

DIMENSIONAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO, RIEGO FOTOVOLTAICO

¹José Felipe Pomares Palerm, pomarespalerm@gmail.com

²José Gonzalo Carrillo Baeza, PhD, jgcb@cicy.mx

³Luis David Patiño López, PhD, luis.patino@cicy.mx

RESUMEN

En nuestros días es una tarea de primer orden hacer uso de la ciencia y la ingeniería para llevar los procesos productivos a los niveles más eficientes, con un menor impacto en los recursos naturales y beneficios significativos. La producción de alimentos es de las necesidades más importantes que se deben priorizar en materia de apoyo a estos sectores, y precisamente es de lo que trata este proyecto de investigación. Se integra a la estrategia de fortalecimiento científico, tecnológico y de innovación para la conservación y revalorización de la milpa Maya, con el cual, se realiza una base metodológica para el diseño y dimensionamiento de sistemas de generación de energía fotovoltaica para el bombeo de agua y riego de la milpa maya en comunidades que dependen de esta actividad agrícola. Se propone un diseño sencillo que integra la generación de energía a partir de paneles solares, bombeo directo de agua y riego por aspersión y goteo, que cumpla con las necesidades de la producción de milpa en localidades de escaso acceso a recursos energéticos e hídricos. La implementación, caracterización y puesta en marcha en el campo experimental, muestran como el riego por goteo hace un mejor aprovechamiento del recurso hídrico.

PALABRAS CLAVE

Bombeo
Fotovoltaico
Riego
Irradiación solar

ABSTRACT

Nowadays it is a first-order task to make use of science and engineering to bring production processes to the most efficient levels, with less impact on natural resources and significant benefits. Food production is one of the most important needs that should be prioritized in terms of support for these sectors, and this is precisely what this research project is about. It is integrated into the strategy of scientific, technological and innovation strengthening for the conservation and revaluation of the Mayan milpa, with which a methodological basis is made for the design and dimensioning of photovoltaic energy generation systems for pumping water and irrigation of the Mayan milpa in communities that depend on this agricultural activity. A simple design is proposed that integrates the generation of energy from solar panels, direct water pumping and sprinkler and drip irrigation, which meets the needs of milpa production in localities with little access to energy and water resources. The implementation, characterization and commissioning in the experimental field show how drip irrigation makes better use of water resources.

KEYWORDS

Pumping
Photovoltaic
Irrigation
Solar irradiation

¹ Centro de Investigación Científica de Yucatán, a.c. Unidad de Energía Renovable /estudiante.

² Centro de Investigación Científica de Yucatán, a.c. Unidad de Materiales Poliméricos /docente.

³ Centro de Investigación Científica de Yucatán, a.c. Unidad de Energía Renovable /docente.

I. INTRODUCCIÓN

La milpa es un sistema agrícola con alto valor histórico y que actualmente representa un sustento para muchas comunidades mayas en la península de Yucatán, México. Se estima que en Yucatán hay alrededor de cien mil campesinos mayas que dependen de la milpa. Aun así, el uso de este tradicional sistema agrícola ha ido disminuyendo en la actualidad, entre otras causas por el bajo rendimiento que ofrece. Además, el 60% de los campesinos que dependen de la milpa, viven en condiciones de pobreza. Esto favorece que abandonen sus actividades agrícolas, para buscar otras fuentes de ingreso.

Es importante revalorizar la milpa maya, ya que representa un eje socio-cultural de gran importancia. La milpa es un sistema que involucra una gran variedad de especies vegetales, que se complementa con diversas actividades de las familias mayas; como la apicultura, aprovechamiento de la fauna y recursos forestales. Por otra parte, la milpa es un sistema de agricultura de temporal, que tradicionalmente aprovecha la época de lluvias para el riego. Sin embargo, esto hace que la producción del cultivo dependa de los niveles de precipitación en la zona y, que no se pueda sacar un mayor provecho de su capacidad real.

En el presente proyecto de investigación se propone el diseño y dimensionamiento de un sistema de riego alimentado con energía solar fotovoltaica para su aplicación en parcelas de milpa maya de la región de Yucatán, a través de la puesta en marcha de un sistema de riego experimental en el Tecnológico Nacional de México en Conkal. La finalidad de la propuesta es aumentar la productividad de una milpa maya mediante un manejo eficiente de los recursos naturales, como lo son la energía solar y el recurso hídrico de la región, y así mejorar la productividad de la milpa.

Los objetivos específicos que se persiguen, a partir de la identificación de las condiciones climatológicas y geográficas de la parcela del campo experimental en el Tecnológico Nacional de México en Conkal, estarían enfocados en el diseño de un sistema de riego fotovoltaico de acuerdo con las necesidades hídricas y energéticas para media hectárea, acorde a la parcela experimental, así como la implementación de la instalación de prueba logrando una caracterización detallada del sistema de riego, para su utilización futura en parcelas de milpa maya. De esta forma se encuentra sentada la base metodológica para el diseño y dimensionamiento de un sistema de riego fotovoltaico, que es de gran utilidad en la capacitación de los productores milperos, y como herramienta para la toma de decisiones en cuestión de políticas públicas del sector agrícola.

