



**Universidad
de La Laguna**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA AGRARIA**

**GRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DEL MEDIO
RURAL**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
DE BOMBEO SOLAR PARA UNA INSTALACIÓN
DE RIEGO DE BAJO COSTO**

**Amílcar Méndez Álvarez
La Laguna, Marzo de 2019**

**AUTORIZACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO
POR SUS DIRECTORES
CURSO 2018/2019**

DIRECTOR – COORDINADOR: Domingo Félix Sáenz Pisaca
DIRECTOR: Carlos Álvarez Acosta

Como Director/es del alumno/a Amílcar Méndez Álvarez en el TFG titulado:
Estudio e implementación de un sistema de bombeo solar para una instalación de riego de bajo costo nº de Ref 16

doy/damos mi/nuestra autorización para la presentación y defensa de dicho TFG, a la vez que confirmo/confirmamos que el alumno ha cumplido con los objetivos generales y particulares que lleva consigo la elaboración del mismo y las normas del Reglamento de Trabajo Fin de Grado de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.

La Laguna, a 25 de Febrero de 2019

Fdo:.....

(Firma de los directores)

SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE TRABAJO FIN DE GRADO

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Domingo Sáenz Pisaca y Carlos Álvarez Acosta, directores de este Trabajo de Fin de Grado, la ayuda que me han proporcionado a lo largo de la realización del mismo, resaltando la paciencia mostrada.

Agradecer a Anselmo Lugo García por su apoyo técnico en el diseño y montaje de los dispositivos electrónicos utilizados en este trabajo y a Axel Ritter por el apoyo prestado.

Igualmente, dar las gracias a mi familia por todo el ánimo que me han brindado a lo largo de estos años de carrera.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1.- Antecedentes | 3 |
| 2.- Introducción | 3 |
| 3.- Objetivos del Trabajo de Fin de Grado | 4 |
| 4.- Estructuración del trabajo | 4 |
| 5.- Tecnología de bajo coste para extracción de agua y el riego | 5 |
| 5.1.- Sistemas de bombeo manual | 5 |
| 5.2.- Sistemas de riego de bajo coste | 7 |
| 6.- Revisión bibliográfica. Bombeo solar fotovoltaico | 12 |
| 7.- Descripción de los sistemas | 18 |
| 7.1.- Descripción y componentes del sistema simple | 18 |
| 7.2.- Descripción y componentes del sistema complejo | 25 |
| 8.- Experiencia 1: Determinación de las prestaciones de la electrobomba | 33 |
| 8.1.- Material y métodos | 33 |
| 8.2.- Resultados y discusión | 37 |
| 9.- Experiencia 2: Prestaciones del sistema simple | 39 |
| 9.1.- Material y métodos | 39 |
| 9.2.- Resultados y discusión | 41 |
| 10.- Experiencia 3: Prestaciones del sistema complejo | 44 |
| 10.1.- Material y métodos | 44 |
| 10.2.- Resultados y discusión | 47 |
| 11.- Experiencia 4: Evaluación de campo del sistema complejo | 49 |
| 11.1.- Material y métodos | 49 |
| 11.2.- Resultados y discusión | 60 |
| 12.- Superficie regable | 65 |
| 13.- Presupuestos | 70 |
| 14.- Repercusión de la inversión en el costo de elevación | 72 |
| 15.- Conclusiones | 75 |
| 16.- Bibliografía | 79 |

TÍTULO

Estudio e implementación de un sistema de bombeo solar para una instalación de riego de bajo costo.

AUTORES

Méndez Álvarez, A.; Sáenz Pisaca, D.; Álvarez Acosta, C.

PALABRAS CLAVE

Bombeo solar, riego de bajo coste.

RESUMEN

Se diseñaron, instalaron y evaluaron dos sistemas de bombeo solar que se implementaron en una instalación de “riego de bajo costo” diseñada anteriormente en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. El primero de ellos, denominado “simple”, se compone del panel fotovoltaico, un regulador de tensión, una bomba sumergible y un filtro. El segundo, denominado “complejo”, presenta otros elementos que protegen y automatizan el manejo.

