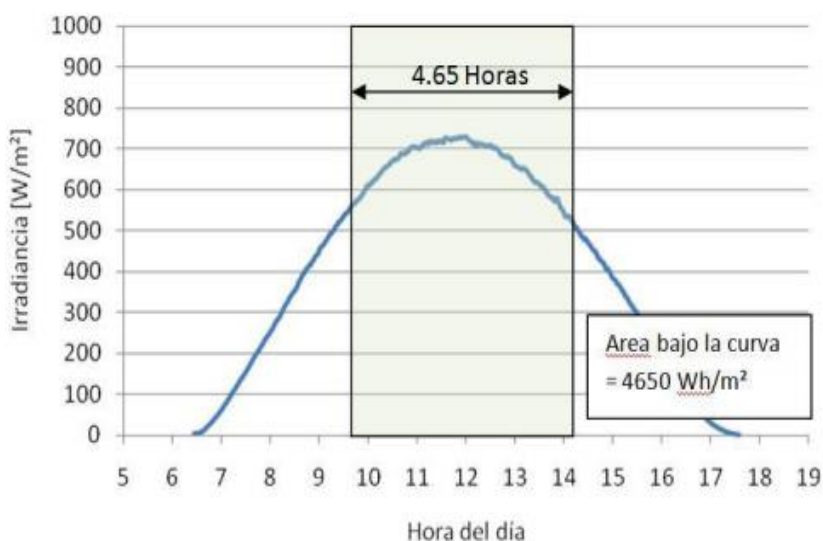


Figura 4. Representación de horas pico.

Además de las condiciones atmosféricas y el movimiento de rotación de la tierra, existe otro factor que ocasiona variaciones en la irradiación solar a través del tiempo sobre un captador, el movimiento de traslación se refiere a la trayectoria elíptica que sigue la tierra alrededor del sol, responsable de las estaciones del año.

La irradiación solar promedio en México es de aproximadamente 5.7 kWh/m² por día, que es equivalente a 50 veces la generación anual de electricidad en México.

La radiación solar en Alemania, país líder en instalación de sistemas fotovoltaicos es de aproximadamente 3.2 kWh/m², el 56% de la radiación solar en México, lo que significa que el tamaño de un sistema fotovoltaico para generar la misma cantidad de energía que en México debe ser casi el 80% más grande.

2.1.2 INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

El instrumento de medición pirheliómetro, Figura 5, mide la energía que proviene directamente del sol, evitando la radiación difusa desde otras direcciones. Este instrumento debe ser orientado continuamente hacia el sol, como sensor se utiliza una placa negra, cuya temperatura, que se mide con un sistema de termopar, varía con la radiación solar directa que llega a la placa.



Figura 5. Pirheliómetro (<http://www.labsolar.utfsm.cl>, 2016).

2.1.3 INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL

El piranómetro es un instrumento de medición que permite evaluar toda la energía solar que llega a una superficie horizontal, incluyendo la radiación directa más la difusa, unas placas pintadas de blanco y de negro actúan como sensores, las placas negras se calientan más que las blancas, debido a que absorben más

radiación, mediante termopares se mide la diferencia de temperatura entre las placas blancas y negras, la cual es función de la radiación solar global.

Para evitar el enfriamiento producido por el viento y el efecto de la contaminación atmosférica sobre los sensores, éstos se aíslan mediante una cúpula de vidrio. Para medir la radiación difusa, se instala un sistema que evita la radiación solar directa sobre el sensor (ver Figura 6).



Figura 6. Piranómetro (Lado izq.) y Cúpula de vidrio (lado Der.) (<http://www.atmosfera.cl/>, 2016).

2.1.4 INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN GLOBAL E INFRARROJA

El instrumento de medición que permite evaluar toda la energía radiactiva que recibe una superficie se llama pirorradiómetro, e incluye la radiación solar global y la radiación infrarroja que viene de la atmósfera, la combinación de dos pirorradiómetros en un solo equipo de medición, con uno expuesto hacia arriba y el otro hacia la superficie, permite medir el balance neto radiactivo a nivel de superficie, Figura 7.

Los sensores son similares a los otros equipos de radiometría, los sensores se protegen mediante cúpulas de silicona, para evitar la condensación interior, se inflan con aire con bajo contenido de vapor de agua.

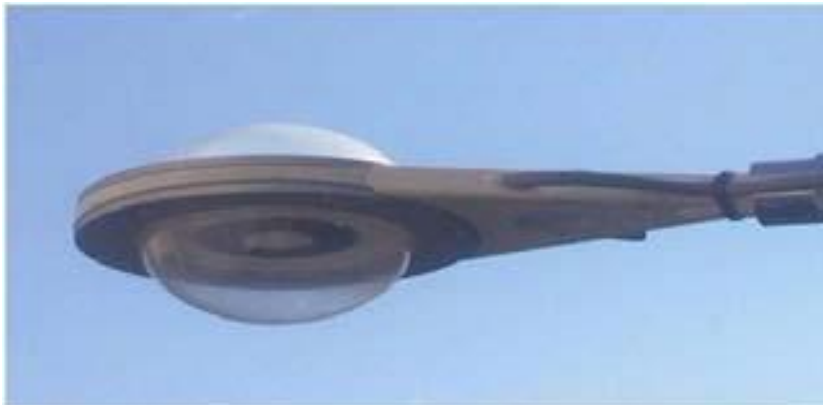


Figura 7. Radiómetro de flujo neto (<http://www.atmosfera.cl>, 2016).

2.1.5 IRRADIACIÓN

La potencia de la radiación solar, que se recibe en un instante dado sobre un captador de una superficie determinada, se le conoce como irradiación y se mide en unidades de W/m^2 .

Se sabe que la atmósfera terrestre está constituida por gases, nubes, vapor de agua, partículas contaminantes y sólidos en suspensión, que constituyen lo que se conoce comúnmente como masa de aire (AM), a medida que la luz solar la atraviesa, ésta sufre procesos como los anteriormente nombrados, pero que vale la pena recordar como son: absorción, reflexión y refracción, y lo que, en consecuencia hace que la irradiación disminuya su valor respecto de afuera de la atmósfera, bajo condiciones de atmósfera limpia, sin ningún proceso óptico y estando el Sol en el cenit, la irradiación máxima que un captador podría recibir es de $1,000 W/m^2$ como un valor promedio normalizado, para un día despejado, la componente recibida mayormente en el captador es la directa, mientras que en un día nublado, es la componente difusa, ya que la radiación directa es obstruida por las nubes.

A lo largo del día y bajo condiciones atmosféricas iguales, la irradiación recibida en un captador varía cada instante, presentando valores mínimos en el amanecer y atardecer, y adquiriendo valores máximos al mediodía, esto es, por ejemplo, que a las 10:00 a.m., el valor de la irradiación sea diferente y menor al que

se obtiene a las 12:00 p.m., ya que la distancia de la luz solar al mediodía es mínima. Lo anterior, se debe por efectos horarios y estacionales, Figura 8.

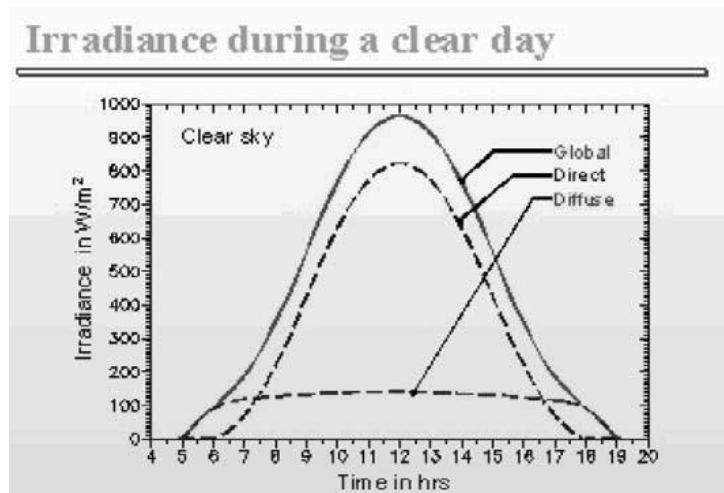


Figura 8. Irradiación durante un día despejado (www.ec.upc.es, 2016).

Con el fin de proporcionar un estándar en la industria fotovoltaica, los fabricantes de paneles han adoptado por definir una nueva unidad llamada SOL.

$$1 \text{ SOL} = 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = 100 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$$

Con este valor, se determina la máxima potencia eléctrica de salida de un panel fotovoltaico y, además, es de gran utilidad para comparar paneles de distintas procedencias.

2.1.6 INSOLACIÓN

Éste es otro concepto importante, el cual corresponde al valor acumulado de la irradiación en un tiempo dado, si el tiempo se mide en horas (h), la insolación tendrá unidades de Watts-hora por metro cuadrado (W-h/m^2). Generalmente, se reporta este valor como una acumulación de energía que puede ser horaria, diaria,

estacional o anual, la insolación también se expresa en términos de horas solares pico (HSP).

Una hora solar pico es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una irradiación promedio de $1,000 \text{ W/m}^2$, véase Figura 9. La energía que produce un arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación que recibe.



Figura 9. Irradiación y horas solares pico (Insolación). (<http://www.re.sandia.gov>, 2016)

2.2 POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DE LA SUPERFICIE CAPTADORA

La orientación correcta de los equipos fotovoltaicos es un asunto diferente, para cada latitud del sitio o lugar en que se deseen integrar este tipo de sistemas, para sacar el mayor provecho al equipo, es necesario, que tenga una dirección que vaya siguiendo la trayectoria del sol durante el día. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones existentes, esto no se puede cumplir, ya que la ubicación del o los paneles es de manera fija, por lo que la posición del equipo se encuentra sujeto a dos aspectos fundamentales:

- Orientación
- Inclinación

Los paneles solares alcanzan su máxima efectividad cuando están orientados hacia el sol, en un ángulo perpendicular con éste a mediodía, por lo general, los paneles solares son colocados sobre un techo o una estructura y tienen una posición fija que no pueden seguir la trayectoria del sol en el cielo, Figura 10.



Figura 10. Ilustración del movimiento del sol respecto a un panel fotovoltaico.

Respecto de la orientación del panel fotovoltaico, la orientación más eficiente será cuando su superficie de captación se encuentre dirigida hacia el norte, dado que permite aprovechar el mayor número de horas de sol, independientemente de la estación del año y de la latitud.

En aquellos casos en que dicha colocación no sea posible por condiciones constructivas como obstrucciones, sombras, etc., debe orientarse tratando de aprovechar el mayor número de horas de sol.

Es posible instalar seguidores solares con el objetivo de que los paneles estén colocados permanentemente en posición perpendicular al sol, sin embargo, esto involucra un mayor costo del proyecto, costos de mantenimiento y un mayor riesgo de fallas, por lo que su utilización debe ser a criterio del diseñador.

Para el caso de la orientación, en el hemisferio norte, debido a que el sol está inclinado la mayor parte del tiempo al sur, la orientación de los paneles fotovoltaicos debe ser al sur. Lo contrario sucede en el hemisferio sur.

De acuerdo con la inclinación del colector, es aquella que asegura la mayor captación de energía solar, lo que depende igualmente de dos factores:

- Latitud del lugar de emplazamiento.
- Período de utilización durante el año.

Algunos fabricantes, recomiendan que se debe encontrar el punto de producción adecuada en el invierno, con lo que se logrará una generación óptima el resto del año, el ángulo de inclinación es medido entre el panel solar y el plano horizontal. Los paneles deben colocarse en posición horizontal únicamente en zonas cercanas al ecuador.

2.3. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.3.1 FENÓMENO FOTOVOLTAICO

Es el proceso mediante el cual se convierte la luz radiante en energía eléctrica, existen ciertos materiales, que al absorber un determinado tipo de radiación electromagnética generan en su interior pares de cargas positivas y negativas, si la radiación electromagnética es la solar, y el material es un semiconductor tal como el silicio (Si), los pares de carga son electrones (e-) y huecos (h+) que una vez producidos se mueven aleatoriamente en el volumen de un sólido.

Si no hay ningún condicionante externo ni interno, las cargas de signos opuestos se recombinan, neutralizándose mutuamente, por el contrario, si mediante algún procedimiento se crea en el interior del material un campo eléctrico permanente, las cargas positivas y negativas serán separadas por él, esta separación, conduce al establecimiento de una diferencia de potencial entre dos zonas del material, que si son conectadas entre sí mediante un circuito externo, al mismo tiempo que la radiación electromagnética incide sobre el material, darán origen a una corriente eléctrica que recorrerá el circuito externo, este fenómeno, se

conoce como efecto fotovoltaico y es el fundamento en el que se basan las celdas fotovoltaicas.

El campo eléctrico interno local, se crea siempre que se ponen en contacto un semiconductor tipo N con otro tipo P, es decir, donde existe una unión N-P.

El semiconductor tipo N, tiene un exceso de cargas negativas (electrones), mientras que el semiconductor tipo P, predominan las cargas positivas. El espacio que existe entre ambas zonas, se llama juntura N-P, que a continuación se explica en más detalle.

2.4 UNIÓN N-P

El hecho de iluminar el silicio cristalino, puede liberar electrones dentro del enrejado cristalino, pero para que estos electrones sean útiles se deben separar y dirigir a un circuito eléctrico, para separar las cargas eléctricas, la celda solar de silicio debe tener un campo eléctrico interno incorporado, uno de los métodos más utilizados para producir este campo eléctrico interno, es la presencia de una unión dentro de un semiconductor, por lo general, esta juntura puede ser el resultado de un semiconductor de cristal simple, con una región tipo P y una región tipo N, Figura 11.