II. METODOLOGÍA

Se definió el área de hortalizas como parcela experimental dentro del Tecnológico Nacional de México en Conkal, donde se aplica el sistema de riego. Se cuenta con un área de 25 m x 40 m, predominantemente llana, con pozo disponible en el sitio de emplazamiento del sistema de riego, con espejo de agua a pocos metros de profundidad.

Las principales características a destacar del lugar son la profundidad aproximada del espejo de agua de 6 m. Suelo predominantemente leptosol, este tipo de suelo tiene la particularidad de ser poco profundo, escasa cantidad de tierra fina y una gran cantidad de piedras. Está compuesto principalmente de caliza muy dura por la solución y precipitación de carbonato de calcio. Zona de escasa maleza, de terrenos explotados anteriormente para el cultivo. En el lugar hay instalaciones que funcionan como bodegas y aulas a las cuales asisten estudiantes regularmente. El pozo se encuentra a menos de 1 m de la rama principal de riego. La distancia máxima entre el pozo y la zona para cultivo más alejada es de 50 m, por lo tanto, el sistema de riego se diseña para utilizar el pozo disponible y en caso de cambiar la zona de aplicación se tenga material suficiente para cubrir la distancia. Además, se aprovechan las condiciones del terreno para definir la dirección del riego y configurar la distribución de los emisores de agua en el diseño del sistema de riego por goteo y por aspersión. Se acordó entonces con el Tecnológico de Conkal realizar pruebas de desempeño en sus instalaciones. Los trabajos empezaron el 19 de enero de 2022, la instalación empezó a probarse el 07 de marzo de 2022 y fue retirada el 16 de junio de 2022.

Figura 1
Ubicación de la parcela experimental en Conkal. Fuente: Google maps.



II.1 Cálculo de la carga dinámica del sistema bombeo-riego.

El correcto dimensionamiento del sistema fotovoltaico de riego, parte de las necesidades hídricas y de las pérdidas del diseño del propio sistema. Se propone un diseño experimental en el cual confluyen dos sistemas de riego, el de cintas de riego por goteo y el de aspersión (ver Figura 4 y 6), para de esta forma, tener un sistema compacto en el cual se lleven a cabo las mediciones pertinentes. El sistema de riego está compuesto por dos ramas principales de 50 m de PE de 1 ½" de diámetro, por lo que en cualquiera de los casos (goteo y aspersión) la rama más larga a calcular las pérdidas por fricción tendrá 50 m.

El sistema está diseñado para trabajar en parcelas cuatro de 25 m x 40 m por lo que cada rama de riego por goteo y riego por aspersión se controla por medio de válvulas.

La Carga Dinámica de un sistema de bombeo está compuesto por las pérdidas por fricción en tuberías, en válvulas y accesorios, las presiones necesarias de los dispositivos y las adicionales por metros de columna de agua que la bomba debe extraer de un depósito o para bombear a alturas determinadas.

Uno de los métodos indirectos para calcular el requerimiento hidrológico del cultivo es medir la evapotranspiración. Este concepto se refiere a la cantidad de vapor de agua que se despiden a la atmósfera en un cultivo y es el producto de relacionar la evaporación del suelo como consecuencia de la radiación solar incidente y el vapor de agua procedente de la transpiración de las plantas. Esto último se debe a la actividad de la planta y las condiciones ambientales. El valor con el que se trabaja al realizar los cálculos en nuestro experimento 14 (m³/día), se obtuvo de resultados de estudios anteriores en zonas aledañas.

Tabla 1

Datos de partida para el cálculo del sistema de riego fotovoltaico.

| | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Irradiancia diaria | 5.32 (kWh/kWp/día) |
| Rendimiento estimado fuente de agua | 50 (m ³ /hora) |
| Extracción sostenible fuente de agua | 50 (%/hora) |
| Tasa diaria de bombeo de agua | 14 (m ³ /día) |
| Diámetro tubería | 1 1/2 "(38.1 mm) |
| Longitud tubería | 8 (m) |
| Estimación de presión Goteo | 8 psi (5.632 mca) |
| Estimación de presión Aspersor | 28 psi (19.712 mca) |

Para el cálculo de la carga dinámica de las diferentes configuraciones de sistemas de riego se utilizó el método de Darcy-Weisbach. Podemos ver que hay dos factores fundamentales que tiene en cuenta; el tipo de tubería del conducto, material, acabado, rugosidad; y la velocidad del fluido, ya sea expresado directamente como tal o a través del número de Reynolds (Re) [7].

Para el cálculo de Pérdida de presión total en tuberías de riego se tiene en cuenta las dimensiones del diseño. Para un diseño de riego por goteo de una rama principal de 25 m, 25 cintas de goteo laterales de 40 m, se calculan las pérdidas por presión en tuberías y pérdidas en válvulas y accesorios de acuerdo a los requerimientos técnicos de presión en cada una de las cintas de riego por goteo 8 psi (5.63 mca).