Tras el estudio realizado, se comprobó que ambos sistemas cumplen eficientemente con su cometido. Se determinó experimentalmente los volúmenes de agua que podrían elevar los sistemas, la superficie regable y el coste de elevación del m^3 , en función de nuestras condiciones ambientales. Los valores obtenidos para los parámetros mencionados fueron de 4800 L/día, 1000 m^2 y 0,045 €/m³ para el simple y de 3800 L/día, 800 m^2 y 0,091€/m³ para el complejo.

Se comprueba que estos sistemas de bombeo solar son económicamente más viables que aquellos que emplean pequeños motores de combustión interna, resaltando además que durante el funcionamiento de estos la producción de emisiones de carbono es 0.

TITLE

Study and implementation of a solar pumping system for a low-cost irrigation system.

AUTHORS

Méndez Álvarez, A.; Sáenz Pisaca, D.; Álvarez Acosta, C.

KEY WORDS

Solar pumping, low cost irrigation.

ABSTRACT

Two solar pumping systems were designed, installed, evaluated and implemented in a "low cost irrigation" system previously designed at the Higher Polytechnic School of Engineering. The first one, called "simple", consists of the photovoltaic panel, a voltage regulator, a submersible pump and a filter. The second, called "complex", presents other elements that protect and automate the management.

After the study, it was found that both systems efficiently fulfill their purpose. The volumes of water that could elevate the systems, the irrigable surface and the cost of elevation of the m^3 were determined experimentally, according to our environmental conditions. The values obtained for the parameters mentioned were 4800 L/day, 1000 m^2 and 0.045 €/m³ for the simple and 3800 L/day, 800 m^2 and 0.091 €/m³ for the complex.

It is verified that these solar pumping systems are economically more viable than those that use small internal combustion engines, also highlighting that during the operation of these the production of carbon emissions is 0.

1.-ANTECEDENTES

El déficit de electricidad, la escasez de agua y la inseguridad alimentaria como consecuencia de la falta de recursos hídricos, son algunos de los problemas principales de muchas comunidades rurales desfavorecidas situadas en diferentes regiones del globo. El agua juega un papel importantísimo en el desarrollo de cualquier país, pudiéndose afirmar que el nivel de vida depende en gran medida de la cantidad y calidad de la misma. En muchas regiones, esta se obtiene principalmente de ríos, arroyos o pozos. Cuando el volumen demandado es superior al que se puede extraer mediante bombeo manual, y teniendo en cuenta que la red eléctrica no suele estar disponible, se recurre al bombeo diésel o de gasolina. En estas condiciones, se agravan aún más los problemas para las comunidades, pues deben de hacer frente a los costos de combustible, de mantenimiento, y al hecho de tener, por lo general, un suministro intermitente.

2.- INTRODUCCIÓN

En el año 2010 el alumno Israel Regüengo Álvarez presentó en esta Escuela un Trabajo Fin de Grado titulado “Estudio sobre el reciclado de tuberías de polietileno y su utilización en sistemas de riego de bajo coste”. En el mismo, se estudiaba la posibilidad de reciclar las tuberías de polietileno desechadas por la actividad agrícola para fabricar nuevas, que pudieran formar parte de instalaciones de riego sencillas, económicas y de bajo requerimiento energético. En la segunda parte del mencionado trabajo, se diseñó un sistema de riego de esas características, denominado “de bajo coste”. La instalación fue diseñada y evaluada en los campos experimentales de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de la Universidad de La Laguna. Esta constaba entre otros elementos, de un depósito elevado dos metros sobre el nivel del terreno desde el que se riega por gravedad y al que hay que elevar el agua para su llenado antes de cada riego.

Este trabajo pretende estudiar la implementación de un sistema de bombeo solar que dote a la mencionada instalación de una absoluta autonomía energética.

3.- OBJETIVOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el de diseñar y estudiar dos sistemas de bombeo solar que sean económicos, eficientes y sencillos, ya que éstos sistemas de bajo coste están concebidos para ser utilizados en regiones pobres de los continentes africano, asiático y americano. Por ello, el éxito y sostenibilidad de los mismos está fundamentado en su economía y en la simplicidad de su manejo, mantenimiento y reparación.