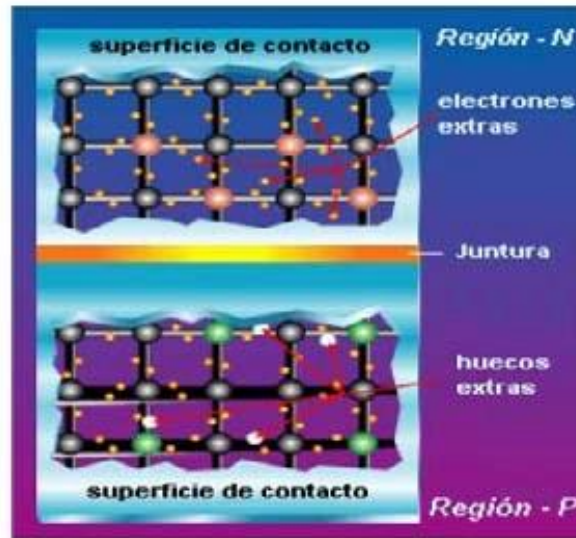


Figura 11. Unión N-P de una Celda Solar (<http://revistaurbanismo.uchile, 2016>).

La celda de Silicio es el tipo más común de celdas solares. Tiene dos regiones dentro del semiconductor: una región tipo P dopada con Boro, el cual tiene tres electrones de valencia (uno menos que el Silicio) provocando una región con alta concentración de huecos, la otra región tipo N se obtiene al dopar el Silicio con Fósforo, el cual tiene cinco electrones de valencia (uno más que el Silicio) provocando una región con alta concentración de electrones. La diferencia de concentración entre electrones y huecos, entre ambas regiones provoca un campo eléctrico permanente que se encarga de separar los electrones y huecos adicionales que aparecen cuando la celda es iluminada con la luz del sol.

Esta unión se mantiene en equilibrio al no existir luz incidente, luego cuando la luz incide sobre el semiconductor, gracias a la absorción de fotones, se liberan electrones del átomo de Silicio, se rompe el equilibrio de la unión N-P y se producen los denominados par “electrón-hueco”, de esta manera, se produce un campo eléctrico en la interfaz de la juntura que, al conectar una carga externa entre ambas zonas, genera la corriente eléctrica típica del fenómeno fotovoltaico y característica fundamental de las celdas solares.

En resumen, para que una celda solar expuesta al sol produzca energía eléctrica debe reunir las siguientes tres características fundamentales:

- a) Ser capaz de absorber una fracción importante de la radiación solar, para que la generación de pares electrón-hueco sea eficiente.
- b) Tener un campo eléctrico interno que separe las dos cargas impidiendo su posterior recombinación.
- c) Finalmente, las cargas separadas deben ser capaces de viajar a través de la oblea hasta los electrodos superficiales desde donde pasan al circuito exterior.

2.5 TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES

La evolución de la tecnología de las celdas solares ha experimentado importantes avances desde su invención, ha ido paralela en desarrollos y avances tecnológicos producidos en diferentes materiales para diferentes procesos.

Los dispositivos fotovoltaicos de aplicación a la conversión de la energía solar, deben construirse con materiales semiconductores sensibles a la radiación solar de forma que el efecto fotovoltaico se produzca de forma eficiente.

No, solamente, es preciso disponer de un semiconductor sensible a todas las longitudes de onda del espectro solar, sino que, además, debe ser posible fabricar en serie con él, uniones o heterouniones fotovoltaicamente eficientes y a un costo moderado, es claro que rendimiento y costo son los dos parámetros fundamentales del éxito de una tecnología.

En la actualidad, se encuentran altamente comercializadas las celdas de silicio monocristalino, silicio policristalino y silicio amorfo, Figura 12, este último, presenta todavía bajos niveles de eficiencias, por lo que su uso se ve restringido a lugares en los cuales no existan restricciones con respecto al área de colección o circuitos de baja potencia, como calculadoras de bolsillo.



Figura 12. Granos de Silicio Monocristalino y Policristalino (<http://www2.ing.puc.cl>, 2016).

Las celdas de silicio monocristalino están formadas por una estructura cristalina uniforme; en cambio, las celdas de silicio policristalino están formadas por pequeñas estructuras ubicadas arbitrariamente, estos granos hacen que la estructura no sea uniforme y se obtenga una eficiencia menor

2.5.1 CELDAS DE SILICIO MONO Y POLICRISTALINO

Para fabricar las celdas solares, el silicio es purificado, fundido y cristalizado ya sea en lingotes o en láminas delgadas; posteriormente, el silicio es rebanado en obleas delgadas para formar las celdas individuales, posteriormente las obleas se pulen por ambas caras, durante el proceso de corte y pulido se desperdicia casi la mitad del material original, una vez pulidas las obleas se introduce por difusión a alta temperatura el material, típicamente boro y fósforo, con lo cual se convierte a la oblea en un semiconductor tipo P si se le añadió boro, o tipo N si se añadió fósforo, la mayoría de las celdas fotovoltaicas producen un voltaje de aproximadamente 0.5 V, independientemente del área superficial de la celda; sin embargo, mientras mayor sea la superficie de la celda mayor será la corriente que entregará.

Este tipo de celdas solares, las de silicio mono y policristalino, son las más producidas industrialmente, en las figuras siguientes, Figura 13 y Figura 14, se muestran algunos módulos de silicio, monocristalino y policristalino, en donde se

puede apreciar el color azul característico del silicio dopado del módulo multicristalino y el color más oscuro del silicio monocristalino.



Figura 13. Módulo de celdas solares de Silicio Monocristalino. (<http://www.siemenssolar.com>, 2016)



Figura 14. Módulo de celdas solares de Silicio Multicristalino. (<http://www.inelsacontrols.com>, 2016)

2.5.2 CELDAS DE SILICIO AMORFO

La palabra amorfo significa carencia de estructura geométrica, los átomos de silicio que forman al sólido no tienen el patrón ordenado característico de los cristales como es el caso de las celdas anteriormente nombradas.

La obtención de celdas solares de bajo costo que puedan ser producidas masivamente sin que se produzca escasez de las materias primas necesarias. Éste ha sido el objetivo del desarrollo de la tecnología de las celdas solares de silicio amorfo; sin embargo, hay algunos inconvenientes que han contenido la penetración en el mercado de los módulos fotovoltaicos amorfos, como es el caso del bajo

rendimiento de conversión fotovoltaico que tienen respecto de las otras celdas de silicio mono y policristalino.

El silicio, utilizado en la fabricación de las estas celdas, se obtiene a partir de elementos como arena o cuarzo, los cuales se presentan en la naturaleza con altos grados de impurezas, por este motivo es necesario procesarlos para obtener un silicio con propiedades de semiconductor y así lograr celdas de alta eficiencia.

Es importante, destacar que el silicio es el segundo elemento más abundante en la superficie terrestre, luego del oxígeno. A continuación, en la Tabla 1, se presenta un resumen de las principales ventajas y desventajas de la tecnología fotovoltaica de los tres tipos de celdas antes descritas.

Tabla 1. Resumen de las Tecnología Fotovoltaica.

TIPO DE CELDA	EFICIENCIA (%)	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Silicio Monocristalino	12 a 14	• Tecnología bien desarrollada y probada	• Emplea mucho material caro
		• Estable	• Mucho desperdicio (casi la mitad)
		• Mayor eficiencia	• Manufactura costosa
		• Se fabrica en celdas	
Silicio Policristalino	11 a 13	• Tecnología bien desarrollada y probada	• Material Costoso
		• Estable	• Mucho desperdicio
		• Buena eficiencia	• Manufactura costosa
		• Celdas Cuadradas	• Menor eficiencia que el monocristal
Silicio Amorfo o Película Delgada	4 a 8	• Utiliza muy poco material	• Degradación pronunciada
		• Alto potencial y producción muy rápida	• Menor eficiencia
		• Costo bajo, 50% del silicio cristalino	• Menor durabilidad
		• Menos afectado por bajos niveles de	

2.6 SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

En esta sección se da a conocer los diferentes componentes que conforman un sistema típico de bombeo fotovoltaico, en donde se describirán, cada uno de los elementos que configuran este sistema. En la Figura 15, se muestra la configuración típica de bombeo fotovoltaico, para dar una idea de los elementos que interfieren en dicho sistema.

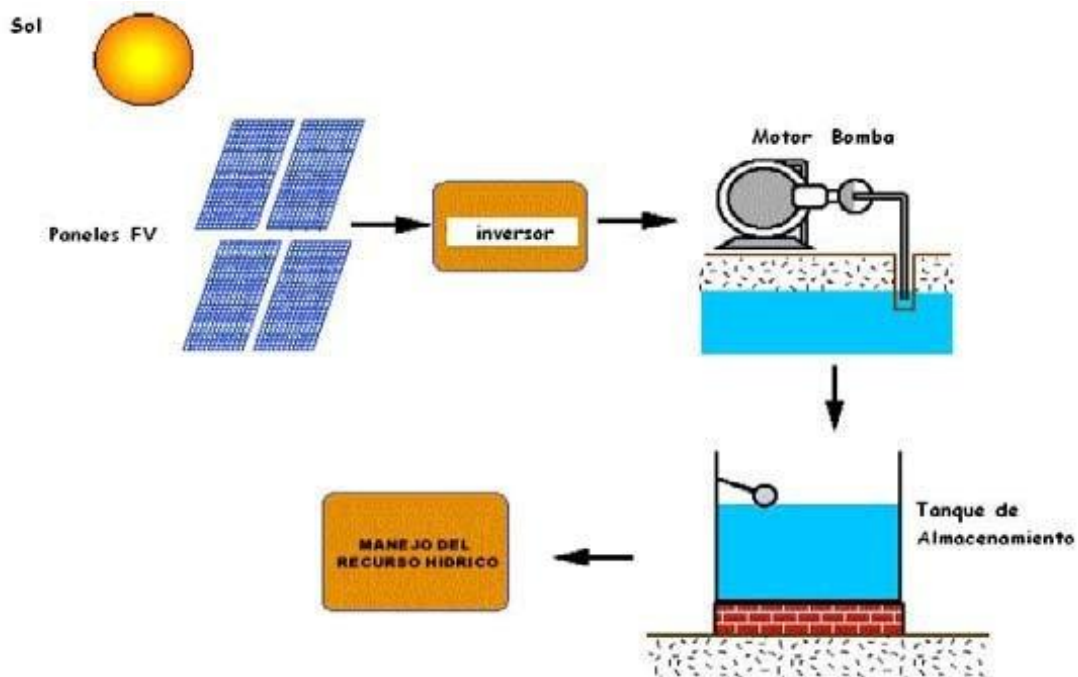


Figura 15. Diagrama típico de un sistema fotovoltaico para bombeo de agua.

2.6.1 PANEL FOTOVOLTAICO (PF)

Uno de los principales componentes, por no decir el más importante en este tipo de instalaciones, es el módulo o panel fotovoltaico (PF), Figura 16. Éste corresponde al corazón del sistema, si éste falla no podrán funcionar de manera correcta ninguno de los otros componentes, por lo que no se podrá hacer llegar energía a las cargas conectadas al sistema.

Los módulos solares fotovoltaicos se construyen para una vida útil al menos de 20 años. Entre las causas principales de las fallas de los módulos son: la rotura de las celdas, la delaminación del encapsulante que permite la entrada de la humedad y la rotura de las interconexiones de las celdas.

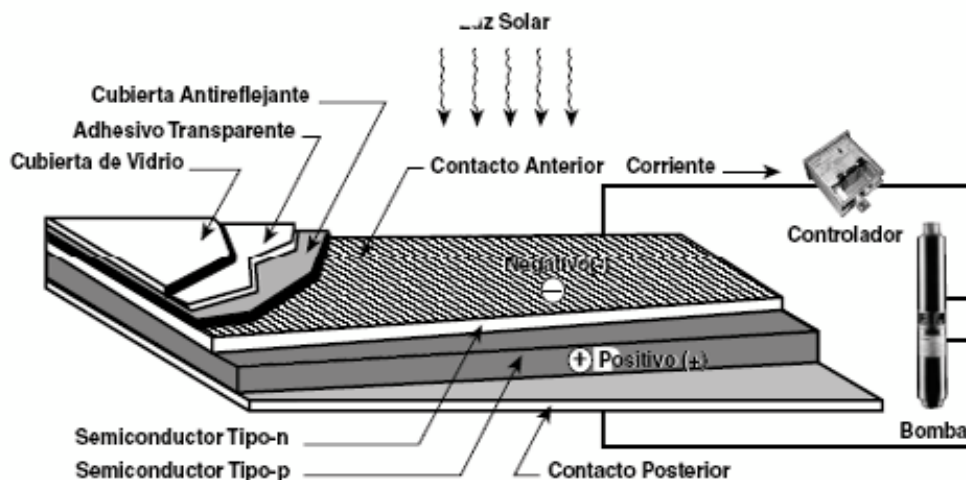


Figura 16. Detalle de un panel fotovoltaico (~~¡Error! Referencia de hipervínculo no válida..~~)

Los paneles solares, independiente de la tecnología de fabricación, se caracterizan mediante la curva I-V, que suele quedar definida por la tensión a circuito abierto (V_{OC}), por la intensidad de cortocircuito (I_{SC}), y por la potencia máxima o potencia pico ($P_{m\acute{a}x}$), todos ellos referidos generalmente a condiciones estándares, las cuales son:

- Irradiación: 1000 W/m^2
- Temperatura normal de incidencia en la celda: $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Distribución espectral: AM 1.5

Bajo estas condiciones, las siguientes cantidades son medibles: la potencia máxima $P_{m\acute{a}x}$ entregada por el módulo, la corriente de cortocircuito (I_{SC}) y el voltaje de circuito abierto (V_{OC}).

