



Diseño de un sistema fotovoltaico para energizar una bomba para agua utilizada en el cultivo de maíz

Juan Daniel Rivas Martínez, Martín Darío Castillo Sánchez*

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se calculó y seleccionó un sistema fotovoltaico para suministrar de energía eléctrica a una bomba centrífuga para agua utilizada en el riego por goteo, para el cultivo de Maíz forrajero seco, en el Municipio de Villa de Reyes, Estado de San Luis Potosí. El cual por ser un municipio que presenta un clima seco templado en la mayoría de su territorio, demanda mayor cantidad de agua para el riego de sembradíos, por la rápida absorción de la tierra y erosión del suelo. Se obtuvo el cálculo de la carga eléctrica promedio requerido por la bomba centrífuga, así como el nivel de insolación promedio mensual y anual en la zona, para determinar los parámetros del sistema de captación, acumulación, conversión, y distribución de la energía eléctrica obtenida del sistema fotovoltaico, se investigó y proporcionó información relacionada con los diferentes componentes de un sistema fotovoltaico, así como la descripción de su instalación. Los cálculos financieros demuestran que el proyecto es viable y puede generar un mayor desarrollo agrícola en la región.

ABSTRACT

In the present research work, a photovoltaic system was calculated and selected to supply electricity to a centrifugal pump for water used in drip irrigation, for the cultivation of dry forage corn, in the Municipality of Villa de Reyes, State of San Luis Potosí. Which, for being a municipality that presents a temperate dry climate in most of its territory, demands a greater quantity of water for the irrigation of crops, due to the rapid absorption of the earth and soil erosion. The calculation of the average electrical charge required by the centrifugal pump was obtained, as well as the average monthly and annual insolation level in the area, to determine the parameters of the system for capturing, accumulating, converting, and distributing electrical energy obtained from the photovoltaic system, it was investigated and provided information related to the different components of a photovoltaic system, as well as the description of its installation. Financial calculations show that the project is viable and can generate further agricultural development in the region.

* Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco, Ingeniería eléctrica, Academia de Mecánica, rivas-sigmatron@hotmail.com, Unidad profesional “Adolfo López Mateos”, colonia: Lindavista. C.P: 07738, Alcaldía: Gustavo A. Madero. CDMX. M. en C. Juan Daniel Rivas Martínez. Dr. Martín Darío Castillo Sánchez.

Palabras claves: Panel solar, Inversor, Controlador de carga. Bomba para agua, energía eléctrica.

INTRODUCCIÓN

En el Altiplano de San Luis Potosí existe un déficit en el agua para riego, que resulta de la sobre explotación de los mantos acuíferos principalmente en el uso agrícola. Problema que se pretende solucionar con la implementación del riego por goteo. El riego por goteo o también conocido como riego gota a gota consiste en un método de irrigación utilizado usualmente en zonas áridas y que se caracteriza básicamente en el uso de pequeños caudales a baja presión y por una aplicación lenta del agua y en la proximidad de la planta, para de este modo hacer un uso óptimo de los recursos tales como el agua y los abonos o fertilizantes. (Jasso Chaverra & M Ángel, 2003). En particular el sembradío de maíz presenta características de riego específicas entre las cuales se recomienda la aplicación de riegos ligeros sin llegar a un encharcamiento del cultivo, por este motivo se considera en el presente trabajo realizar el riego por goteo, lo que permitirá controlar el volumen de agua y el tiempo de suministro. Para la alimentación de la bomba de agua para el riego se propone un sistema fotovoltaico.