El primero, que denominaremos “simple”, se diseñará con la máxima simplicidad, es decir, con un panel solar, un regulador de tensión y una bomba sumergible de corriente continua. El segundo, el cual llamaremos “complejo” para diferenciarlo del anterior, integrará también una batería, un regulador electrónico con capacidad para gestionar el funcionamiento del sistema panel-batería-motor y unos interruptores de nivel de líquido que permitirán automatizar el funcionamiento del sistema.

No solo se propone diseñar los dos sistemas, sino evaluar su funcionamiento en condiciones de campo e identificar sus fortalezas y debilidades cuando los comparamos entre sí. Por último, se pretende calcular el costo de las instalaciones y la superficie de cultivo que puede ser regada por cada uno.

4.- ESTRUCTURACIÓN DEL TRABAJO

Como se mencionó en los Objetivos de este trabajo, se pretende:

- Diseñar y montar dos sistemas de bombeo solar para elevar agua desde reservorios o pozos poco profundos a un depósito que se encuentra elevado 2 m sobre el suelo.
- Estudiar las prestaciones de los dos sistemas y medir los parámetros técnicos de su funcionamiento (“Prestaciones de los sistemas”).
- Estudiar el comportamiento del sistema denominado “complejo” en condiciones de campo, durante un periodo que corresponde al ciclo completo de cultivo de una especie hortícola (“Evaluación de campo”).

- Estimar la superficie de riego a la que pueden atender los dos sistemas (“Superficie regable”).
- Presupuestar ambos sistemas y calcular el costo de elevación del m³ (“Presupuesto y costo de elevación”).

Para ordenar la exposición de este TFG y debido a que son varias las experiencias que se han llevado a cabo, se expondrán estas por separado, describiendo el material y métodos empleados en cada una, así como los resultados y discusión.

Previo a ello se han incluido los puntos: 5 donde se hace una breve exposición de la tecnología de bajo coste que ha sido desarrollada para la extracción y aplicación del agua de riego de forma localizada, el 6, donde se realiza una revisión bibliográfica de los bombeos solares aplicados a países y comunidades desfavorecidas, y el punto 7, donde se describen pormenorizadamente los dos sistemas que se quieren evaluar.

5.- TECNOLOGÍA DE BAJO COSTE PARA EXTRACCIÓN DE AGUA Y EL RIEGO

5.1.- SISTEMA DE BOMBEO MANUAL

Aunque no es objeto directo del trabajo, se describirán algunos sistemas de bombeo de tracción humana y de riego de bajo coste, por constituir los primeros una de las alternativas a los sistemas que se estudian en este Trabajo, y los segundos, los sistemas de riego que se van a implementar.

En lo referente al bombeo, una de las soluciones más económicas y simples para garantizar el suministro son las bombas de motricidad humana. Existen diversos tipos, destacando las de mecate y de pedal.

Las bombas de mecate o sogas, se pueden construir a partir de materiales locales o reciclados y su fabricación es relativamente sencilla y rápida.

Está formada por una rueda, una soga a la que se fijan pistones, un tubo de PVC y un cabezal de guía situado en el fondo del pozo. La soga es arrastrada desde la parte superior hasta el interior del pozo debido a la acción de la rueda. Abajo, pasa por el

cabezal de guía, que modifica la posición de los pistones. Finalmente, el agua sube a la superficie a través de un tubo de salida, llevando el agua captada entre los pistones en el momento de su entrada al tubo. Permite el bombeo desde 7 hasta 35 metros (Wikiwater, 2018a).