En la siguiente Figura 17, se puede apreciar una curva característica I-V (Corriente v/s Voltaje) de un panel Fotovoltaico.

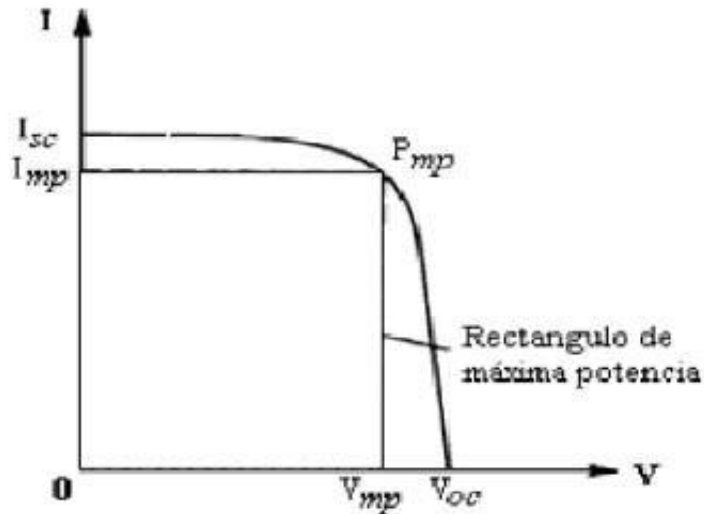


Figura 17. Curva característica I-V.

En las celdas se debe apreciar cierta información eléctrica en donde se incluirán los siguientes aspectos:

- Polaridad de los terminales o bornes de salida.
- Poder de corte del dispositivo de sobre intensidad para la protección del módulo.
- Tensión a circuito abierto.
- Tensión de funcionamiento.
- Corriente de funcionamiento.
- Corriente de cortocircuito.
- Potencia máxima.

2.6.1.1 POTENCIA MÁXIMA

Corresponde al máximo rectángulo que puede inscribirse al interior de la curva I - V, la que representa la potencia máxima que puede generar una celda solar. Este punto, denominado P_{mp} se obtiene del producto de V_{mp} e I_{mp} y viene dado por la ecuación (1):

$$P_{mp} = V_{mp} * I_{mp} \quad (1)$$

2.6.1.2 EFICIENCIA PANELES SOLARES

Se define el rendimiento o eficiencia (η) de un panel solar, como el cociente entre la potencia máxima que puede dar a la carga y la potencia luminosa recibida por la celda y se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{P_1} \quad (2)$$

P_1 : Potencia recibida por la celda.

2.6.1.2 FACTOR DE FORMA O FACTOR DE LLENADO

Este factor se define como el cociente entre la potencia máxima que la celda solar puede dar a la carga y la potencia teórica máxima definida por el punto (I_{sc} , V_{oc}): lo anterior, se puede apreciar de manera gráfica en la Figura 18, donde se pueden ver las diferencias entre ambos rectángulos:

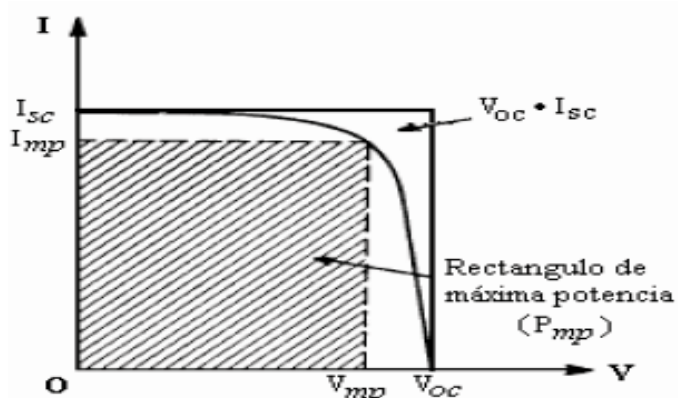


Figura 18. Factor de forma o de llenado.

El factor de forma viene dado por la siguiente ecuación:

$$FF = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (3)$$

2.6.1.3 FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

El rendimiento de un panel fotovoltaico, viene limitado por diferentes factores, dentro de los cuales se pueden destacar los siguientes:

- **ENERGÍA DE LOS FOTONES INCIDENTES**

Para generar los pares e- y h+, es necesario que los fotones que llegan a la celda tengan una determinada energía, en la radiación solar, una parte de los fotones incidentes no tienen energía, por lo que se pierden, y otros tienen una energía mayor, por lo que se pierde ese exceso. Un 50% de la energía incidente se pierde por éste motivo.

- **PÉRDIDAS POR REFLEXIÓN PARCIAL**

Parte de la luz que incide sobre la celda, es reflejada por la superficie de ésta, por lo que se pierde (se perdería un 30%). Para evitar esta pérdida en la fabricación de las celdas, se emplean capas anti reflectantes y superficies rugosas (con estas capas las pérdidas quedan en aproximadamente 10%).

- **PÉRDIDAS POR EFECTO DE LA SOMBRA**

Las pérdidas por el efecto de la sombra, son un factor que afecta notablemente el desempeño de las celdas solares y, en especial, a los módulos con celdas en serie, es el efecto del sombreado parcial o total, es por ello que se tiene que evitar que llegue sombra al panel fotovoltaico.

Por ejemplo, una celda que se encuentra en serie con otras celdas y que es sombreada, no logra generar la misma corriente que sus similares, y, por lo tanto, no deja pasar el flujo de corriente y el módulo completo se ve afectado de la misma manera que la celda individual. Incluso, esta celda en vez de generar potencia, comienza a disipar potencia en forma de calor, por lo cual incrementa su

temperatura, y puede incluso, llevar a su destrucción y en el peor de los casos del módulo completo.

- **EFEECTO DE LA TEMPERATURA**

Otro factor que influye en el rendimiento de los módulos, es la temperatura de operación de las celdas, por un lado, la corriente aumenta con la temperatura, pero el voltaje disminuye en un porcentaje mayor y, por lo tanto, la potencia de generación también disminuye al aumentar la temperatura. En la Figura 19, se puede apreciar de manera gráfica, el efecto que produce la temperatura sobre la producción de corriente en el módulo.

La potencia nominal se reduce, aproximadamente, 0.5% por cada grado centígrado por encima de 25 °C, esta conducta, responde al hecho de que los fotones de la luz solar transmiten su energía directamente a los electrones, sin un paso térmico intermedio.

Una demostración de esto, se puede ver con la instalación de celdas solares en el Polo Sur, no sólo funcionan, sino que, además, liberan más energía de la esperada.

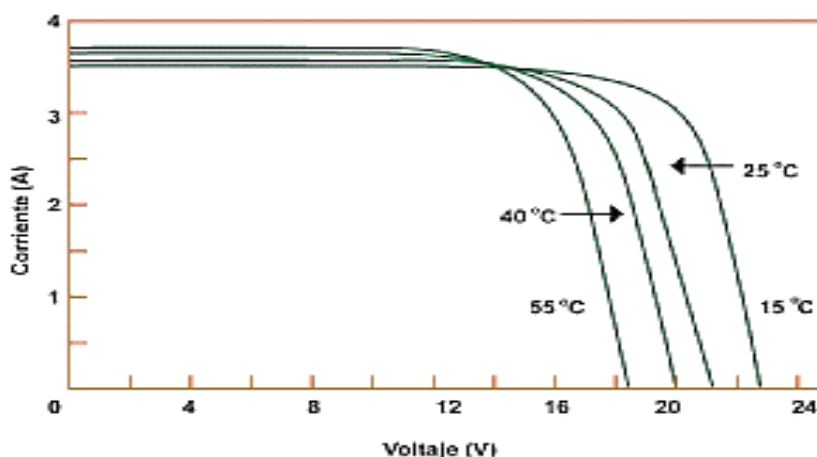


Figura 19. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación, considerando una irradiancia de 1,000 W/m²) (<http://www.re.sandia.gov>, 2016)

2.6.2 MOTORES

Los motores son los encargados de transformar la energía proveniente del sol, la cual ha sido captada por los paneles fotovoltaicos, en energía mecánica, los motores que se ocupan, generalmente, en aplicaciones de bombeo fotovoltaico son de pequeña potencia y deben tener rendimientos elevados.

La selección de un motor depende de la eficiencia, disponibilidad, confiabilidad y costos, dependiendo del tipo de alimentación eléctrica los motores que se utilizan en aplicaciones fotovoltaicas son de dos tipos: motores de corriente continua (CC) y motores de corriente alterna (CA).

Dentro de los motores de corriente continua se puede distinguir, entre motores de imanes permanentes con escobillas y sin escobillas, de la misma manera, para motores de corriente alterna podemos distinguir entre motores monofásicos y motores trifásicos en función del tipo de corriente para el que estén diseñados.

Los motores de corriente continua se caracterizan por su voltaje, potencia, y velocidades nominales, la potencia que puede desarrollar un motor es proporcional al motor y a su velocidad.

Por su parte, dentro de las principales ventajas que caracterizan a este tipo de motores, es que no necesitan un inversor, ya que los paneles fotovoltaicos proporcionan potencia en corriente continua, por lo que se adaptan bien para su acoplamiento directo al generador fotovoltaico.

En general, los motores de CC son más costosos que los motores de CA y son difíciles de encontrarlos en grandes potencias.

Por su parte, el motor de corriente alterna está más extendido en su uso, siendo más fácil encontrarlos en potencias mayores, son más baratos y eficientes que los de corriente continua, pero la desventaja que presenta este tipo de motores es que obligan a la instalación de un sistema inversor que cambie la CC proveniente del arreglo fotovoltaico en CA.

2.6.3 EQUIPO DE BOMBEO

Las bombas comunes disponibles en el mercado han sido diseñadas pensando en una fuente de potencia constante, en los sistemas fotovoltaicos la potencia que proporcionan los módulos es directamente proporcional a la disponibilidad de la radiación solar, es por ello que la potencia generada por dichos módulos varía constantemente, y en consecuencia la potencia entregada a la bomba también.

Es por esta razón que han sido diseñadas algunas bombas especiales para la electricidad fotovoltaica, las cuales desde el punto de vista mecánico se agrupan en centrífugas y volumétricas.

2.6.4 INVERSOR

El aparato llamado inversor, o también conocido como convertidor u ondulator, tiene por función transformar la corriente eléctrica, conceptualmente, se trata de lograr una fuente de energía eléctrica de corriente alterna, desde una fuente de corriente continua, es decir, convertir la energía proporcionada por los paneles fotovoltaicos, la cual es corriente continua, en corriente alterna para de este modo poder alimentar el grupo motor-bomba, el cual trabaja con corriente alterna.

La corriente continua produce un flujo de corriente en una sola dirección, mientras que la corriente alterna cambia rápidamente la dirección del flujo de corriente de una parte a otra.

Un inversor CC-CA, está compuesto entre otros de unos transistores y tiristores capaces de cortar en un segundo muchas veces la corriente que recibe, consiguiendo simular el comportamiento de la corriente alterna, según el tipo de onda producido, los podemos clasificar en:

- Inversores de onda cuadrada
- Inversores de onda senoidal modificada

- Inversores de onda senoidal pura

En la primera clasificación, es decir, en los inversores de onda cuadrada, éstos funcionan haciendo pasar la corriente continua a través de un transformador, primero en una dirección y luego en otra, el dispositivo de conmutación que cambia la dirección de la corriente debe actuar con rapidez, como consecuencia, la dirección del flujo de corriente a través de la cara primaria del transformador cambia muy bruscamente, de manera que la forma de onda del secundario es cuadrada, la cual se representa en la Figura 20.

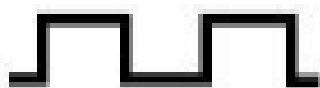


Figura 20. Forma de onda cuadrada.

Los inversores de onda cuadrada son más baratos, pero normalmente son también los menos eficientes, no son aptos para motores de inducción, son aptos para alimentar un televisor, un ordenador o un aparato eléctrico pequeño.

En los Inversores de onda senoidal modificada, el ancho de la onda es modificada para acercarla lo más posible a una onda senoidal, la salida no es todavía una auténtica onda senoidal, pero está bastante próxima, el contenido de armónicos es menor que en la onda cuadrada, en la Figura 21, se aprecia el tipo de onda al cual se hace alusión.

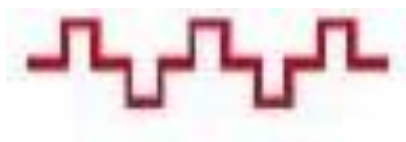


Figura 21. Forma de onda senoidal modificada.

Por último, en los Inversores de onda senoidal pura, Figura 22, en los cuales se utiliza una electrónica más elaborada se puede conseguir una onda senoidal pura con una eficiencia del 90% o más, dependiendo de la potencia, la incorporación de

microprocesadores de última generación permite aumentar las prestaciones de los inversores, este tipo de inversor se utiliza en instalaciones con alta exigencia de calidad de onda, para motores de inducción y sofisticados aparatos que requieren una forma de onda senoidal pura, es por ello que el costo de estos inversores resulta mayor que los otros dos tipos de inversores.



Figura 22. Forma de onda senoidal pura.

Los inversores deben dimensionarse de dos formas, la primera es considerando los watts de potencia eléctrica que el inversor puede suministrar durante su funcionamiento normal de forma continua, los inversores son menos eficientes cuando se utilizan a un porcentaje bajo de su capacidad.