El cálculo de la carga dinámica del sistema bombeo-riego por aspersión se compone de dos aspersores por parcelas de 25 m x 40 m, comandados por válvulas para que puedan rotar el riego en dependencia de los requerimientos, y una rama principal de 1 ½" de diámetro, de la que se derivan estos aspersores. La rama lateral tiene un largo de 30 m al último aspersor, donde se requiere una presión de trabajo según datos de catálogo de 28 psi (19.71 mca), y para lo cual se calculan las pérdidas.

Adicionalmente se realizaron los cálculos de sistema de riego por gravedad con almacenamiento de agua en tanque elevado, aunque no se llevó a cabo el experimento físicamente, es un ejercicio que nos da una noción de las diferentes soluciones que puede tener un agricultor. El cálculo de altura del tanque para riego por goteo, parte del requerimiento de las cintas de riego según el fabricante, que sería de 8psi (6.632 mca). De la misma forma el fabricante nos da un rango de operación de la cinta entre 5-12 psi, lo que nos daría la posibilidad de brindar una propuesta económica, para un sistema de 5 psi (3.53 mca) lo que reduciría los gastos en la estructura de soporte o elevación del tanque de almacenamiento de agua. Para el suministro de agua al diseño de riego por goteo planteado el tanque de se debe colocar a una altura de 4.66 m aproximadamente, para una presión en la rama principal de 5 psi.

Tabla 2

Resultados de la carga dinámica necesaria para riego por bombeo por goteo y aspersores, y para riego por goteo por gravedad con tanque elevado.

| Sistema | Riego Directo | Con Tanque |
|-----------------|---------------|-------------|
| Riego por Goteo | 13.486m | 16.026m |
| Aspersores | 27.986 m | No factible |

II.2 Cálculo de Potencia Fotovoltaica Requerida.

Debido a que los sistemas fotovoltaicos son una tecnología modular, el dimensionamiento está basado en la idea de tener un sistema fotovoltaico que genera la energía eléctrica necesaria para que una bomba extraiga el volumen de agua requerido para el riego de una milpa ubicada en el campo experimental de Conkal (coordenadas; 21.08, -89.53). Por lo tanto, es necesario realizar el balance energético requerido. Es decir que la energía suministrada por el sistema fotovoltaico (E_{SFV}) debe ser igual a la consumida por el sistema de bombeo (E_{SB}).

$$E_{SFV} = E_{SB}$$

La E_{SFV} dependerá de la capacidad, eficiencia y número de paneles utilizados, orientación, inclinación, sombras cercanas y del recurso solar disponible en la zona.

Para el prototipo de bombeo y riego propuesto se han considerado utilizar paneles fotovoltaicos marca Seraphine con capacidad de 530 W por panel. Estos estarán orientados al sur, (Azimut) $\alpha=0^\circ$, con una inclinación variable en ángulos de $\beta=0^\circ$, $\beta=15^\circ$, $\beta=30^\circ$, $\beta=45^\circ$ (latitud de la región, $\beta=20.97^\circ$), por medio de una bisagra acoplada a la estructura de soporte de los módulos para lograr el mayor rendimiento en las diferentes épocas del año, como se observa en la Figura 2.

Figura 2.

Representación de Inclinación de la estructura que sostiene el sistema FV de ángulo variable.



De acuerdo al predictor de recursos energéticos globales de la NASA (<https://power.larc.nasa.gov/>), Conkal ha recibido un promedio de 5.32 kWh/m²/día desde el 2014 hasta el 2020.

Es decir, el equivalente a 5.32 horas solares pico, irradiancia de referencia ($G_s=1$ kWh/m²/día).

Por otra parte, la E_{SB} será la suma del consumo eléctrico considerando las eficiencias del sistema, transmisión de energía, acondicionamiento energético y la energía hidráulica. La energía hidráulica será determinada por la siguiente expresión.

$$E_H = V * H * d_{agua} * g$$

La expresión anterior representa la energía hidráulica E_H que se requiere para elevar un volumen de agua (V) a cierta altura (H), en dependencia del diseño del sistema de riego, donde d_{agua} es la densidad del agua y g , la gravedad. Para el caso específico de la propuesta se ha calculado que para media hectárea de siembra de milpa se requieren 14 m³ de agua (valor máximo reportado para período de estiaje), al día extraído. Como el sistema de riego se proyectó para dos tipos diferentes de riego, los cuales tienen requerimientos diferentes de carga dinámica, se realizaron los cálculos para la peor condición que es el riego por aspersión, a una carga dinámica máxima de 28 m. Entonces la E_H será:

$$E_H = \frac{14 \text{ m}^3 * 28 \text{ m} * 1000 \text{ kg/m}^3 * 9.8 \text{ m/s}^2}{3600} = 1.067 \text{ kWh}$$