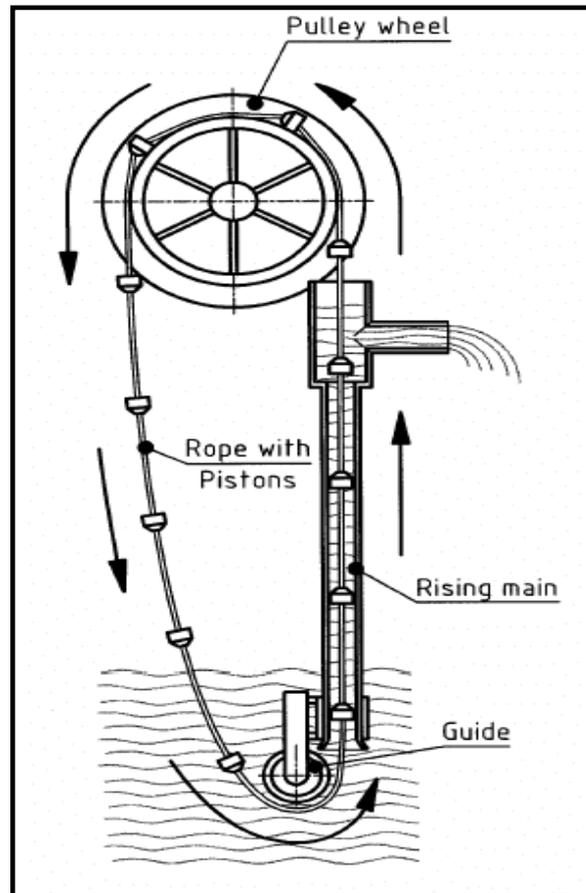


Figura 1: Esquema de funcionamiento de la bomba de mecate (SKAT, 2005).

Las bombas de pedal son un medio generalmente poco costoso y de fácil mantenimiento. Se trata de bombas hidráulicas muy simples accionadas con el pie, utilizadas a poca profundidad (menos de 7 metros) y generalmente para regar pequeñas superficies. Su funcionamiento se basa en el movimiento de los pistones por medio de la acción de los pedales y el cierre y apertura de las válvulas de las que está provisto. Al presionar sobre los pedales, los pistones bajan, se abren las válvulas y el agua sale. Cuando los pistones vuelven a subir, se cierran las válvulas y el agua asciende (Wikiwater, 2018b).

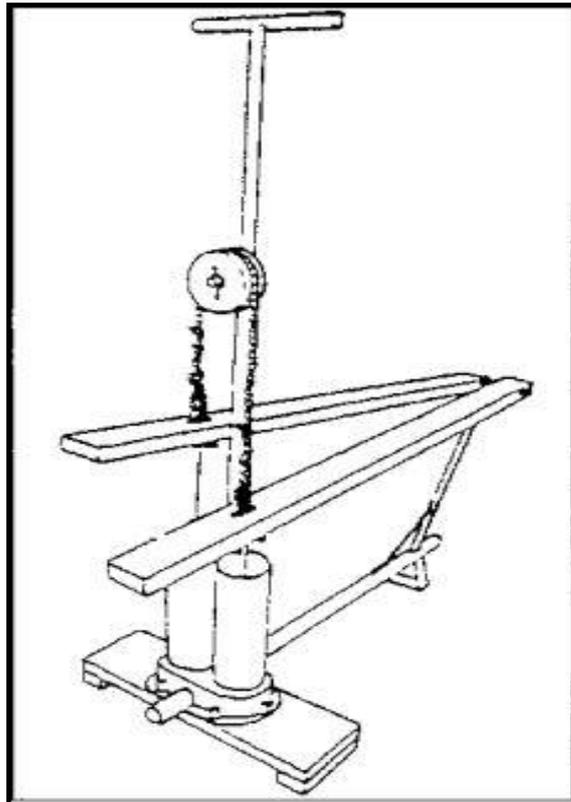


Figura 2: Bomba a pedales. Wikiwater (2018b).

En cuanto al filtrado, son interesantes los filtros de bambú realizados en la India. Este filtro cuesta alrededor del 20 % del costo de un filtro convencional (NWP, 2006).

5.2.- SISTEMAS DE RIEGO DE BAJO COSTE

Desde hace varias décadas, distintas organizaciones se han centrado en el desarrollo de sistemas de riego localizados sencillos y económicos, pretendiendo satisfacer las necesidades y demandas de las comunidades rurales más desfavorecidas. Por lo general, estos sistemas se componen de un depósito elevado respecto al nivel del suelo, y una red de tuberías que conducen el agua a los emisores de riego. El grado de complejidad varía entre los diferentes sistemas (Sáenz Pisaca *et al.*, 2012). A continuación se comentarán algunos de los kits desarrollados:

- Kits de cubo Chapin: En estos sistemas, el agua fluye hacia las líneas de goteo desde un depósito-cubo situado 0,5-1 m por encima del suelo, para proporcionar la presión de agua requerida (Awulachew *et al.*, 2015).