Por esta razón no es conveniente sobredimensionarlos, deben ser elegidos con una potencia lo más cercana posible a la de la carga de consumo, la segunda forma de dimensionar el inversor es mediante la potencia de arranque.

Algunos inversores pueden suministrar más de su capacidad nominal durante períodos cortos de tiempo, esta capacidad es importante, cuando se utilizan motores u otras cargas que requieran de más potencia, para arrancar que para permanecer en marcha una vez que han arrancado (motores de inducción, lámparas de gran potencia).

2.6.5 BATERÍAS

Las baterías o los acumuladores son dispositivos que almacenan energía eléctrica, el acumulador de Pb-ácido tiene numerosas aplicaciones, pero se verá el uso de las baterías para automotores y principalmente el de las baterías para sistemas fotovoltaicos (baterías solares), como la diferencia en el costo de estas dos

versiones es apreciable, existe siempre la tentación de usar la batería más económica (automotor) en un sistema fotovoltaico.

Para apreciar porque una batería solar representa la solución más adecuada, se explicará las diferencias entre las dos, el modelo de batería usado en los automotores está diseñado para sostener corrientes elevadas (200 a 350 A) por muy breves instantes (segundos) durante el arranque del motor, el resto del tiempo la batería está siendo cargada o permanece inactiva, la batería de un sistema solar, por el contrario, debe ser capaz de sostener corrientes moderadas (una decena de amperes), durante horas.

Además, en muchas aplicaciones, deberá permanecer activa sin recibir carga alguna (servicio nocturno), normalmente, los períodos de reposo son nulos, ya que está siendo cargada o descargada.

Dos características que identifican a una batería solar son: la mayor profundidad de descarga (PD) y un alto valor para el ciclaje, la batería de automotor está diseñada para soportar una leve PD.

Las baterías cumplen varias funciones en los sistemas fotovoltaicas, las baterías sirven para almacenar la energía eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos para ser usada por la noche, permitir la operación de las cargas durante períodos de poco sol, estabilizar el voltaje del sistema.

El intervalo que incluye un período de carga y uno de descarga, recibe el nombre de ciclo, idealmente, las baterías se recargan al 100% de su capacidad durante el período de carga de cada ciclo, si existe un controlador, las baterías no se descargarán totalmente durante el ciclo, de igual manera no corren el peligro de sobrecargarse durante períodos de poco uso.

Sin embargo, el uso de baterías tiene desventajas significativas, de hecho, se recomienda no utilizar baterías cuando se es posible acoplar la carga directamente al arreglo fotovoltaico y, por supuesto, cuando no se necesita almacenamiento.

Las baterías aumentan el costo del sistema, ya que implican la incorporación de otros dispositivos, como por ejemplo los controladores de carga, además el uso de baterías aumenta los requisitos de mantenimiento, disminuye el rendimiento del sistema debido a la pérdida de capacidad y, representan un riesgo potencial de causa de accidentes y de contaminación.

Debido a estas razones, resulta más conveniente la utilización de sistemas de bombeo directo en los que no se utilizan baterías, y en los que los módulos fotovoltaicos se conectan directamente a un grupo motor-bomba de corriente continua, o a través del uso de un inversor con un grupo motor-bomba de corriente alterna, y en reemplazo de las baterías, utilizar un tanque de almacenamiento para aquellos días donde no se disponga de un recurso solar óptimo para hacer funcionar el sistema de bombeo fotovoltaico.

2.7 RIEGO POR GOTEO

El sistema de riego por goteo o también conocido como localizado, es un sistema de riego mecanizado a presión, que permite aplicar agua gota a gota sobre la superficie del suelo en el que se desarrolla el sistema radicular de la planta, provocando un humedecimiento limitado y localizado, el agua se vierte en pequeños volúmenes por unidad de tiempo y a baja presión mediante emisores o goteros insertados en una tubería lateral de distribución, los cuales son absorbidos por las raíces de la planta, aprovechándose prácticamente en su totalidad.

A diferencia del riego tradicional y de aspersion, aquí el agua se conduce desde el depósito o la fuente de abastecimiento a través de tuberías y en su destino se libera gota a gota justo en el lugar donde se ubica la planta, el agua se infiltra en el suelo produciendo una zona húmeda restringida a un espacio concreto.

Por consiguiente, no se moja todo el suelo sino parte del mismo, y sólo en la parte necesaria para el desarrollo de las raíces, la parte húmeda varía, según las características del suelo, la cantidad de agua y el tiempo que se haga durar ese

constante goteo, como consecuencia, al acotar la superficie humedecida, las raíces limitan su expansión a ese espacio y no a otro, otra característica, de riego, es el mayor aprovechamiento de la tierra por el alto grado de eficiencia que tiene este tipo de riego.

Las principales ventajas del sistema de riego por goteo son las siguientes:

- La eficiencia del riego por goteo es muy alta de un 90 a 95% y la distribución del agua es muy uniforme.
- Un alto ahorro de 40 y 60% de agua respecto a los sistemas tradicionales de riego.
- Reducción significativa en mano de obra, así como también en vigilancia del riego.
- Incremento de la Producción de cultivo.
- Con este sistema se puede regar muy adecuadamente con pequeñas cantidades de agua, de tal manera que el suelo este siempre húmedo.
- Se ajustan intervalos entre riegos de acuerdo a las condiciones del suelo y del cultivo.
- Se aplica agua exactamente a las raíces del cultivo, por lo tanto, se evita mojar atrás áreas del terreno, evitando inundaciones.
- Es posible realizar otras actividades agrícolas en el predio durante el riego.
- Este método dosifica su caudal, realizándolo gota a gota, de acuerdo a las necesidades del cultivo, así minimiza las pérdidas de evaporación.

Las principales desventajas del riego por goteo son las siguientes:

- Mal ubicación del sistema de riego en el cultivo o en sus raíces.
- Mal programación en diferentes intervalos de riego.
- Taponamiento en el sistema de riego.
- Complejidad en las instalaciones del invernadero

2.7.1 ELEMENTOS BÁSICOS QUE COMPONEN UN EQUIPO DE RIEGO POR GOTEO

Los elementos básicos que componen un sistema de riego por goteo a continuación se describen. En la Figura 23 se aprecia el esquema general de mismo.

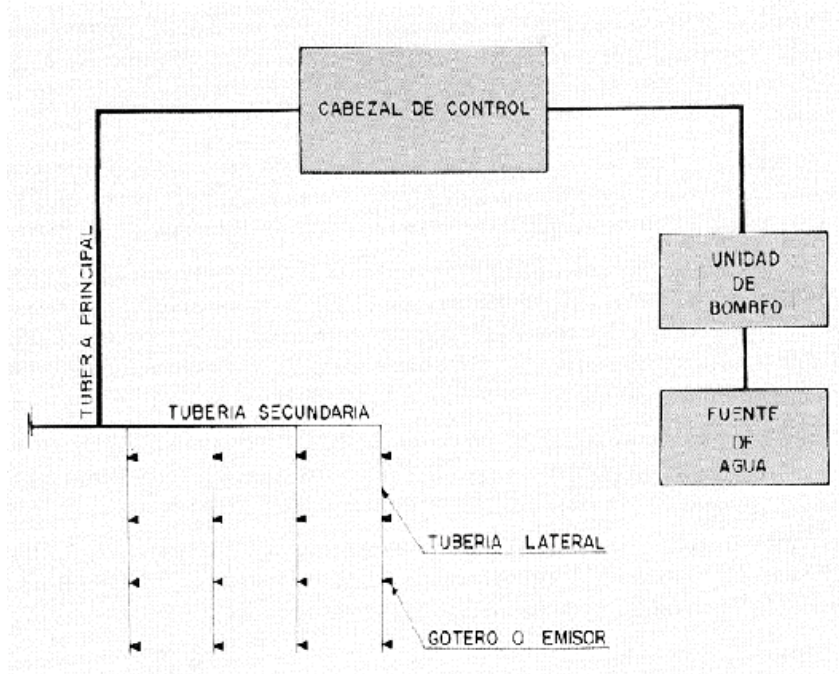


Figura 23. Esquema general de un sistema de riego por goteo (Bustamante, J. 1996).

- **UNIDAD DE BOMBEO**

La unidad de bombeo de un sistema de riego por goteo, es una instalación con equipos de elevación mecánica, que tiene por objeto aspirar desde la fuente de agua elegida, e impulsarla a presión al cabezal de control de tuberías, normalmente la unidad de bombeo se ubica junto a la fuente de energía disponible.

- **EQUIPOS DE FILTRACIÓN**

El equipo de filtración, resulta imprescindible para filtrar las aguas que provengan de los ríos, ya que estos pueden tener ciertas partículas que pueden

hacer que los goteros se obstruyan, de modo, que todo el sistema falle a causa de algún elemento extraño, es fundamental que garanticemos la limpieza de las aguas.

Existen muchos sistemas de filtración y evidentemente todos tratan de conseguir la limpieza del agua de partículas extrañas, filtros de arena y gravas, de mallas, sistemas fundados en la decantación, con sistemas automatizados o no, todos ellos pueden resultar válidos si forman parte de garantizar la mínima obstrucción posible, ya que de ella depende la eficacia del sistema.

- **RED DE TUBERÍAS**

La red de tuberías constituye el sistema de distribución del agua, la red de distribución la componen tuberías principales, secundarias y laterales, las tuberías principales y secundarias se colocan enterradas y las tuberías laterales se instalan sobre la superficie del terreno.

La tubería principal presenta puntos de derivación a través de válvulas de corta, por los cuales se une con las tuberías secundarias, el material de las tuberías secundarias es comúnmente el PVC rígido.

A las tuberías secundarias se conectan las tuberías laterales, que se colocan a lo largo de las hileras del cultivo y son las que llevan insertados los goteros, a intervalos fijos, las tuberías laterales son, por lo general, de polietileno y su diámetro varía entre 12 mm y 20mm.

El hecho de que hoy exista el PVC, y otros derivados del petróleo, han facilitado y ayudado a la difusión de este sistema por sus ventajas de transporte, su facilidad en el corte y en el pegado y al mismo tiempo la dureza y resistencia ante los cambios de temperatura han hecho que el fibrocemento se deje sólo para las redes principales de grandes cultivos.

El esparcimiento de las tuberías laterales, está en función de las distancias de plantación y puede instalarse una o más tuberías laterales por hilera, las piezas especiales de la red de tuberías consisten en tees, reducciones, curvas, etcétera,

que se utilizan para derivar o unir tuberías, las características de estas piezas dependen del tipo de tubería en la cual deben ser incorporadas.

- **GOTEROS O EMISORES**

Los goteros o emisores, son elementos cuya misión no es otra que la de aplicar el agua proveniente de la red de tuberías al suelo a regar, de manera lenta y uniforme según los caudales proyectados, existen de diversas clases y modalidades, pero todos ellos han de reunir al final las condiciones de regular el caudal adecuadamente, y tener el orificio del tamaño adecuado para que se eviten las obstrucciones que constituyen el principal problema de esta modalidad de riego, el caudal o gasto normal de estos elementos varía entre 1 y 10 l/h, dependiendo de las medidas de paso de agua del goteo.

En la práctica, los goteros se estructuran y diseñan especialmente para reducir la presión de salida del agua a cero, mediante el paso de la misma por laberintos simétricamente irregulares o perforaciones pequeñas, donde las pérdidas de carga por fricción son considerables, los tipos de goteros más utilizados son los siguientes: goteros de laberinto en línea, goteros de botón con laberinto y goteros de botón auto compensados o autorregulados.

Los goteros de laberinto, Figura 24, se caracterizan por tener una estructura interna de laberinto que provoca un régimen turbulento en el flujo del agua.

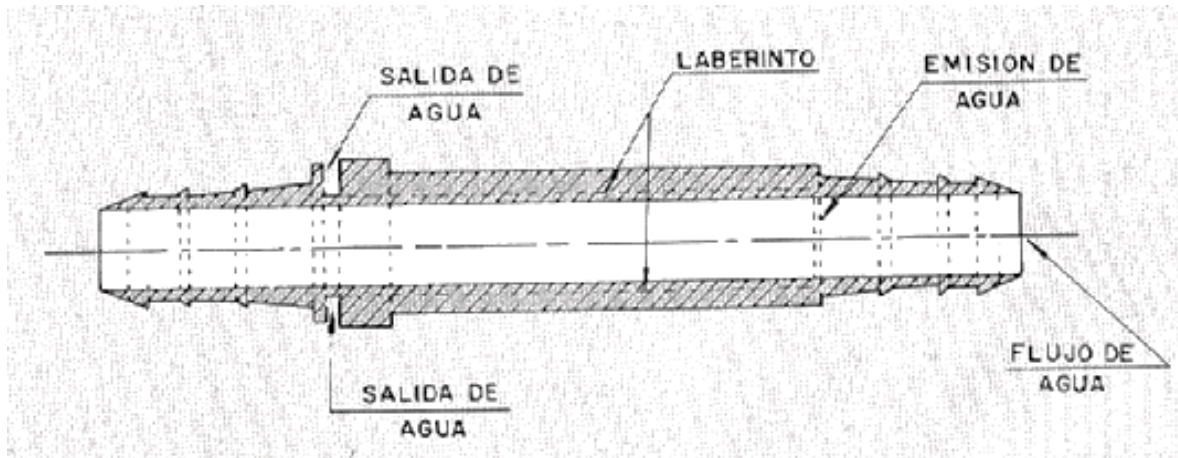


Figura 24. Gotero de laberinto en línea.

(Bustamante, J.1996) El espaciamiento de los goteros en la tubería lateral, depende de las distancias de plantación, del tipo y textura del suelo, y del desarrollo del sistema radicular del cultivo.