ANTECEDENTES

El agua es un insumo de enorme importancia en las actividades del ser humano. Es en la producción de alimentos en donde se destina la mayor cantidad de agua dulce disponible. Esto implica que para satisfacer las necesidades de una creciente demanda de alimentos deberán realizarse mejoras sustanciales en la infraestructura de riego y el uso de tecnologías modernas en su aplicación, que mejoren la eficiencia y aumenten la productividad por unidad de superficie, sobre todo en las zonas donde el agua es cara y muy escasa. La FAO (2002) estima que la disponibilidad de agua dulce es ya una situación crítica en varios países y regiones, y es muy probable que este problema se intensifique. La agricultura absorbe entre 70 y 77% del consumo mundial. Ante la necesidad de implementar un manejo más eficiente del agua y de los fertilizantes en el cultivo de maíz, actualmente se está proponiendo el uso del sistema de riego por goteo debido a su mayor eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, este sistema se ha usado muy poco en cultivos de grano, principalmente por temas de rentabilidad del sistema, experiencia en el manejo de este, entre otros. Por otro lado, el cultivo de maíz es muy sensible al déficit hídrico, especialmente en la etapa de floración, donde la falta de agua afecta seriamente. Para evitar estas condiciones de estrés y aspirar a mayor rendimiento en el cultivo, El sistema de riego por goteo es hasta ahora uno de los más eficientes, se logra gran uniformidad en el riego, evita la contaminación del suelo y los mantos freáticos,





conserva el suelo, reduce la presencia de malezas, además eleva la producción y la calidad del cultivo. Figura 1.



Figura 1. Riego por goteo, una alternativa para la producción de maíz de alto rendimiento.
Fuente: (Bahena, Tornero. 2007).

El uso del agua y el rendimiento del cultivo de maíz

El riego rodado o por inundación tiene una eficiencia muy baja en el uso del agua, donde con “buen manejo” apenas se rebasa el 50 %, mientras que con el riego por goteo se tiene una mejor utilización del recurso alcanzando eficiencias que van del 90 al 95 %. Esto sin lugar a duda se traduce en un ahorro muy significativo en la cantidad de agua aplicada, además, si se extrae de pozos profundos los costos de electricidad o combustible se reducen. Además, mediante este sistema se pueden inyectar otros insumos (fertilizantes, herbicidas, insecticidas, etc.), donde su eficiencia de uso también se mejora considerablemente, permitiendo emplear dosis más bajas y controladas e indirectamente los impactos al medio ambiente se ven reducidos. Tabla 1. (Bahena, Tornero. 2007).

Tabla 1. Agua aplicada en maíz para grano en dos sistemas de riego. (Fuente: Bahena, Tornero. 2007).

Sistemas de riego.	No: de riegos.	Agua utilizada. (m ³)	Diferencia (m ³)	Ahorro de Agua. (%)
Goteo	58	761	6,953	90.1
Gravedad	10	7,714		

DESARROLLO DEL TEMA

Levantamiento en el sitio.

Este proyecto se localizó en el municipio de Villa de Reyes; en el estado de San Luis Potosí, entre el paralelo 22°, 00' y 21°,40'. Colinda con los municipios de Villa de Arriaga y San Luis Potosí, donde el clima que predomina es el Seco y Semi seco en un 67.3%. Figura 2.



Figura 2. Muestra el terreno ubicado en el municipio de Villa de Reyes, en el estado de San Luis Potosí.
(Fuente: Google maps).

Para poder obtener una idea de cuantas mazorcas podemos albergar en el terreno, es necesario conocer el área total de dicho terreno.

Cálculo del área en el terreno. Figura 3.

El terreno se divide en dos partes para facilitar el cálculo.

Rectángulo

$$A = \text{base} * \text{altura} = 240.16\text{m} \times 100.57\text{m}$$

$$A = 24145.89 \text{ m}^2$$

Triángulo:

$$A = \frac{(\text{base})(\text{altura})}{2} = \frac{(100.57)(42.46)}{2} = 2135.10 \text{ m}^2$$

$$A_T = 24145.89 \text{ m}^2 + 2135.10 \text{ m}^2 = 26287.99 \text{ m}^2$$

Después de obtener el área total del terreno, se puede hacer una distribución de tuberías. Tabla 2.