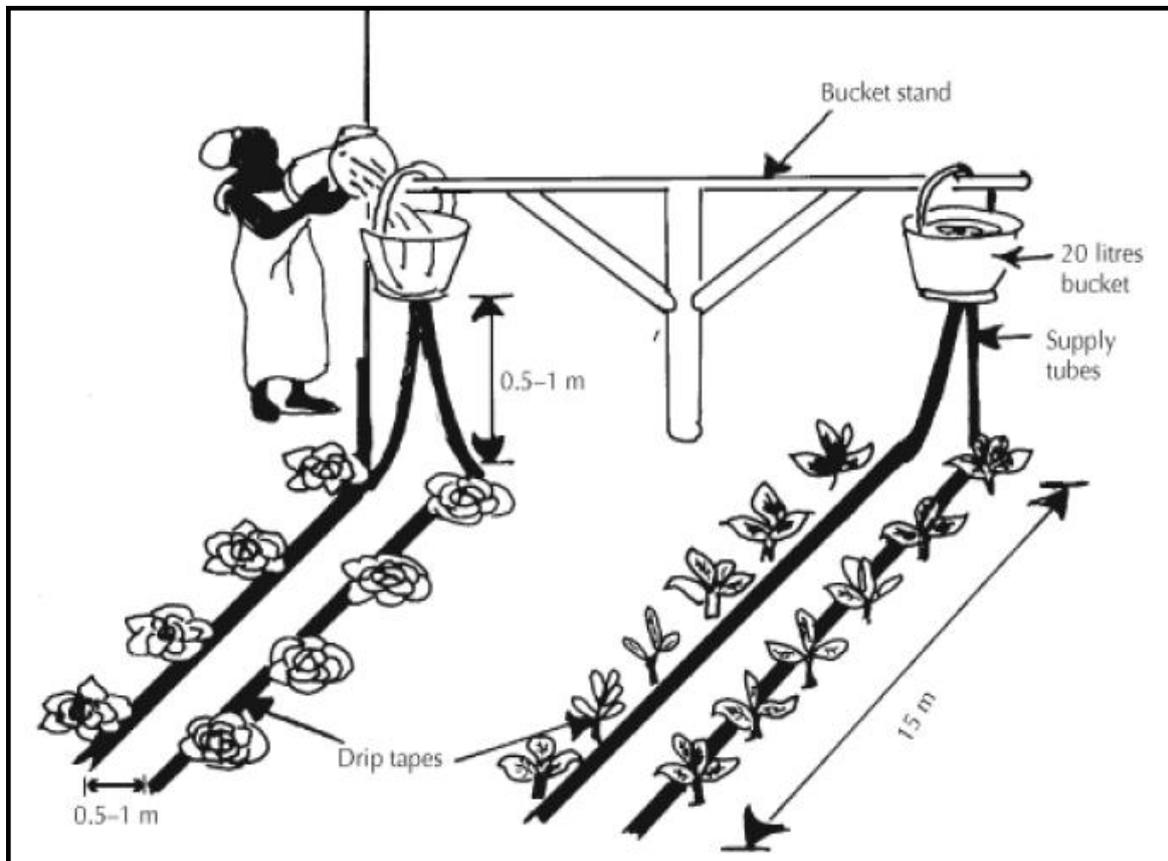


Figura 3: Kit de cubo Chapin. International Water Management Institute (2015).

- Kit de cubo IDE (International Development Enterprises): Consiste en un cubo de 20 litros, una válvula, un filtro, un lateral de 10 metros equipado con 26 microtubos, y una tapa para cerrar el extremo de dicho lateral. Puede regar aproximadamente 104 plantas (alrededor de 25 m²), con 4 plantas situadas en cada microtubo (Awulachew *et al.*, 2015).