2.7 SISTEMA DE RIEGO CON ENERGÍA SOLAR

Los sistemas de bombeo fotovoltaico para riego alimentados por medio de energía fotovoltaica presentan características que los hacen muy atractivos: son pequeños y confiables, no consumen combustible, no contaminan y sus gastos de mantenimiento son mínimos, por mencionar algunos.

De esta manera, el bombeo de agua mediante energía fotovoltaica cobra su mayor fuerza, al aprovechar la gran disponibilidad del recurso solar con que cuenta nuestra región, Figura 25, para el riego de pequeños predios ubicados en la zona, la cual es una tecnología no bien aprovechada por el país.



Figura 25. Ubicación de Tecamachalco, Puebla.

Los sistemas activados por el sol, representan una solución costeable para muchos usuarios alejados de fuentes convencionales de energía eléctrica, por ser de costo inicial elevado. Dichos sistemas solares, tienen algunas ventajas y desventajas que se deben tener en consideración a la hora del diseño del sistema, Tabla 1 Tabla 2.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los sistemas solares.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No consumen combustible	Inversión Inicial relativamente Alta
Larga vida útil (de 15 a 20 años)	Acceso a Servicio Técnico Limitado
Impacto Ambiental Mínimo	Producción de agua variable

Bajos costos de Operación y Mantenimiento	dependiendo de las condiciones meteorológicas
--	--

Un buen diseño, está directamente relacionado con el conocimiento de las condiciones y recursos reales del sitio, donde se pretende instalar este tipo de sistema fotovoltaico.

2.8 CÁLCULO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El procedimiento de diseño para los sistemas de bombeo solar, se basa en aspectos de necesidades de demanda energéticas, más las necesidades propias de los cultivos, la energía que es posible captar mediante los paneles fotovoltaicos, teniendo presente todas las condicionantes que afectan la captación de la energía solar.

En la determinación de los requerimientos de agua, se deben tener en consideración aspectos fundamentales para el correcto y debido crecimiento del cultivo, para no afectar el desarrollo de éste, además, de un aspecto muy importante, ya que el tamaño y costo del sistema dependerá de la cantidad de agua requerida, es por ello que se tiene que tener sumo cuidado en el cálculo necesario para el cultivo, para no sobredimensionar y no estar elevando aún más los costos que significa emplazar este tipo de tecnología.

2.8 ARDUINO

El arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar.

Arduino puede “sentir” el entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos. El microcontrolador de la placa se programa usando el

Arduino Programming Language (basado en Wiring) y el Arduino Development Environment (basado en Processing). Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador (por ejemplo, con Flash, Processing, MaxMSP, etc.).

Las placas se pueden ensamblar a mano o encargarse preensambladas; el software se puede descargar gratuitamente. Los diseños de referencia del hardware (archivos CAD) están disponibles bajo licencia open-source, por lo que somos libres de adaptarlas a nuestras necesidades.

2.8.1 VENTAJAS DEL ARDUINO

Hay otros microcontroladores y plataformas microcontroladoras disponibles para computación física. Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard, y muchas otras ofertas de funcionalidad similar. Todas estas herramientas toman los desordenados detalles de la programación de microcontrolador y la encierran en un paquete fácil de usar. Arduino también simplifica el proceso de trabajo con microcontroladores, pero ofrece algunas ventajas para profesores, estudiantes y aficionados interesados sobre otros sistemas:

Barato: Las placas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas microcontroladoras. La versión menos cara del módulo Arduino puede ser ensamblada a mano, e incluso los módulos de Arduino preensamblados cuestan menos de \$50.

Multiplataforma: El software de Arduino se ejecuta en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. La mayoría de los sistemas microcontroladores están limitados a Windows.

Entorno de programación simple y claro: El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes, pero suficientemente flexible para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo también. Para profesores, está convenientemente basado en el entorno de programación Processing, de manera que

estudiantes aprendiendo a programar en ese entorno estarán familiarizados con el aspecto y la imagen de Arduino.

Código abierto y software extensible: El software Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ser expandido mediante librerías C++, y la gente que quiera entender los detalles técnicos pueden hacer el salto desde Arduino a la programación en lenguaje AVR C en el cual está basado. De forma similar, se puede añadir código AVR-C directamente en los programas Arduino.

Código abierto y hardware extensible: El Arduino está basado en microcontroladores ATMEGA8 y ATMEGA168 de Atmel. Los planos para los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que diseñadores experimentados de circuitos pueden hacer su propia versión del módulo, extendiéndolo y mejorándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión de la placa del módulo para entender cómo funciona y ahorrar dinero.

2.9 INVERNADERO

Los invernaderos son estructuras de diversas formas y tamaños que tienen la capacidad de generar condiciones de temperatura y humedad ideales para cultivar plantas durante el invierno, o en sectores donde las condiciones climáticas son muy adversas.

Las plantas y árboles necesitan de ciertas condiciones climáticas específicas para su cultivo, por ejemplo, el tomate no resiste de buena forma las heladas. Para cultivar este tipo de plantas en invierno, se puede utilizar pequeños invernaderos contruidos en nuestra casa, para lo cual, incluso podemos reutilizar materiales que tenemos sin usar (plástico, vidrios, maderas).

El invernadero es una estructura, habitualmente de manera semicilíndrica, que está protegida externamente por plástico o vidrio, de esta forma protege a las plantas del frío y la lluvia, ya que en su interior las condiciones climáticas son mucho más cálidas. La forma en que los invernaderos funcionan es muy sencilla, debido al plástico o vidrio que los recubre, tiene la capacidad de retener de mejor forma el calor en su interior.

Por lo tanto, las plantas que no toleran el frío o mucha agua de lluvia, pueden ser cultivadas en un invernadero, el cual tiene la capacidad de generar un pequeño microclima. La norma mexicana NMX-E-255-CNCP-2008, para invernaderos, detalla el diseño y especificaciones de construcción.

Capítulo III.

Implementación del

sistema de riego

En el presente capítulo se describen las etapas realizadas para el funcionamiento del sistema automatizado de riego por goteo por medio de energía solar para un invernadero, de aquí en adelante denominaremos: SAR, siglas de Sistema Automatizado de Riego. Las etapas de trabajo consistieron en: Análisis del sistema de riego tradicional (SRT), Diseño del SAR, Instalación del sistema de generación de energía fotovoltaica (SGEF), Puesta en marcha del SGEF, Diseño del sistema de control del SAR, Puesta en marcha del SAR en el invernadero y Costo del SAR implementado.

3.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La secuencia de trabajo consistió en las siguientes etapas:

3.1.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RIEGO TRADICIONAL, SRT

Primero se realizó una visita al invernadero de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco para conocer las partes que constituyen al sistema de riego tradicional (SRT), su funcionamiento y analizar las problemáticas con las que se contaba.

Debido al exceso de trabajo en el invernadero, así como de agua y combustible en el sistema de riego tradicional, es como se optó por realizar esta propuesta, la cual consiste en utilizar la energía fotovoltaica para hacer funcionar el SAR.

3.1.2 DISEÑO DEL SAR

Tomando en cuenta las necesidades que tenía el invernadero, caudal de agua, tiempo de uso y tipo de motobombas para el riego. Además de características en el cultivo de la fresa, como es cantidad de agua y frecuencia, de manera que se optó por emplear un sistema de riego acuerdo a lo mostrado en la Figura 26.

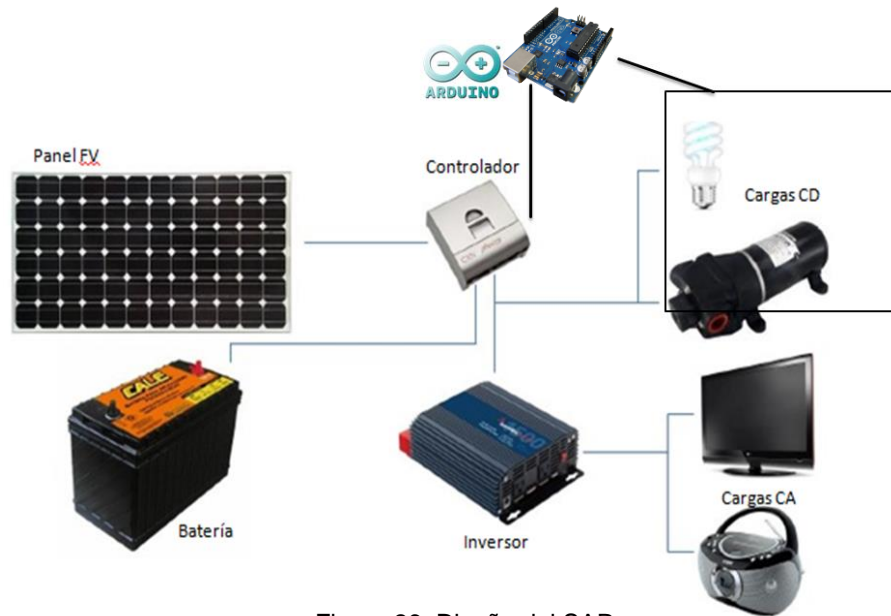


Figura 26. Diseño del SAR.

3.1.3 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA, SGEF

Una vez delimitado el SAR, se llevó a cabo la instalación de los componentes que proveerán de energía eléctrica al sistema. El SGEF consta de un panel fotovoltaico (PF), una estructura metálica, un regulador de voltaje, una batería, un inversor y la carga que es una bomba de $\frac{1}{2}$ HP. La instalación comenzó desde realizar la base metálica para el panel y los accesorios y se realizó teniendo en cuenta normas de seguridad, para evitar algún accidente, en especial contra el mismo equipo, ya que se emplea baja tensión en C.D.

3.1.4 PUESTA EN MARCHA DEL SGEF

En la puesta en marcha del SF, se realizaron las conexiones entre los componentes y se llevó al invernadero donde se realizaron las siguientes pruebas.

- Supervisión de la ubicación del SGEF, posición e inclinación.
- Medir el voltaje generado por el panel FV.
- La puesta en marcha de la bomba sin carga.
- La puesta en marcha de la bomba con carga provisional.

3.1.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL SAR

Se consideraron diferentes sistemas de control, pero debido a las ventajas, como bajo costo inicial y facilidad en la programación, se escogió al Arduino. Entre las actividades que se realizaron se tiene:

- Análisis del funcionamiento requerido del sistema de riego automatizado para realizar el riego a plantas de fresa.
- Selección de la tarjeta Arduino y el sensor de temperatura.
- Programación de la tarjeta Arduino para el sistema de bombeo, considerando la duración y número de ciclos de riego.

3.1.6 PUESTA EN MARCHA DEL SAR EN EL INVERNADERO

Considerando todos los componentes: alimentación, control y potencia, se realizaron las pruebas de puesta en marcha considerando los siguientes puntos:

- Comprobación del funcionamiento del sistema de fotovoltaico, alimentación energética correcta.
- Comprobación de funcionamiento del sistema de control, funcionamiento según programación realizada sin conectar carga.
- Conexión de la bomba al SAR, verificando que el riego de agua por goteo llegara a toda la extensión de la cinta.
- Verificar que la presión generada por la bomba fuera la adecuada para cubrir el total de la sección a regar.
- Comprobar el apagado correcto del sistema según funcionamiento automático.
- Verificar la independencia del sistema y autonomía de funcionamiento.

3.1.7 COSTO DEL SAR IMPLEMENTADO

El costo calculado, se realizó considerando los componentes que se adquirieron para implementar el SAR con un valor comercial minorista, sin considerar, tanto, la mano de obra necesaria para su instalación, como el diseño del sistema. Esto debido a que nosotros mismo lo llevamos a cabo y no podemos asignarles un costo. De igual manera, para el SRT, sólo se consideran los componentes y suponemos que los costos de diseño e instalación serían similares. Dejando en el análisis de viabilidad al costo corriente de los sistemas.

Capítulo IV. Resultados y Discusión

4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RIEGO TRADICIONAL, SRT

Los métodos tradicionales de riego se caracterizan por grandes fluctuaciones en el contenido de humedad del suelo, ya que altas cantidades de agua se aplican por largos intervalos de tiempo (www.smart-fertilizer.com, 2017). Estas fluctuaciones afectan el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos. En contraste, los sistemas de riego por goteo son capaces de suministrar pequeñas cantidades de agua a intervalos de alta frecuencia. Como resultado, el nivel de humedad en el suelo se mantiene relativamente constante.

Un rango óptimo de humedad en el suelo puede ser mantenido y manejado más fácilmente, ya que se aplica el agua en cantidades precisas, de acuerdo con las necesidades del cultivo. Esto promueve el ahorro del agua, así como mejora el crecimiento y la productividad del cultivo. Además, la humectación selectiva del suelo evita la evaporación del agua de las zonas fuera de la zona humedecida.

En la Figura 27, se observa la ubicación de los invernaderos de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco (en rojo). Mismos que se encuentran en una zona alejada y que no cuenta con energía eléctrica. Se les donomina invernadero 1, donde se cultiva principalmente jitomate y el Invernadero 2 donde se tiene plantada fresa, Figura 28.

De manera general, durante el recorrido por los invernaderos se observó lo siguiente: 1) las motobombas del sistema de riego son colocadas manualmente cada vez que se realiza un ciclo de riego, esto para evitar su robo al no contar con vigilancia; 2) hay un desperdicio de agua, debido al poco control en el riego que realizaban los alumnos designados a realizarlo; y 3) se requiere de gasolina para hacer funcionar las motobombas y su costo resulta la principal problemática para este sistema tradicional.



Figura 27. Ubicación de los invernaderos con respecto a la infraestructura de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco.