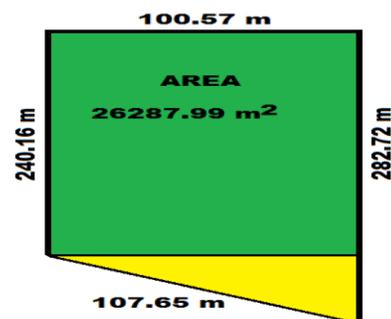


Figura 3. Dimensiones del terreno ubicado en el municipio de Villa de Reyes, en el estado de San Luis Potosí.
(Fuente Autoría Propia)



Tabla 2. Resumen de datos para la distribución del sistema de riego. (Fuente: Autoría Propia)

Artículo
Bomba 5 HP, CD
Diámetro de tubo de goteo: 16 mm.
Caudal regulado de goteo: 8 L/H
Separación entre goteros: 30 cm.
Separación entre línea de goteo: 60 cm.
Presión mínima en gotero: 1 Bar.
Presión máxima en gotero: 3.5 Bar
No. de línea de goteo por cada salida: 3.
No. Total, de salidas a línea: 155
Longitud tubo general: 278.72 m
Longitud tubo ciego entre salida y ramificación: 1.8 m
Presión requerida: 724.021 m.c.a
Caudal total: 1144.192 L/H
Diámetro tubo general: 100 mm
Orificio collarín: 7 mm
Pendiente: 2%.

Considerando el tamaño del terreno y la manera en que está ubicado, se toma como ramal principal la distancia de 282.72 m; que es la distancia más larga, dejando un espacio para paso y mantenimiento de 2 metros en cada lado. Las líneas de cultivo se dividen en peines, cada peine con 3 líneas de goteros. A su vez se divide el terreno en 3 parcelas, las cuales tendrán válvulas de control para cualquier mantenimiento futuro. Considerando los 4 m que se dejaran libres para paso se tiene que la distancia real en el ramal principal es de 278.72 m.

Esta distancia se divide en 3 lados iguales que son las parcelas

$$\text{Una parcela} = \frac{278.72}{3} = 92.90 \text{ m}$$

Para obtener el número de líneas de cultivo que se tendrán en el riego, se divide la longitud del ramal principal entre la distancia que se tiene de línea a línea

$$\text{Numero de Lineas} = \frac{278.72}{0.6} = 464.53 \text{ m}$$

El resultado se divide entre 3 para conocer cuántas líneas de cultivo corresponden a cada parcela

$$\text{Numero de líneas por parcela} = \frac{464.53}{3} = 155$$

Este es el número de líneas de goteros, sin embargo, estas están divididas en peines o líneas principales, de 3 líneas de goteros cada uno esto es.

$$\text{Lineas principales o peines} = \frac{155}{3} = 52$$

Esto quiere decir que se tienen 52 peines o líneas principales de las cuales se derivan 3 líneas de goteros, esto con la finalidad de tener control en secciones más pequeñas.

Cálculo del Caudal y dimensionamiento de tuberías.

El caudal máximo que se espera dentro de la tubería del ramal principal depende de la demanda que generan las líneas de riego y a su vez estas dependen del caudal demandado en los goteros, por lo tanto:

No. de líneas = 465 líneas

Distancia más larga en línea = 100 m

Distancia más corta de línea = 6.3 m

Para el cálculo del caudal, se debe conocer el total de goteros que utilizara el sistema de riego, por lo tanto, aun considerando las dos partes en las que se dividió el terreno para obtener el área, se tiene que, para la primera parte que representa un rectángulo el número de líneas que se colocan está dado por:

$$\text{No. de líneas de 100 m} = \frac{236.16}{0.6} = 393.6 \cong 394$$

Para la segunda parte que nos representa un triángulo rectángulo el número de líneas está dado por:

$$\text{No. de líneas menor a 100 m} = \frac{42.56}{0.6} = 71$$

Se obtienen el número de goteros por línea:

$$\text{Goteros por línea de 100 m} = \frac{100}{0.3} = 333$$

Total, de goteros en líneas menores de 100 m

$$\text{Total de goteros} = \frac{(333)(71)}{2} = 11,822$$

Total, de goteros en líneas de 100 m

Total, de goteros = (333) (394) = 131,202

Con esto se calcula el total de goteros en el sistema, que no es más que la suma de los goteros en líneas de 100 m y líneas menores de 100 m.