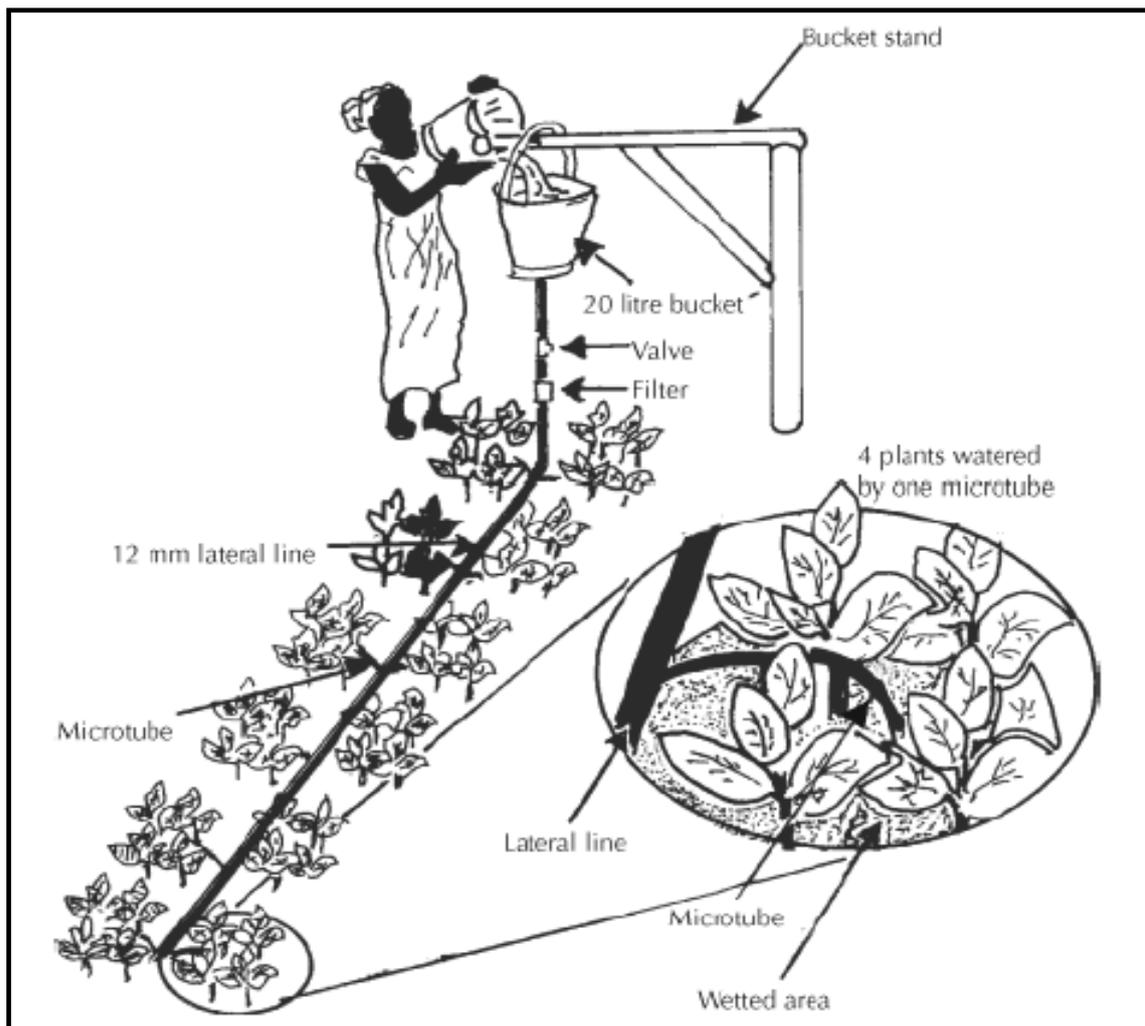


Figura 4: Kit de Cubo IDE. International Water Management Institute (2015).

- Waterboys kit: Se compone de un cubo de 30 litros y dos líneas de riego de 10 metros, con las salidas para el goteo espaciados 30 cm. Este sistema no incluye ningún tipo de filtro (Awulachew *et al.*, 2015).