Figura 28. Cultivos de los invernaderos, 1) jitomate (Izq.) y 2) fresa (Der.).

4.1.1 SISTEMA UTILIZADO ACTUALMENTE

Para el sistema de riego que se realiza en ambos invernaderos se cuenta con dos tipos de motobombas de diferente potencia, una de 5 HP y otra de 3 HP, Figura 29 y Figura 30. La segunda motobomba es utilizada para el riego del cultivo de fresa, la cual, de acuerdo a la potencia de la misma, se encuentra desaprovechada ya que no se riega todo el invernadero al mismo tiempo, sino por secciones. Esto provoca que se mal gaste un cierto porcentaje de la gasolina empleada para hacer funcionar la motobomba, incrementando el costo de uso. Considerando esta condición, la propuesta podría resultar más rentable a largo plazo por el uso de esta tecnología ya que nuestra fuente es inagotable y, además, no depende de las fluctuaciones del precio de combustibles.

La operación del sistema de riego es manual, es decir, el operario inicia el funcionamiento y apagado de la motobomba al considerar que se ha llevado a cabo el riego. La hora de inicio del riego lo determina él, así como los posibles siguientes riegos durante el día.



Figura 29. Sistema de riego y bomba (5 HP) del invernadero 1.



Figura 30. Bomba (3 HP) utilizada en el invernadero 2.

Al utilizar este tipo de motobombas, los alumnos de la carrera de agricultura tienen que asegurarse de que tiene aceite y gasolina, en el caso de la bomba de 5 Hp deben utilizar carretilla para transportarla y realizar la instalación en cada riego, esto por razones de seguridad, ya que, aunque los invernaderos se encuentran dentro de la periferia de la universidad quedan muy lejos de los edificios.

4.1.2 SECCIONES DE RIEGO

El invernadero es un lugar cerrado, estático y accesible, habitualmente son fabricados de una cubierta translúcida de vidrio o plástico. Éste aprovecha el efecto producido por la radiación solar que, al atravesar la cubierta translúcida, calienta el ambiente ya que este tiene la capacidad de generar condiciones de temperatura y humedad ideales para favorecer el desarrollo del cultivo que existe adentro.

El invernadero 2, Figura 31, cuenta con 6 secciones de riego. Cada sección consta de 7 líneas con 100 plantas c/u y cada línea mide 25mts. Siendo un total de 4200 plantas en todo el invernadero.



Figura 31. Vista del invernadero 2 (fresa).

4.1.3 INVERNADERO PARA EL CULTIVO DE FRESAS

El Cultivo de Fresa es uno de los cultivos que mayor rango de temperaturas puede soportar, desde los -18°C hasta los 50°C , dependiendo de la variedad que se trate. Tradicionalmente su cultivo suele realizarse bajo acolchado, aunque en la actualidad se suele realizar cada vez más en Invernaderos de tipo Multitúnel (Novedades Agrícolas S.A., 2016). Respecto a la variedad de la fresa utilizadas durante la aplicación del SAR, se utilizó la *Fragaria Vesca*.

Las condiciones necesarias para el cultivo de la fresa son las siguientes:

- La temperatura óptima para la producción se sitúa en torno a los $15\text{-}20^{\circ}\text{C}$.
- Temperatura mínima vegetativa de 2°C , y máxima de 40°C , dependiendo de la variedad.
- Temperatura óptima para la fecundación entre 12°C y 25°C , a partir de esos valores resulta defectuosa o nula.
- Humedad relativa en torno al 60-80 %.
- En los momentos críticos durante el período vegetativo resulta crucial la interrelación existente entre la temperatura diurna y nocturna y la luminosidad.

Principales problemas debidos al clima:

- Alta HR. Favorece el desarrollo de enfermedades aéreas, originando pudriciones en los frutos.
- Bajo nivel de luz. Contribuye al desarrollo de hongos.
- Temperaturas altas: Aunque la fresa suele ser resistente a las altas temperaturas, resisten valores de 55 °C, por encima de los 30 °C se afecta su producción.
- Temperaturas bajas. Temperaturas por debajo de 12 °C dan lugar a frutos deformados por frío. Los órganos florales quedan destruidos con valores algo inferiores a 0 °C.

La fresa es la frutilla de mayor producción y exportación en México. Según cifras de SAGARPA/SIAP en el 2014. Entre los estados con mayor producción se encuentran Baja California, Guanajuato, Zacatecas, Chihuahua, y Puebla, entre otros. Siendo el estado de Puebla el quinto estado en mayor producción, Figura 32. Además, México es el tercer productor de fresas en el mundo.

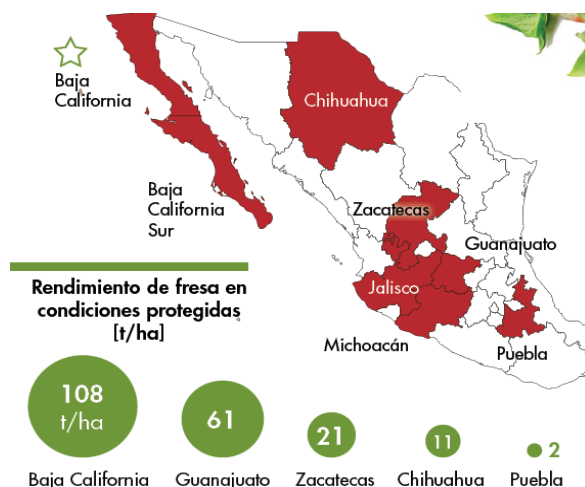


Figura 32. Estados con mayor producción de fresa en México.

Otro punto importante a considerar, es que Tecamachalco se encuentra muy cerca de la central de abastos de Huixcolotla, Puebla. Teniendo una ventaja estratégica al desarrollar este tipo de cultivo. Con su producción se podrían beneficiar una parte importante de los pequeños y medianos productores. Siendo el invernadero una infraestructura que soporte esta producción.

4.3 DISEÑO DEL SAR

Basándonos en esta problemática de riego, teniendo en consideración el valor del cultivo de fresa, y a la sugerencia del encargado del invernadero, así como, en publicaciones sobre el tema, se tomó la decisión de utilizar un sistema de riego automatizado (SAR) alimentado por energía fotovoltaica.

Los componentes con las características adecuadas, se seleccionaron para realizar el riego de agua por sección, de 7 filas y aproximadamente unas 700 plantas. En la Figura 33, se muestra una sección de fresas en etapa productiva, la cual ya tenía instalado el sistema de riego.



Figura 33. Sección del riego en las líneas de cultivo de fresa.

El sistema de riego automático, Figura 34, consta de un sistema de generación de energía fotovoltaica, un sistema de control automático que alimenta a la carga, que es la motobomba. El sistema de energía está conformado por un panel fotovoltaico, un regulador de voltaje, una batería, un inversor de corriente y la motobomba, ½ HP, que es la carga. Cabe mencionar que fue más fácil obtener la bomba con motor de C.A. que con uno de C.D. Lo que hubiera simplificar el sistema, al no necesitar el inversor.

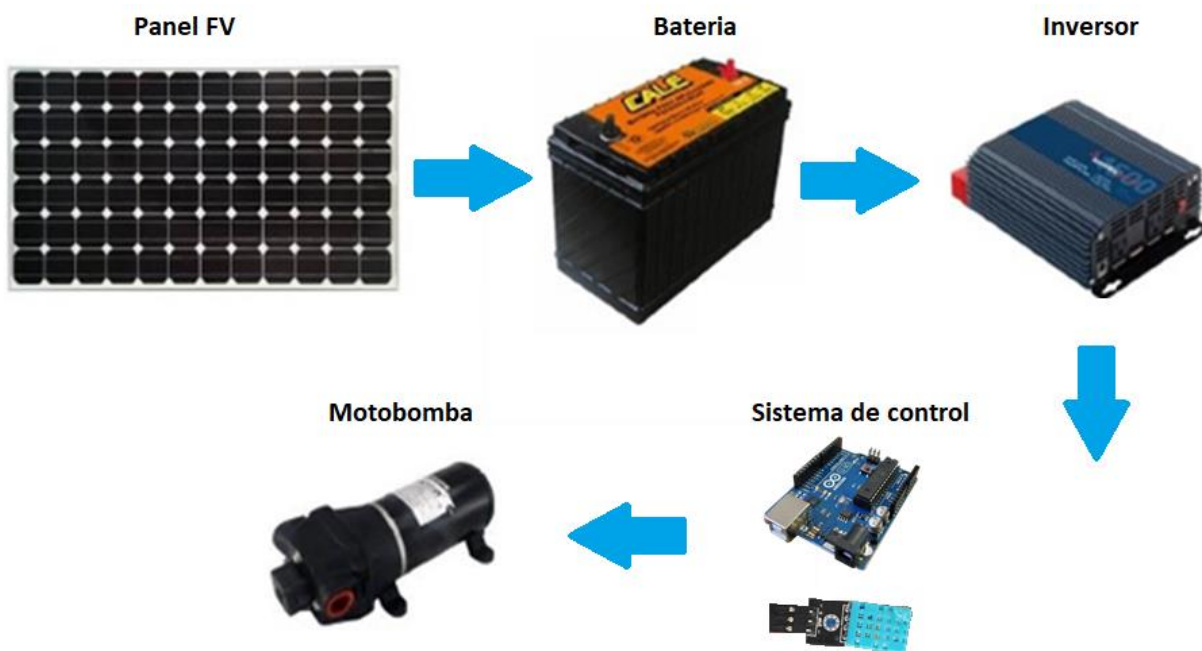


Figura 34. Esquema y componentes del sistema automático de riego propuesto.

4.2.1 CÁLCULO DE LA BOMBA

Antes de dimensionar el panel, seleccionamos la bomba que cumpla con los requerimientos técnicos para el riego. Para esto se tenían las dos opciones siguientes:

1. Bomba de ¼ HP en trabajo horizontal llega a 90 m y 15 m de alto.
2. Bomba de ½ HP en trabajo horizontal llega a 180 m y 30 m de alto.

Las características de la bomba de $\frac{1}{4}$ estaba en los límites necesarios, pero considerando el mayor caudal de la opción 2 es que se seleccionó ésta, bomba de $\frac{1}{2}$ H.P. Así mismo, en los datos del fabricante menciona que el ciclo de trabajo es de 20 minutos por 15 minutos de descanso con un máximo diario de 6 horas. El Cálculo energético de la bomba de riego es:

Bomba $\frac{1}{2}$ HP = 373 W

$P = V * I$ Donde P = Potencia V = Voltaje I = Corriente

$$I = 373 \text{ W} / 120 \text{ V} = 3.10 \text{ A}$$

Así mismo, utilizando el software Tecnomatix Plant Simulation se realizó una simulación para evaluar la distribución, caudal y presión del agua dentro del sistema empleado, considerando las distancias entre la bomba e invernadero, entre líneas de riego y diámetro de estas tuberías. En las variables mencionadas y se verificó el uso adecuado de la motobomba de $\frac{1}{2}$ HP que provee un caudal de más de 50 L/min. En la Figura 35 se observa la imagen de esta simulación.

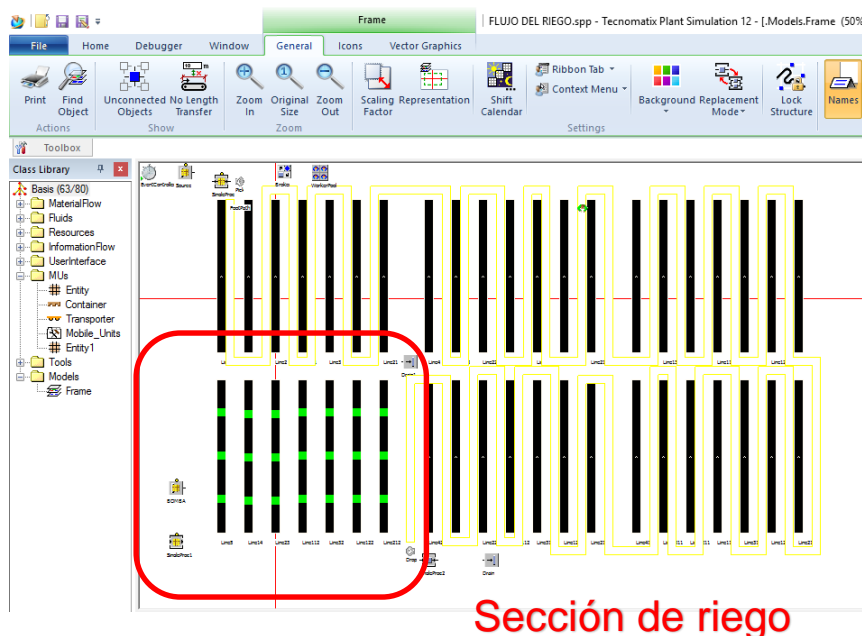


Figura 35. Imagen de la simulación realizada del invernadero 2, en el Recuadro una sección.

4.2.2 CÁLCULO DEL PANEL FOTOVOLTAICO (PF)

El dimensionamiento energético adecuado del PF es un requerimiento primordial para que el sistema tenga éxito. Debido a lo anterior, se obtuvo un panel solar policristalino con las siguientes características:

Capacidad de Potencia	80 W ± 5%
Corriente de corto circuito	4.90 A
Voltaje a circuito abierto	21.28 V
Tensión de alimentación máxima	18.17 V
Corriente de funcionamiento	3.91 A (estable)

La tensión de alimentación máxima del panel solar: es de: 18.17 V C.C. Por lo tanto, fue necesario colocar un diodo regulador TN 4007 de una capacidad 0 a 12 V. c.c. ya que el batería solo acepta de un voltaje de 12 V C.C.