Goteros totales = 131,202 + 11,822 = 143,024

Recordando que, el caudal por gotero es 8 l/h

1 l/h = 0.001 m³ / h

Se calcula el caudal total.

$$Q_{\text{Total}} = (8 \text{ l/h por gotero}) (143,024 \text{ goteros})$$

$$Q_{\text{Total}} = 1,144,192 \text{ l/h} = 1144.192 \text{ m}^3/\text{h}$$



Dimensionamiento de tuberías.

Se propone una tubería de PVC-CED 40 de 4" de diámetro para la salida de la bomba y el ramal principal hasta el término de la primera parcela, donde se disminuirá, el diámetro de la tubería a media pulgada, entre cada parcela.

En este caso la tubería estará enterrada a 50 cm de profundidad como mínimo.

Sabiendo que la velocidad está dada por la ecuación 1. (Kenna,1985)

$$Velocidad = \frac{Flujo\ volumetrico}{superficie} \quad (1)$$

Calculando la superficie se tiene que:

$$S = \pi (2)^2 = 12.57 \text{ pulga}^2$$

$$S = 0.008 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{1144.192 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{0.008 \text{ m}^2} = 143024 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$V = 39.729 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El terreno cuenta con un pozo de agua, entubado para el suministro de agua al sembradío. Su nivel freático se encuentra a una profundidad de 6.5 m con respecto al piso. Es un dato importante para la presión que debe proporcionar la bomba o también conocida como altura manométrica (H) que está dada por la ecuación 2: (Kenna,1985)

$$H = H_g + \Delta p \quad (2)$$

Donde:

H = Altura manométrica

H_g = Altura que presenta el pozo de agua, de 6.5 m

Δp = Es la suma de pérdidas en elementos del sistema.

Pérdidas de carga en la instalación. Tabla 3.

Para este proceso se calculan:

Δp total = Σ (pérdidas en tramos rectos) + (pérdidas en puntos y elementos del sistema) + (pérdida en goteros).

Tabla No. 3. Pérdidas en el sistema. (Fuente: Autoría Propia)

Descripción	Cantidad piezas	Pérdidas de elementos en el sistema Tramo recto 278.72 m	Pérdidas de elementos en el sistema Tramo recto de 100 m	Pérdidas de carga en tramos rectos	Pérdidas en el gotero
Válvula de Bola de 4" de diámetro	3	0.543	0.008463		
Derivaciones: Tee de 4"	154	195.58	3.03996		
Tramo recto 278.72 m				506.3	
Tramo recto 100 m				11.87	
Cintilla de 20 mm de diámetro					0.18
Pérdidas totales del sistema = 717.53					

Con la altura del pozo y las pérdidas en el sistema, se obtiene la altura manométrica:

$$H = 6.5 \text{ m} + 717.5214 = 724.0214 \text{ m.c.a}$$

Selección del equipo de bombeo.

Conociendo la presión y el caudal total, se puede hacer una selección acertada de la bomba que utilizara el sistema de riego.

El primer paso es el cálculo de la potencia que utilizara la bomba mediante la siguiente expresión, ecuación 3: (Kenna,1985)

$$P = \frac{KW}{h} = \frac{Q \cdot h}{365 \cdot \eta} \quad (3)$$

Dónde



Caudal suministrado por la bomba.

$$Q = 1144.192 \text{ m}^3/\text{h}$$

Altura de impulsión

$$H = 724.0214 \text{ m}$$

Rendimiento de la bomba

$$\eta = 0.6$$

Sustituyendo:

$$\text{Potencia de bomba} = 5 \text{ HP.}$$

$$P = \frac{[1144.192 \text{ m}^3/\text{h}][724.0214 \text{ m.c.a}]}{[365] [0.6]} = 3.78 \text{ kW}$$

Diseño del sistema fotovoltaico.