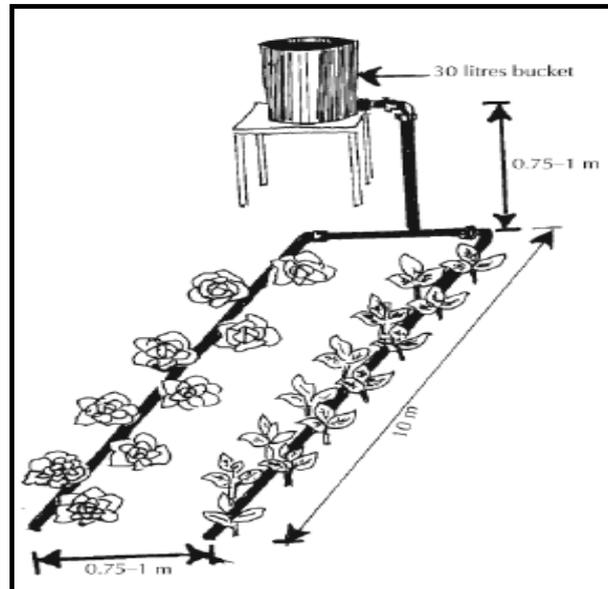


Figura 5: Waterboys Kit. International Water Management Institute (2015).

- Sistemas de tambor KARI de Kenia: Es una variación del cubo Chapin. Se utiliza un depósito de 200 litros, situado a 1 metro de la superficie del suelo. KARI mejoró la adaptación del tambor diseñando el colector con cuatro o cinco aberturas, cada una con dos líneas de goteo (Awulachew *et al.*, 2015).

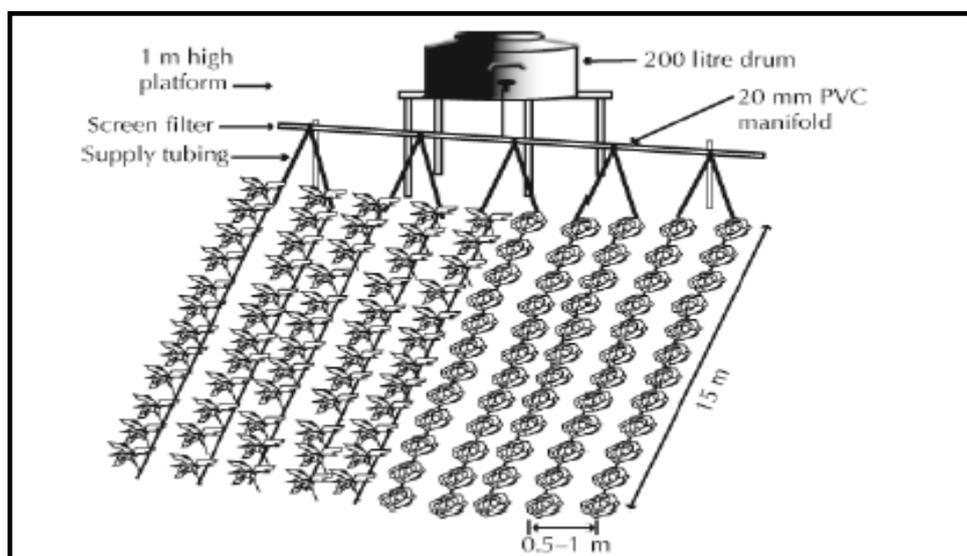


Figura 6: Sistema de tambor Kari. International Water Management Institute (2015).

- Sistema de tambor IDE: Este kit consta de un depósito de 200 litros, una válvula, un filtro de malla y 130 microtubos de 1 mm de diámetro montados en 5 laterales de polietileno de 12 mm de diámetro. Estos laterales están conectados al depósito por medio de una tubería de 16 mm. Una pequeña válvula plástica está unida al depósito. Con este kit se puede regar aproximadamente 100 m² (Awulachew *et al.*, 2015).