De manera que, la corriente nominal que el sistema será de:

Fórmula	Despeje	Cálculo	
$P = V \times I$	$I = P / V$	$I = 80 \text{ W} / 12 \text{ V}$	$I = 6.66 \text{ A}$

Por otra parte, el inversor de corriente seleccionado, con una capacidad de 1000 W, podrá proporcionar una corriente de hasta:

Formula	Despeje	Cálculo
$P = V \times I$	$I = P / V$	$I = 1000 \text{ W} / 120 \text{ V} = 8.3 \text{ Amp}$

4.3 INSTALACIÓN DEL SGEF

Esta etapa inició desde construir la base-soporte para los componentes del SGEF, como la conexión de los dispositivos, la orientación e inclinación del PF el

acoplamiento de la bomba al sistema de riego, en la Figura 36 se muestran como quedaron los componentes instalados. Se muestra el panel fotovoltaico (80 W), un acumulador (batería), la bomba ($\frac{1}{2}$ HP), el inversor y el regulador de voltaje. La bomba se colocó en esta ubicación sólo para su posterior verificación de funcionamiento. Durante esta etapa se evitó energizar el sistema.



Figura 36. Disposición de los componentes del SGEF, que emplea un panel fotovoltaico de 80W.

4.3.1 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DEL PANEL FOTOVOLTAICO (PF)

La orientación correcta de los equipos fotovoltaicos es diferente para cada latitud. A continuación, se citan los criterios tomados en cuenta para la instalación del PF. Así mismo, la Figura 37 y Figura 38 muestran el proceso de orientación e inclinación del PF, esta última utilizando la aplicación, para un teléfono celular, PV Solar Power, que utiliza al mismo dispositivo para poder determinar el ángulo.

- Por nuestra ubicación, en el hemisferio Norte, la orientación del panel es al Sur.

- El panel solar se inclinará los grados de la latitud de la ciudad de Tecamachalco, Puebla, en este caso alrededor de 18.5° , por lo que se le dieron 20° de inclinación.



Figura 37. Inclinación del PF mediante aplicación PV Solar Power.

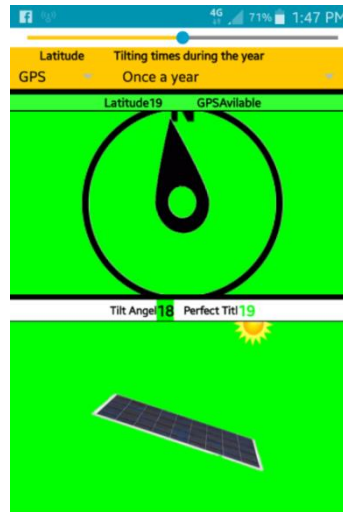


Figura 38. Aplicación PV Solar Power - lectura de latitud y grados de inclinación.

4.4 PUESTA EN MARCHA DEL SGEF

Después de la correcta instalación/conexión del SGEF, se cambió el sistema a una nueva ubicación para obtener una óptima generación eléctrica y a la vez no

interferir con el cultivo, por lo que fue necesario corroborar, nuevamente, la posición e inclinación del PF. Después, para cerciorarse del valor adecuado de voltaje, se realizaron mediciones de voltaje a la salida del PF, en la batería y a la salida del inversor. Como los valores estaban bien, se verificó el funcionamiento de la bomba, pero sin carga, esto es sin agua aún.



Figura 39. Puesta en marcha del sistema (izq.) y pruebas con carga (der.).

A continuación, se realizaron pruebas, exitosas, del sistema con carga, agua, pero sólo observando el funcionamiento de la bomba sin conectar al sistema de riego, Figura 39. De este funcionamiento, se tomó videograbación que se mostrará.

4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL SAR

Se seleccionó el sensor de temperatura y la tarjeta Arduino para el sistema de control, siendo un sensor de temperatura DHT11 y un controlador tipo Arduino UNO, con las siguiente características:

- Microcontrolador: ATmega328
- Voltaje de funcionamiento: 5 V
- Pines I/O digitales: 14 (de los cuales 6 proveen salida PWM)

- Pines de entradas análogas: 6
- Corriente DC por cada pin I/O: 40 mA
- Corriente DC en el pin de 3.3 V: 50 mA
- Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0.5 KB son utilizados por el bootloader
- SRAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Velocidad de reloj: 16 MHz

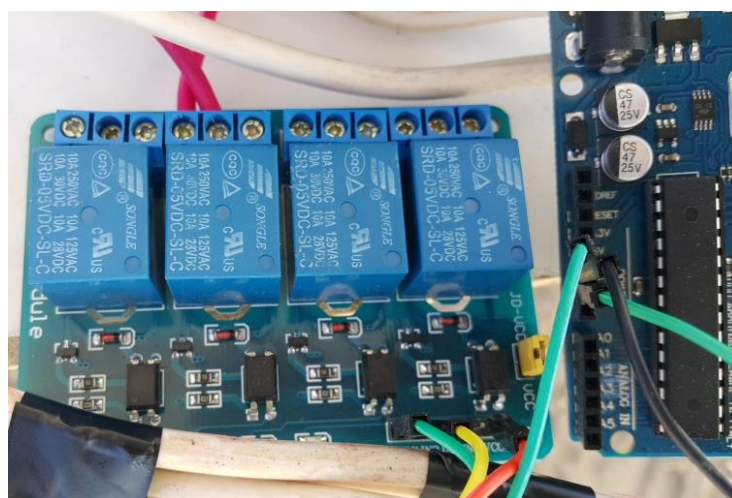


Figura 40. Sistema de control, Arduino y sección de salidas.

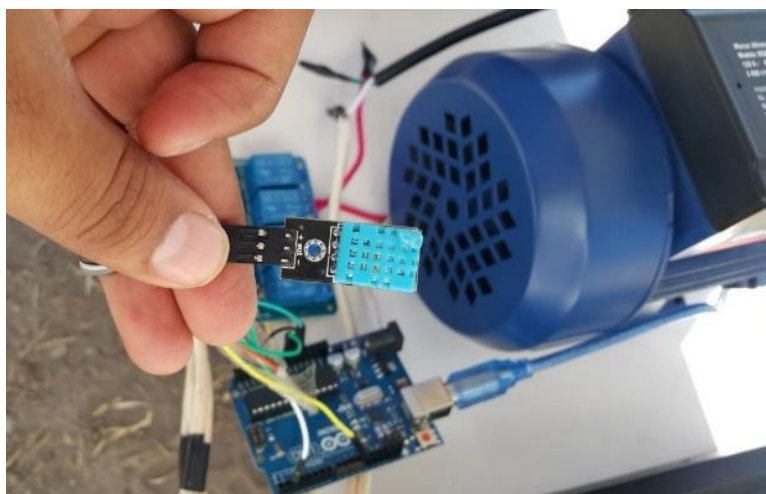


Figura 41. Sensor de temperatura DHT11.

Una de las ventajas que se tiene es que se puede programar este tipo de controlador mediante el uso de una Laptop empleando el software de Arduino. De manera que, para automatizar el funcionamiento del riego se consideró tiempos de riego, riegos durante el día, temperatura y humedad. El código de programación es el siguiente:

```
#include "DHT.h" //INCLUIMOS LA LIBRERIA DHT11

#define DHTPIN 2 //DEFINIMOS EL PIN AL QUE SE VA CONECTAR EL SENSOR

#define DHTTYPE DHT11 // DEFINIMOS EL TIPO DE SENSOR A UTILIZAR O EN
ESTE CASO LA FAMILIA DEL SENSOR

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

//librerias del DHT 11

int bomba=13; //ASIGNAMOS UN NOMBRE AL PUERTO 13 QUE SERA LA SALIDA
PARA LA BOMBA

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Se inicia la comunicación serial COMPUTADORA Y ARDUINO
  dht.begin(); //Se inicia el sensor

  pinMode(bomba,OUTPUT); //SE DECLARALA BOMBA COMO UN PUERTO DE
SALIDA
}

void loop(){

  float h = dht.readHumidity(); //se lee la humedad

  float t= dht.readTemperature(); // se lee la temperatura

  Serial.print("Humedad: "); // SE IMPRIMIMEN LOS VALORES EN EL MONITOR
SERIAL DEL IDE DE ARDUINO

  Serial.println(h);

  Serial.print("Temperatura: ")

  Serial.println(t)
```

```
digitalWrite(bomba,HIGH); // ESCRIBIMOS EN ALTO (5V) EL PUERTO BOMBA
PARA ACTIVAR EL MODULO RELEVADOR O ETAPA DE POTENCIA
```

```
delay(50000);
digitalWrite(bomba,LOW);
delay(1200000); // cantidad en milisegundos
digitalWrite(bomba,HIGH);
delay(5000);
digitalWrite(bomba,LOW);
delay(1200000);
digitalWrite(bomba,HIGH);
delay(50000);
digitalWrite(bomba,LOW);
delay(1200000);
digitalWrite(bomba,HIGH);
delay(50000);
digitalWrite(bomba,LOW);
delay(1200000);
delay(50000);
digitalWrite(bomba,LOW);
delay(50400000);
}
```

4.6 PUESTA EN MARCHA DEL SAR EN EL INVERNADERO

La última prueba, fue la conexión de la bomba a sistema de riego de las fresas en el invernadero. Se procedió a encender la bomba y alimentar al sistema de riego. Se verificó que en cada planta estuvieran saliendo agua de manera adecuada durante el tiempo de riego, que fue el resultado obtenido.

En la Figura 42, podemos observar el seguimiento que se da al sistema mientras se realizó el riego de una sección de fresas, 700 plantas aprox. Lo que permite el funcionamiento autónomo y que el personal pueda realizar otras actividades.



Figura 42. Revisión de la instalación del SAR en las secciones de fresa.

4.7 COSTO DEL SAR

Respecto a los costos de los sistemas, éstos se obtuvieron en junio del año 2017, tanto del sistema tradicional que emplea una motobomba a gasolina, como del sistema automático de riego (SAR) que utiliza una bomba alimentada por un panel fotovoltaico. En la Tabla 3 podemos ver que el costo total de inversión inicial del sistema tradicional es de \$ 10,177.34, mientras que para el SAR es de \$ 16,120.8. Es decir, alrededor de un 36.87% más económico el sistema tradicional que el SAR.

Sin embargo, el funcionamiento normal del sistema tradicional por semana necesita 9.8 litros de gasolina y 1 botella de 750 ml. de aditivo de aceite de 2 tiempos. Este costo semanal de mantenimiento es de \$225.32. Considerando 52 semanas al año se requiere un gasto corriente de \$ 9,483.76. De manera que, el costo del combustible determina directamente la rentabilidad del sistema tradicional, debido a que representa más del 50% del costo de inversión del sistema.

Con estos valores, el SAR es rentable a partir del segundo año de uso debido a que el costo de inversión y de gasto corriente del sistema tradicional es casi el mismo que el costo inicial del SAR, y este último sistema ya no necesitará gastos adicionales para su funcionamiento.

Tabla 3. Costos de inversión del sistema automático de riego y tradicional para un invernadero.

COSTO DE INVERSIÓN SAR		COSTO DE INVERSIÓN DEL SISTEMA TRADICIONAL			
Panel solar de 80 watts	\$ 4,800.00	Moto bomba 5 HP a gasolina	\$ 5,963.00	1 año	10 años
Regulador de carga 12/15/20	\$ 1,500.00	litro de gasolina magna	\$ 15.34	\$ 5,599.10	\$ 55,991.00
Inversor de 1000W 12CC-120C	\$ 2,200.00	Aceite de 2 tiempos	\$ 75.00	\$ 3,900.00	\$ 39,000.00
Batería 12V 100Amp	\$ 1,800.00	2 codos PVC	\$ 55.00		
Bomba 1/2 HP	\$ 850.00	Manguera de 1"	\$ 19.00		
Arduino Uno	\$ 490.00	Cintilla de riego por goteo	\$ 1,050.00		
Etapa de potencia	\$ 350.00	subtotal	\$ 7,177.34		
jumpers	\$ 90.00	Mano de obra	\$ 3,000.00		\$ 94,991.00
Sensor DHT11	\$ 130.00		\$10,177.34		
cable cal. 12	\$ 100.00	GASTO CORRIENTE		\$ 9,499.10	
Accesorios					
2 codos PVC	\$ 55.00				
Manguera de 1"	\$ 19.00				\$ 105,168.34
Cintilla de riego por goteo	\$ 1,050.00				
subtotal	\$13,434.00				
Mano de obra 20%	\$ 2,686.80				
Total	\$16,120.80				

Por otra parte, el tiempo de recuperación de la inversión del SAR, será de 3 años, considerando el gasto corriente de \$ 9,483.76. Sin embargo, un aumento en el precio de la gasolina reduciría ese tiempo. Además de estas ventajas, su uso promueve el cuidado del medio ambiente y como es un sistema automático reduce el gasto de agua en el cultivo ya que se realiza de acuerdo a los ciclos programados de riego.

Tabla 4. Costos de mantenimiento del sistema tradicional para el invernadero de la UTTEcam.

Descripción	Precio	Gasto corriente en el sistema tradicional			Anual
		Semanal		Semanas	
		Cantidad	Importe		Importe
Gasolina Magna	\$ 15.34	7	\$ 107.38	52	\$ 9,483.76
Aditivo 2 tiempos	\$ 75.00	1	\$ 75.00		
		Total	\$ 182.38	Total	\$ 9,483.76

Conclusiones

Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo se alcanzó al diseñar y construir un prototipo de un Sistema Automatizado de Riego por medio de energía fotovoltaica. Esto mediante un panel fotovoltaico que produce energía eléctrica, una batería que la almacena y ayuda en el arranque de la bomba, así como, un Arduino para automatizar su funcionamiento.