Como primer término se toma la orientación e inclinación más favorable para los paneles a calcular, para esto se tiene previamente en consideración las dimensiones del panel a instalar. La inclinación de los módulos es el ángulo que forman estos con la horizontal, y para el máximo rendimiento anual se considera como ángulo de inclinación óptimo la latitud del lugar menos 10°.

Teniendo en consideración la potencia de la bomba, que es de 3.78 kWh, se selecciona una bomba de 5 hp tenemos que el consumo promedio para esta misma es 3.78 kWh por 8 h = 30.24 kWh/día. Para el cálculo del número de paneles solares (N_{mód}) necesarios para satisfacer la demanda eléctrica prevista por la bomba de agua, se empleará la expresión siguiente ecuación 4: (Harper, 2010)

$$N_{mod} = \frac{C_{ed}}{(PMP)(HSP_{crit})(PR)} \quad (4)$$

Donde:

Consumo diario estimado

$$C_{ed} = 30,240 \text{ kWh}$$

Potencia pico del módulo seleccionado

$$PMP = 370 \text{ W}$$

Horas de sol pico

$$HSP_{crit} = 3.7 \text{ HPS}$$

Performance ratio

$$PR = 0,845$$

$$N_{mod} = \frac{30240}{(370)(3.7)(0.845)} = 26.14 = 27$$

Para establecer la conexión entre módulos, ya sea en serie o paralelo, teniendo en cuenta que el módulo seleccionado, tipo GXB-370-SM, del fabricante SUPREME, tiene una tensión en el punto de máxima potencia (VMP) de 42.5 V, resulta que el número de paneles necesarios que habrá que colocar en serie para alcanzar la tensión nominal de trabajo del motor eléctrico de la bomba, que es de 250 V, vendrá dado por la siguiente (Harper, 2010)

$$N_{serie} = \frac{250 \text{ v}}{VMP} = \frac{250 \text{ v}}{42.5 \text{ v}} = 5.88 \cong 6$$

Dado que el regulador puede soportar hasta 375 VCD podemos configurar los paneles en serie como indica en la ecuación 5.

$$N_{serie} = \frac{375 \text{ v}}{VMP} = \frac{375 \text{ v}}{42.5 \text{ v}} = 8.82 \quad (5)$$

Paneles máximos que se pueden colocar en serie, para este caso solamente se colocaran 7.

Mientras que el número de paneles a colocar en paralelo será calculado mediante la expresión siguiente ecuación 6: (Harper, 2010)

$$N_{paralelo} = \frac{N_{mod.Total}}{N_{serie}} = \frac{27}{7} = 3.85 \cong 4 \quad (6)$$

Por lo tanto, finalmente el sistema generador fotovoltaico constará de 4 ramales conectados en paralelo, y cada ramal constará de 7 paneles GXB-370-SM colocados en serie por ramal. En total, 28 paneles GXB-370-SM.

Selección del regulador.

Para la selección del regulador de carga es necesario calcular cuál será la máxima corriente que deberá soportar, tanto en la entrada como a la salida del propio regulador.

Para el cálculo de la máxima corriente de entrada al regulador (I_{Re}), que proviene directamente de los módulos fotovoltaicos, se empleará la siguiente expresión ecuación 7: (Harper, 2010)

$$I_{Re} = 1.25 * ISC * N_{paralelo} \quad (7)$$

Donde:

Intensidad de cortocircuito del módulo fotovoltaico seleccionado de valor, (ISC) = 10 A (CEM).

Número de ramales de paneles solares dispuestos en paralelo del generador fotovoltaico que se vaya a instalar, (N_{paralelo}) siendo en este caso, 4 ramales.