Por lo tanto, la energía que debe generar el sistema fotovoltaico (E_{SFV}) se podrá calcular de la siguiente manera.

$$E_{SFV} = \frac{E_H}{\eta_{SB} \eta_T \eta_{FV}}$$

donde:

E_H Energía hidráulica

η_{SB} Eficiencia del motor (i.e. eficiencia mecánica de la bomba)

η_T Eficiencia de transporte de energía (incluye pérdidas por fricción)

η_{FV} Eficiencia del sistema FV

Este último término es de la mayor importancia y lo describimos en detalle a continuación.

$$\eta_{FV} = (1 - Per_T)(1 - Per_{spec})(1 - Per_{suc})(1 - Per_{ohm})(1 - Per_{cont})$$

donde:

Per_T : pérdidas por exceso de temperatura (10%), Per_{spec} : pérdidas espectrales y angulares (3%), Per_{suc} : pérdidas por suciedad y polvo (4%), Per_{ohm} : pérdidas óhmicas (1%), Per_{cont} : pérdidas en el controlador y seguimiento de máxima potencia (3%).

Considerando valores realistas para la instalación, incluyendo una temperatura de operación por encima de los 50 °C (razonable para Yucatán), la eficiencia del sistema fotovoltaico es aproximadamente:

$$\eta_{FV} = (1 - 0.1)(1 - 0.03)(1 - 0.04)(1 - 0.01)(1 - 0.03) = 0.805$$

II.3 Criterio de selección de bomba.

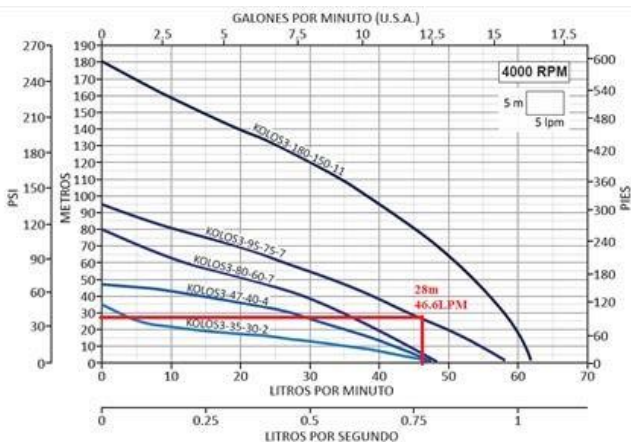
Conocida la carga dinámica (profundidad del acuífero, más pérdidas por fricción), es necesario conocer el caudal máximo requerido. Sabiendo que se requieren 14 m³ reparados en 5.32 horas solares, se obtiene el requerimiento para colmar del agua necesaria en media hectárea por día:

$$Caudal = V/HSP = 14m^3/5.32 h = 43.86 L/min$$

Lo cual será el caudal de diseño del sistema para media hectárea (2,580 LPH). El siguiente paso consiste en buscar un valor cercano en las curvas de los fabricantes de bombas, cruzando carga dinámica vs. caudal en la zona de alta eficiencia de la bomba, que suele estar de la mitad hacia la derecha (valores mayores de LPM) del rango de operación en el eje del caudal. Esto se aclara dado que no siempre proporcionan la curva de eficiencia en la documentación de las bombas.

Figura 3.

Especificaciones de caudal de diferentes bombas solares Kolosal.



Tomando como referencia las bombas sumergibles marca Connera modelos KOLOS 3 – 47 – 40 – 4, KOLOS 3 – 80 – 60 – 7 y KOLOS 3 – 95 – 75 – 7 (Figura 3, Tabla 3). Queda claro que la bomba más apropiada es la KOLOS 3 – 95 – 75 – 7, cuyo punto de operación a (28 m, 46.6 LPM) es apropiado para los requerimientos de diseño, con el requerimiento de contar con la bomba más pequeña posible, usando dos paneles fotovoltaicos.

Tabla 3.

Bombas tipo bala sumergibles con alimentación FV.

| Modelo | Máxima corriente de entrada (A) | Voltaje de entrada nominal (Vcd) | Rango de voltaje de operación (Vcd) | Máxima potencia de motobomba (W) | Corriente de motobomba (A) | Altura máxima de bombeo (m) | Caudal máximo por minuto (LPM) |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| KOLOS3 – 47 – 40 – 4 | 15 | 48 | 24 – 72 | 400 | 8.3 | 47 | 46 |
| KOLOS3 – 80 – 60 – 7 | 15 | 72 | 50 – 115 | 600 | 8.3 | 80 | 48 |
| KOLOS3 – 95 – 75 – 7 | 15 | 72 | 50 – 115 | 750 | 10.4 | 95 | 57 |

Retomando el cálculo del dimensionamiento fotovoltaico, a partir de los valores de diseño recopilados y estimados hasta ahora, estos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Valores de diseño del sistema de bombeo solar.