En comparación con un sistema usado tradicionalmente, el SAR propuesto tiene un tiempo de recuperación de tres años de la inversión inicial, que es de \$16,120.8, que pudiera verse reducido si el costo del combustible aumentara, haciendo más rentable el sistema propuesto.

Este sistema de bombeo fotovoltaico para riego es autónomo debido al uso de un micro controlador Arduino. De manera que, puede funcionar de acuerdo a la programación realizada sin necesidad de supervisión. Además de que cuenta con una gama de aplicaciones como pueden ser tiempos de riego, cortinas automáticas, ventilación e iluminación; de acuerdo al tipo de sensores con los que se cuente.

Por lo tanto, este sistema ofrece un adecuado uso del agua, que considerando la zona se carece mucho de este recurso y ofrece a los habitantes una opción para poder ser productivos sin dejar de ser cuidadosos con el ambiente.

Recomendaciones y Trabajo Futuro

Recomendaciones

Las siguientes acciones se proponen para mejorar el presente trabajo realizado:

- Por medio de internet, se puede tener un monitoreo constante del SAR, además de contar con otros dispositivos que ayuden a controlar aspectos puros del cultivo como control de plagas.
- Utilizando un arreglo fotovoltaico de mayor capacidad podríamos programar el riego para no solo una sección sino todo el invernadero.
- Se pueden evaluar otro tipo de cultivos que requieran de una cantidad similar de agua y de alguna manera obtener mejores cosechas.
- Mediante el control adecuado de los indicadores se pueden incrementar las aplicaciones de este sistema.
- Se recomienda sensibilizar a los dueños de invernaderos para optar por este tipo de soluciones que no solo muestran un ahorro significativo, sino además contribuye a consumir de manera eficiente el agua; este sistema ofrece un adecuado uso, que, considerando la zona, se carece mucho de este vital líquido y ofrece a los habitantes una opción para poder ser productivos sin dejar de ser cuidadosos con el ambiente.

Trabajo Futuro

- Crear nuevos arreglos FV con mayor eficiencia y materiales menos costosos.
- Obtener mayores adaptaciones que permitan el aprovechamiento de los recursos renovables.

Referencias

- Flores F. El final de la intensa vida del Sol, DGDC-UNAM 27/05/2013
- Houghton J., (2002). *Física de la atmósfera*, Cambridge University Press, USA.
- Arellano J., Guzmán J. (2011). *Ingeniería Ambiental* Alfaomega grupo editor S. A. de C. V. México, Páginas 99-101.
- Pérez J., Sánchez L., (2005) La gestión de la demanda de electricidad Mercedes Pardo. Documento de trabajo 65(I)/2005 Pág. 20-25.
- Duffie J., Beckman W., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Sons, Inc., 1991 capítulos 1-3.
- NMX-E-255-CNCP-2008 Invernaderos-Diseño y Construcción-Especificaciones, fecha de publicación en el Diario Oficial de la Federación 08 de Julio del 2008.
- O. Perpiñán, E. Lorenzo, M. A. Castro, and R. Eyras. (2008) *On the complexity of radiation models for PV energy production calculation*. Solar Energy, (125-131)
- Bustamante, J. (1996) Manual de Obras Menores de Riego c.1
- <http://www.labsolar.utfsm.cl/instrumentos/pirheliometro.jpg> (2016)
- <http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/instrumentacion/instr6.htm> (2016)
- <http://www.atmosfera.cl/html/temas/instrumentacion/instr6.htm> (2016)
- http://www.ec.upc.es/esf/Radiacion_Solar.pdf (2016)
- http://www.re.sandia.gov/mat/energ_solar_basica/sld005.htm (2016)
- http://revistaurbanismo.uchile.cl/CDA/urb_simple/html (2016)

- <http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/tesis/Soto.pdf> (2016)
- <http://www.siemenssolar.com/> (2016)
- http://www.inelsacontrols.com/modulos_fotovoltaicos.htm
- <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/drip-irrigation> (4:54pm 20/02/2017)
- <http://www.novedades-agricolas.com/es/invernaderos-fresas> (3:57pm 02/05/2018)
- http://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_fresa.asp (8:50pm 07/10/2018)

Anexos

ANEXO 1

TIPOS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Este tipo de bombas posee un impulsor que a través de la fuerza centrífuga a alta velocidad cambia la dirección del agua de axial a una dirección radial, las bombas centrífugas se pueden encontrar en dos formas: sumergibles y de superficie, tienen la capacidad de bombear el agua a 60 metros de carga dinámica total, o más, dependiendo del número y tipo de impulsores.

Las bombas centrífugas de succión superficial poseen la ventaja que pueden ser inspeccionadas y ser reparadas fácilmente, ya que se encuentran al nivel del suelo, donde es más fácil realizarles trabajos de mantención, la desventaja que tienen es que no trabajan de manera adecuada si es que la profundidad de succión excede los 8 metros.

Hay una gran variedad de bombas centrífugas sumergibles, algunas de estas bombas tienen el motor acoplado directamente a los impulsores y se sumergen completamente, Figura 43, otras tienen el motor en la superficie, mientras que los impulsores se encuentran completamente sumergidos, generalmente, las bombas centrífugas sumergibles tienen varios impulsores y por ello, se les conoce como bombas de paso múltiple.

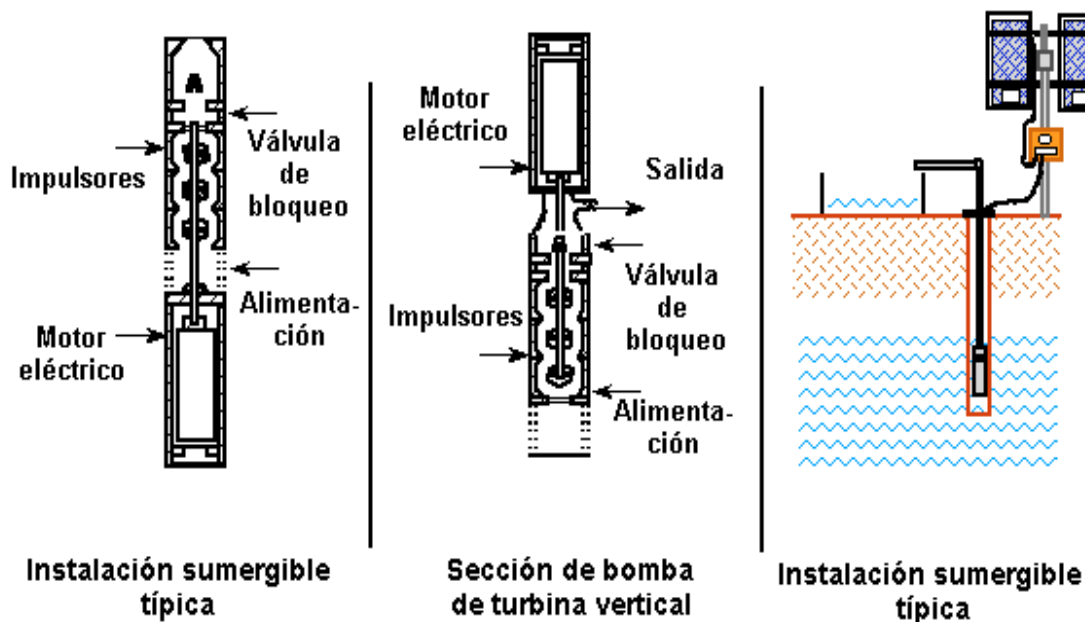


Figura 43. Esquema de una bomba centrífuga sumergible. (<http://www.re.sandia.gov>, 2016)

BOMBAS VOLUMÉTRICAS

Las bombas volumétricas, Figura 44, o de desplazamiento positivo son adecuadas para el bombeo de bajos caudales y/o donde la profundidad es grande.

Algunas de estas bombas usan un cilindro y un pistón para mover paquetes de agua a través de una cámara sellada, otras utilizan un pistón con diafragmas. Cada ciclo mueve una pequeña cantidad de líquido hacia arriba. El caudal es proporcional al volumen de agua. Esto se traduce a un funcionamiento eficiente en un amplio intervalo de cargas dinámicas. Cuando la radiación solar aumenta también aumenta la velocidad del motor y, por lo tanto, el flujo de agua bombeada es mayor.

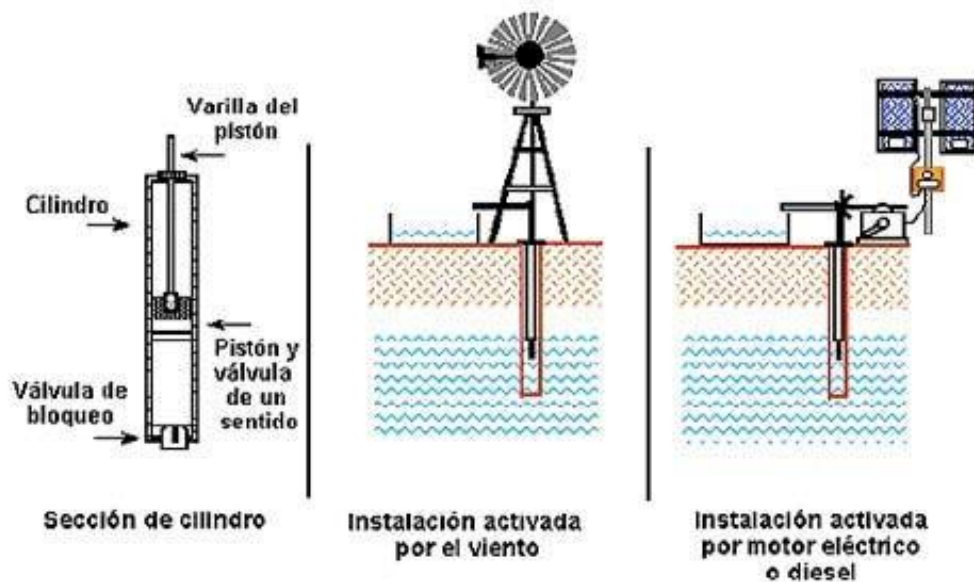


Figura 44. Esquema de una bomba volumétrica de cilindro. (<http://www.re.sandia.gov>, 2016)

Los datos fundamentales para la elección de la bomba necesaria para una instalación destinada a la extracción de agua son:

- El caudal
- La altura manométrica

Como se ha visto, las bombas centrífugas y volumétricas ofrecen diferentes alternativas para diferentes rangos de aplicación, el proceso de selección de la bomba para un proyecto es de suma importancia, todas las bombas tienen que usar la energía eficientemente ya que, en un sistema fotovoltaico, la energía cuesta dinero, y por ende una mala elección de éste desperdiciando dinero.

Es por ello que se debe tener una idea clara de qué tipo de bomba es la más adecuada para el proyecto, este proceso de seleccionar la bomba se complica debido a la multitud de marcas y características de cada bomba existente en el mercado y que cada vez crece más y más, un solo fabricante puede ofrecer un sin número de modelos de bombas y cada una tiene un rango óptimo de operación.

El método de diseño técnico se basa, en calcular el sistema para el mes menos soleado, es decir, aquél para el cual la relación entre la demanda de bombeo de agua y la irradiación solar disponible es mayor.

El cálculo, sin embargo, se hace en función de la potencia, es decir, se calcula la potencia eléctrica que hay que suministrar al motor-bomba para satisfacer las necesidades de bombeo de agua, y el número de paneles capaces de entregar dicha potencia.

ANEXO 2

Fabricantes de Celdas Solares

Al-Afyi Solar Wafers y Cells Factory

P.O. Box 452, Jeddah, 21411, Saudi Arabia

Tel: 966 2 6634442 Fax: 966 26657597

Silicio Multicristalino

Asirus

1119 S. Mission Road, #243 Fallbrook, California 92028, United States

Tel: 1 619 548 4315 Fax: 1 413451 5878 E Mail: dparsons@asirus.com

Silicio Amorfo Película Delgada

Atersa

C/ Embajadores, 187 28045 Madrid Spain

Tel: 34 915 178 580 Fax: 34 914 747 467 E Mail: international@atersa.com

Silicio Monocristalino

Bharat Electronics Limited

2nd Floor S.N. Bldg, 25 M.G. Road, Bangalore - 560 001, India

Tel: 91 80 5595729 Fax: 91 80 5584911

E Mail: imd@belindia.com

Silicio Monocristalino

Bharat Heavy Electricals Limited (BHEL)

Integrated Office. Complex, Lodhi Road, New Delhi -110003,India

Tel: (91) 11-4367927 Fax: (91) 11-4368837 E Mail:scvig@bhelindustry.com

Silicio Monocristalino

Boading Yingli New Energy Resource Co

Boading Sanfeng Road NO.255 071000, China

Tel: 86 312 213 1135 Fax: 86 312213 4750 E Mail: yingli@yingligroup.com

Silicio Multicristalino

BP Solar

630 Solarex Court Frederick, Maryly 21703, USA

Tel: 1 301 698 4200 Fax: 1 410981 0278

Silicio Mono y Multicristalino

Canon Inc E Business Division

3-30-2, Shimo-Maruko, Ohta-ku, Tokyo 146-8501, Japan

Tel: 81 3 3758 2111 or 81 3 37576675 Fax: 81 3 3757 7134

Silicio Amorfo PelículaDelgada

Canrom Photovoltaics Inc

108 Aikman Avenue, Hamilton, Ontario, Canada L8M 1P9

Tel: 1 905 526 7634 Fax: 1 905526 9341 E Mail: info@canrom.com