Factor de seguridad para evitar daños ocasionales al regulador. 1.25



Sustituyendo en la expresión del cálculo de la intensidad de entrada al regulador (IRE) los valores anteriores, se obtiene el siguiente resultado: (Harper, 2010)

$$IRE = 1.25 * ISC * Nparalelo = 1.25 * 10 * 4 = 50 A$$

Para el cálculo de la máxima corriente esperada a la salida del regulador (IRS), es decir, del lado de la instalación que alimenta a la bomba de agua, se empleará la siguiente expresión ecuación 8: (Harper, 2010)

$$IRS = \frac{(1.5)(PDC)}{VB} \quad (8)$$

Por lo tanto, el regulador que se seleccione deberá soportar al menos una corriente aproximada de 50 amperios en su entrada y de 24 amperios a su salida.

Donde:

La potencia de las cargas en corriente directa que haya que alimentar, que en este caso es la potencia nominal de la bomba.

PDC = 5 hp.

La tensión nominal de la bomba de valor 250 VCD

Factor de seguridad de 1.5 para tener en cuenta los picos de corriente que puedan producirse en el arranque de la bomba. (Harper, 2010)

$$IRS = \frac{1.5 * 4}{250} = 24A$$

Por lo tanto, el regulador que se seleccione deberá soportar al menos una corriente aproximada de 50 amperios en su entrada y de 24 amperios a su salida

CONCLUSIONES.

El proyecto es viable, las condiciones geográficas del lugar y la baja accesibilidad al servicio eléctrico nacional permiten que este tipo de instalaciones de generación eléctrica se vuelvan una opción importante para las comunidades rurales.

En el desarrollo de este trabajo pudimos constatar que en la tecnología fotovoltaica se observan dos fenómenos físicos que nos permiten generar energía eléctrica por medio de la radiación solar, estos fenómenos son termoelectrónicos y fotoeléctricos.

Los sistemas fotovoltaicos en la actualidad han alcanzado un gran progreso y se mantienen en un constante desarrollo.

La tendencia es que este tipo de tecnología se siga utilizando cada vez más para la generación de energía eléctrica porque ofrece la gran ventaja de siempre contar con energía eléctrica en cualquier lugar ya sea para autoconsumo y/o para la inyección en la red de distribución. El sistema de riego por goteo permite aprovechar al máximo las propiedades de la zona de trabajo, ayuda al ahorro de agua y evita el desperdicio de recursos.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sergio Zepeda C. (2002) *Manual de Instalaciones Hidráulicas, Sanitarias, Aire, Gas y Vapor*. Segunda edición, México. Editorial Limusa/ 675 pág.
- [2] Jasso Chaverra & M Ángel. (2003). *Guía para la producción de Chile Ancho con fertirriego y acolchado plástico en el altiplano de San Luis Potosí*. México.
- [3] Bahena Delgado, Gregorio, y Mario Alberto Tornero, Campante.(2007). *La tecnología de micro irrigación, una alternativa para el manejo sustentable del agua en la producción de maíz en el estado de Morelos*, México. Agricultura. Núm. 809.
- [4] (Grundfos). (2013). *Sistema de suministro de agua basados en energía renovables 50/60 Hz*. Madrid, España. Disponible en línea: <https://docplayer.es/14077980-Catalogo-grundfos-sqflex-sistemas-de-suministro-de-agua-basados-en-energias-renovables-50-60-hz.html>
- [5]Harper Enríquez, (2010). *Instalaciones Eléctricas domesticas convencionales y solares fotovoltaicos*. Editorial: Limusa, México.
- [6] Arija Gonzales, D. (2010). *Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de Cooperación del Desarrollo con Tecnologías Apropriadadas*. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en línea en: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10871/PROYECTO%20fina.%20David%20Arija%20Gonzalez.pdf>
- [7] Kenna, J., Gillet, B., & Gillett, W. B. (1985). *Solar water pumping: A Handbook*. Handbook.

INFORMACIÓN ACADÉMICA

Juan Daniel Rivas Martínez: Ingeniero Mecánico, egresado de ESIME, IPN. Maestro en Mecánica, Profesor de tiempo completo y exclusivo, especialista en Celdas de Manufactura y Robótica Industrial.

Martín Darío Castillo Sánchez: Ingeniero Mecánico, egresado de ESIME, IPN. Doctor en Ingeniería mecánica, Profesor Investigador de tiempo completo y exclusivo.