| Parámetro | Valor | Comentarios |
|--|-------------------|--------------------|
| Número de horas solares pico (kWh/día/m ²) | 5.32 | Dato de diseño |
| Volumen diario (V) | 14 m ³ | Dato de diseño |
| Carga dinámica (HTotal) | 28 m | Calculado |
| Energía hidráulica requerida (EH) | 1.067 kWh | Calculado |
| Eficiencia mecánica de la bomba (η_{sb}) | 0.4 | Valor asumido alto |
| Eficiencia de transporte de energía (incluye pérdidas por fricción) (η_T) | 0.9 | Valor asumido alto |
| Pérdidas térmicas (Per_T) | 0.1 | Valor asumido alto |
| Pérdidas espectrales y angulares (Per_{spec}) | 0.03 | Valor asumido alto |
| Pérdidas por suciedad y polvo (Per_{suc}) | 0.04 | Valor asumido alto |
| Pérdidas en el controlador y seguimiento de máxima potencia (Per_{con}) | 0.03 | Valor asumido alto |
| Pérdidas óhmicas (Per_{ohm}) | 0.01 | Valor asumido alto |

ESFV será entonces:

$$E_{SFV} = \frac{E_H}{\eta_{SB}\eta_T\eta_{FV}} = \frac{1.067 kWh}{(0.4)(0.9)(0.805)} = 3.68 kWh$$

Se puede observar cómo la energía del sistema casi triplica la energía hidráulica, debido a las pérdidas y las eficiencias menores a la unidad. Así, el número de paneles necesarios para cubrir esta demanda energética se determina:

$$N_{paneles} = \frac{E_{SFV}}{NHP * P_{nom}} = \frac{3.68}{5.32 * 0.530} = 1.3$$

En este caso se consideraron paneles solares de 530 W. Se obtienen 2 paneles para el sistema, de modo que satisfaga las necesidades energéticas del sistema, teniendo en cuenta las pérdidas y el déficit hídrico en el mes más seco.

II.4 Diseño y cálculo del sistema de riego

Una estrategia inicial de cálculo del sistema de riego, consistió en comenzar con la selección de la cinta de goteo, permitiendo identificar el caudal requerido por metro cuadrado de irrigación a cubrir. Partiendo de una distribución de cintas de goteo con una separación de 1 m entre cintas, dispuestas en paralelo; el diseño inicial atractivo es seleccionando la cinta de goteo marca Toro EA5081245, con orificios cada 30

cm, gasto de 1.0 LPH, resultando en una irrigación de 3.33 LPH/m², considerado como irrigación baja, para tiempos de sequía prolongados. Este bajo caudal, es con la intención de poder cubrir más área de irrigación con menor capacidad de bombeo, al igual que beneficiar el suelo kárstico con humectación lenta y prolongada.

Ahora bien, para la selección del motor-bomba se tuvo en cuenta que, para sistemas pequeños, donde las exigencias no sean extremas, como grandes profundidades y caudal elevado, se sugieren los motores de CD, por sus características constructivas. Por lo que se decidió trabajar con la marca Connera por su buena relación costo, beneficio y calidad reconocida, así como datos técnicos disponibles y variedad de sistemas disponibles en el mercado; el cual permite adquirir e implementar el sistema con confianza para un productor que se está iniciando en este ramo de riego solar. En base a la premisa de utilizar una bomba chica con dos paneles FV, se vio que, dada su curva de desempeño, la bomba modelo Kolos 3-95-75-7 (ver Figura 3) resultó la que se ajustó a los requerimientos planteados. Para una carga dinámica de 28 metros necesarios para riego por aspersión, la motobomba nos brinda un caudal de 46.6 LPM de agua. El sistema de riego por goteo diseñado requiere una carga dinámica menor que por aspersión, o sea que para 13 m (carga dinámica), la motobomba nos ofrece un caudal de 53 LPM. El fabricante de la moto-bomba seleccionada sugiere un arreglo fotovoltaico superior a los 1000 Wp.

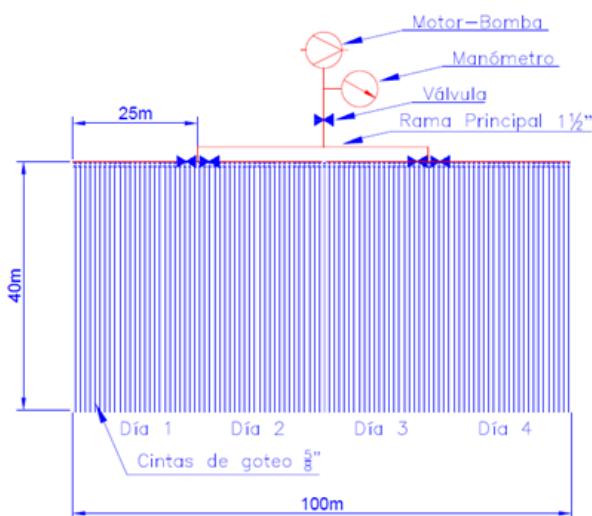
Se identificó la marca Seraphim como sistema monocristalino de calidad y funcional, con respaldo de representante regional para el servicio posventa [seraphim-energy.com], acorde requerimiento de la motobomba, con características de operación de 530 W, 41 V, donde conectando dos paneles en serie, se obtiene 1060 W (a 82 V) en condiciones ideales, cubriendo el requerimiento de la bomba de 750 W que permite trabajar en un rango de voltaje de 50-115 V. El arreglo fotovoltaico debe ser escogido siempre con un excedente que permita al sistema trabajar aun en períodos del día de relativa baja irradiancia (ej. en la mañana, en la tarde y en días nublados), así como tomando en cuenta todas las pérdidas hidráulicas y fotovoltaicas.

II.4.1 Riego por goteo diseñado.

El diseño de irrigación que se plantea es para una parcela de 40 m x 100 m, la cual se subdivide en cuatro pequeños lotes de 40 m x 25 m. El sistema de riego por goteo se basa en dos ramas principales de suministro de agua alimentada desde la mitad de la parcela preferiblemente, o sea tendríamos dos ramas de 50 m para minimizar las pérdidas por fricción.

Cada rama se divide en dos parcelas de 40 m x 25 m independientes entre sí por medio de válvulas que nos permitirán rotar el riego en la parcela en ciclos, según requerimientos del cultivo, y temporada del año (Ver Figura 4).

Figura 4. Esquema de irrigación por goteo, parcela completa



Para la puesta en marcha de la parcela experimental en Conkal, se tuvo presente un área útil de 25 m x 40 m (1000 m²), (ver Figura 5). Para el cálculo de irrigación por goteo, y ya estipulado un área de cobertura de 1000 m² como objetivo inicial, y planteando una separación de líneas de goteo de 1 m, se requiere 1000 m lineales de cinta de goteo. El modelo de cinta previamente planteado (EA5081245), tiene para esta longitud, 3333 orificios, que requiere 3333 LPH de caudal necesario, lo que es equivalente a 55 LPM, aproximadamente igual a lo que nos aporta la motobomba para el diseño de riego por goteo planteado. Esto es, como primera aproximación de un sistema funcional de irrigación por goteo utilizando una bomba con un gasto de 53 LPM (a 13 m de carga dinámica), es capaz de colmar el déficit hídrico planteado como premisa para nuestros cálculos de 14 m³. Es decir que nuestro sistema de riego por goteo nos va a aportar 17.7 m³ por día (en 5.32 horas solares pico). El recurso hídrico calculado (21% mayor a los 14 m³ de partida) nos daría la oportunidad de almacenar agua o hacer una rotación de cultivos en menor periodo de tiempo (4.2 horas).

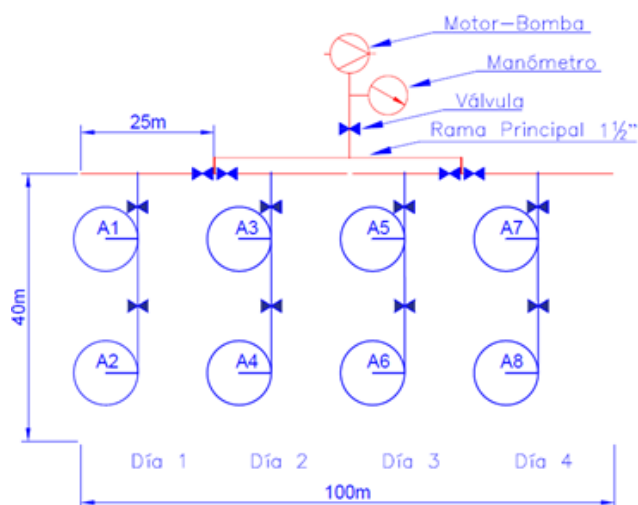
Figura 5.
Esquema de irrigación por lote.



II.4.2 Riego por aspersión diseñado.7

Para el caso de la implementación del sistema de aspersión, se consideró inicialmente, aspersores comerciales Wade-rain WR41F, con radio de cobertura de 16 m, 56 LPM (3,456 LPH), a 28.4 psi. Al considerar el diámetro de cobertura de 32 m, este es adecuado para cubrir medio lote de 1/8 de hectárea, como se representa en la Figura 6, con el aspersor 1 (A1); donde se podrá utilizar un aspersor a la vez, siendo que el área cubierta por aspersor (804 m²), hidrata el suelo a una relación de 4.29 LPH/m². Aquí se estima que, con dos horas continuas de riego, se llegaría a una buena humectación del suelo del lote (una hora por aspersor, A1 y A2), por lo que se podría pasar al segundo lote para aprovechar las horas solares disponibles. Acá vale la pena observar que la recomendación del uso continuo de la bomba está recomendado a dos horas con una hora de descanso, por lo que debe tomarse en cuenta a la hora de escoger la estrategia de riego.

Figura 6.
Esquema de aspersión por lote de 1/8 ha.



III. RESULTADOS.

Se implementó el sistema de riego en el campo experimental de Conkal, diseñado para validar los datos calculados, tanto para el sistema de riego por goteo como por aspersión, así como también ha servido como punto de encuentro, para mostrarle a los productores locales de Milpa las bondades de los sistemas de riego fotovoltaicos, en cuestiones técnicas y económicas.

Para el máximo aprovechamiento de uso energético solar, se implementó un sistema de soporte/sujeción de los paneles FV, que permite el seguimiento solar a dos ángulos de libertad de forma manual, como se representa en la Figura 2, para que el agricultor tenga la posibilidad de rotar manualmente sobre su eje al arreglo FV, y el sistema pueda estar orientado al sol y obtener la máxima energía disponible en las diferentes etapas del año. Por ejemplo, el panel se hace girar hacia el sol de la mañana, proponiendo que se reposicione hasta cuatro veces o cada vez que el agricultor tenga oportunidad. Este giro se logra contemplando dentro del diseño, un arreglo de "poste dentro de poste", el cual es una propuesta simple, económica y funcional. El segundo grado de movimiento será para el cambio de posición referente al movimiento solar respecto al cenit, siguiendo datos ya conocidos de tablas de posicionamiento solar para la región (ej. ángulo de 44° en invierno o -2° en verano), para ello se construyó un sistema de bisagra que soporta la base de los paneles y les da libertad de inclinación variable en ángulos de $\beta=0^\circ$ (de abril a agosto), $\beta=15^\circ$ (marzo y septiembre), $\beta=30^\circ$ (enero, febrero, octubre y noviembre), $\beta=45^\circ$ (diciembre), por medio de orificios que se hacen coincidir y con un perno quede fija a la estructura de soporte de los módulos. El mástil de sujeción de la estructura de soporte de los paneles está anclado por medio de tornillos y tuercas a una base previamente cimentada en la tierra, de manera tal que, en caso de ser necesario, el desmontaje y traslado del sistema, pueda ser de manera rápida, fácil y segura.

Para el esquema experimental de Conkal y su caracterización, se instalaron 25 cintas de goteo dando como resultado 18.09 m³ al día (ver Tabla 5), de recurso disponible, lo que nos permite regar un lote en solamente 4.12 horas (según requerimiento de 14 m³/día), dando oportunidad a rotar áreas o almacenar el recurso hídrico. La Figura 4 muestra el esquema en el que, por medio de válvulas de control, se puede dar servicio a todos los lotes independientes o incluso en paralelo según se requiera, en base a la disponibilidad energética del sol, a la necesidad del cultivo, a la rotación que se implemente en los lotes. Cada cinta de riego a su vez presenta una válvula, que se puede cerrar según convenga, esto nos da la posibilidad de tener incluso un grupo de cintas irrigando en cada lote, y que en total sumen el máximo caudal que nos brinda la bomba.

Una propuesta similar a la irrigación por goteo se hace aquí para la aspersión, entendiéndose de que la hidratación del suelo no es diaria, solo cuando se requiere por días prolongados sin lluvia o períodos de estiaje. Se podría considerar cuatro días para atender los cuatro lotes de 1/8 ha (Figura 6), o incluso hacerlo en dos días de a dos lotes por día, haciendo la distribución correspondiente de horas disponibles de radiación y cantidad de hidratación que se quisiera otorgar al suelo.

Para determinar el correcto funcionamiento del caudal de las cintas se aplicó el método de aforo de emisores. Se puede medir de dos formas, tomar el tiempo en un volumen conocido o bien fijando un tiempo y determinando el volumen recibido en ese tiempo. Para el aforo de goteros se midió el volumen de agua en una probeta en ml, para un minuto. Dividiendo en 1000 el volumen medido y multiplicando por 60 min, nos dará el caudal en litros por hora. Las instalaciones poseen elementos que permiten determinar y verificar fácilmente el volumen aplicado. La presión se mide en el cabezal principal, válvulas de campo y especialmente al final de los laterales de riego.

Se tomaron mediciones en 16, de las 25 cintas de riego, realizando dos mediciones por cada cinta. Se realizaron 8 mediciones por cada hora, en horarios comprendidos entre las 7:30 de la mañana hasta las 4:00 de la tarde en diferentes días. Cada medición se realizó en pares de cintas, midiendo 4 goteros simultáneamente, para un total por cada hora 32 goteros. Las mediciones se hicieron de manera diagonal en la parcela, seleccionando tramos espaciados entre sí cada 5 m (ver Figura 8), de esta forma se pudo tener una muestra amplia en cada tramo de nuestro sistema. En cada medición se tomaban además los datos de presión en el manómetro, además de los valores de potencia en W, velocidad en rpm, voltaje en V, y amperes en A. En cada día de mediciones se promediaron los valores de cada medición y total. Se realizaron mediciones en dos etapas, primero con 16 cintas, y después con 25 cintas, arrojando los siguientes valores promedio.

Tabla 5.
Resultados obtenidos promedio en las mediciones de riego por goteo.

| Parámetros | 1ra Etapa (16 cintas) | 2da etapa (25 cintas) | Valores de Catálogo calculados |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Potencia en W | 704 | 757 | 750 |
| Velocidad en rpm | 3046 | 2939 | - |
| Voltaje en V | 79 | 79 | 82 |
| Amperes en A | 8 | 9 | 10.4 |
| Presión PSI | 13 | 6 | 8 |
| mLPM (qm) | 26 | 17 | 16.7 |
| LPH/orificio | 1.56 | 1.02 | 1.0 |
| m ³ /día | 17.70 | 18.09 | 17.7 |
| q25 | 22 | 15 | - |
| CU | 78 | 85 | - |



Se puede destacar a partir de los resultados de caudal obtenidos, que la metodología con que se realizaron los cálculos para el diseño del sistema de riego por goteo y aspersión, son acertadas, pues los resultados se acercan en valores decimales a los calculados. En el caso de riego por aspersión las mediciones que se realizaron fueron medir el radio de cobertura, el cual oscilaba alrededor de los 14 m, lo que al comparar con las capacidades de caudal de la bomba instalada tiene lógica pues se queda por debajo de los requerimientos de este.

La metodología planteada para el cálculo de un sistema de riego fotovoltaico tiene un impacto directo en los productores de milpa, pues, por una parte, resuelve la problemática de tener una fuente de abasto de agua en lugares alejados del servicio eléctrico y donde muchas veces dicho riego es efectuado de manera manual o por medio de generadores eléctricos que representan un gasto económico importante en insumos. Por otra parte, el diseño planteado expone las bondades del riego por goteo acorde a las características del suelo de Yucatán, así como maximizar el área de riego a partir de la rotación de lotes controlados por válvulas. Esta metodología es una herramienta para que el productor pueda dimensionar correctamente su instalación fotovoltaica, acorde a las necesidades hídricas de sus cultivos, de manera puntual y controlada.

IV. CONCLUSIONES

A partir de la implementación y análisis del sistema de riego en el campo experimental de Conkal se corroboran los datos obtenidos en cálculos realizados, lo cual valida la metodología diseñada para sistemas de riego fotovoltaicos a pequeña escala de este trabajo.

El sistema FV diseñado muestra las bondades en cuestión de aprovechamiento de los recursos naturales, tanto hídricos como solares muy convenientes para productores de áreas sin servicios de electricidad ni agua públicos.

Se creó un espacio de convergencia para la visita de productores de la zona y estudiantes del instituto de Conkal, lo que favorece directamente la producción de milpa Maya, pues las viejas y nuevas generaciones hacen sinergia entre conocimiento técnico y la experiencia empírica.

También se concluye que el método de riego por goteo realiza un mejor aprovechamiento del recurso hídrico dadas las características arenosas del suelo de Yucatán.

Los costos de las instalaciones propuestas oscilan entre 60000-75000 mxn, cantidades inferiores al gasto anual en gasolina de muchos productores con los que conversamos, y que se podría impulsar con apoyos focalizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- David Arija González, Mónica Chinchilla Sánchez. (2010). Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas. Madrid, España: Centro de estudios Carlos III de Madrid.
- P. E. Demin. (2014). Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego. Métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones. - 1a. ed. - San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca, Argentina: Ediciones INTA, 2014.
- LIOTTA Mario (2000) "Superficie con riego presurizado en la Provincia de San Juan". INTA. San Juan. Argentina.
- J. C. Vega de Kuyper, S. Ramirez Morales. (2014). Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones. Bogotá, Colombia: Revista Escuela de Administración de Negocios, núm. 77, Universidad EAN.
- E. F. K. Michel, C. L. V. Aguilar. (2011). Retos de la gestión de una cuenca construida: la Península de Yucatán en México. Aqualac - Vol. 3
- Abella M, Romero F. (2005). Sistemas de bombeo fotovoltaico (Tesis de Maestría). España: Escuela de Organización Industrial, Departamento de Energías Renovables.
- Kumar S, Kumar S. (2020). Solar PV powered water pumping system using DC motor drive: A Critical Review. International Journal of Technical Research & Science.
- Pérez Carmona, Rafael. (2010). Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones / Rafael Pérez Carmona. -- 6ª. ed. -- Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Pérez Franco D. (2002). Evolución histórica de las fórmulas para expresar las pérdidas de carga en tuberías. Segunda parte: Desde los trabajos de Darcy hasta los de Stanton, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXIII, N° 3, ISSN 1680-0338, CIH, Cujae, La Habana, Cuba.
- Miguel Alonso Abella, Faustino Chenlo Romero. (2014). Sistemas de Bombeo Fotovoltaico. Departamento de energías renovables Ciemat.
- Héctor Antonio Fajardo Menjivar, José Adrián Ordoñez Bonilla, Julio López. (2021). La energía fotovoltaica en el riego agrícola: Revisión de literatura. Honduras. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria Ingeniería Agronómica