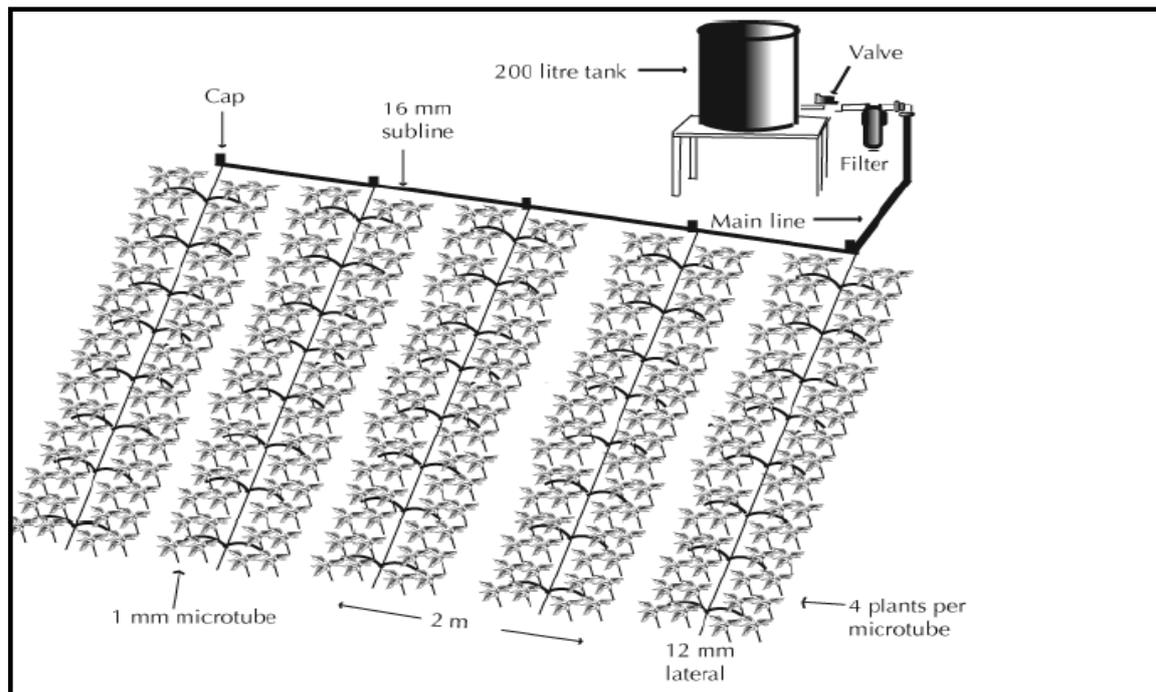


Figura 7: Sistemas de tambor IDE. International Water Management Institute (2015).

6.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO

Con el fin de conocer los antecedentes en esta materia, se ha llevado a cabo una revisión bibliografía referente al bombeo solar fotovoltaico, cuyo resumen expongo a continuación.

Mohammed Wazed *et al.*(2018) ha realizado investigaciones sobre la tecnología para el riego y suministro de agua potable en comunidades que utilizan energía solar fotovoltaica. El estudio se centró en las actualizaciones de la tecnología, en la eficiencia, en el correcto dimensionamiento de los paneles, y en los aspectos económicos y ambientales. Comprobó que los sistemas fotovoltaicos eran más viables en las zonas rurales y remotas respecto a los sistemas diesel convencionales, con un tiempo de amortización de entre 4 y 6 años. Observó que para pozos de poca profundidad (10-20 m), los sistemas de bombeo de corriente continua de baja tensión proporcionan unos rendimientos similares al bombeo con corriente alterna. Se determinó que los principales inconvenientes de estos sistemas eran la acumulación de polvo en los paneles, el calentamiento de los mismos, y la fluctuación de la irradiación solar. Para contrarrestar dichos problemas, se sugirió el uso de baterías correctamente dimensionadas y la pulverización con agua.

Este mismo autor publicó un estudio sobre la degradación que sufren los módulos expuestos en el campo. Para ello comprobó la evolución de un panel durante 28 años situado en la región del Himalaya occidental de la India. El panel fue utilizado para un bombeo fotovoltaico de agua de acoplamiento directo, siendo el objetivo principal del estudio identificar el impacto en la bomba causado por el deterioro del panel solar. Los defectos observados fueron la decoloración, oxidación, y formación de burbujas que causaban la delaminación en la hoja posterior. Se determinó que el panel se degradaba un 1,4 % cada año.

Deveci *et al.* (2015) diseñaron y desarrollaron un sistema de riego por goteo que utiliza energía solar fotovoltaica en Turquía, para una superficie de 1000 m². La parcela constaba de 100 árboles, determinando unas necesidades hídricas de 1450 l agua/día de junio a octubre. El sistema se componía de un temporizador automático, dos

paneles fotovoltaicos, una batería (14Ah, 12VDC) y la correspondiente bomba. Los autores aseguran que el uso de la batería disminuye el coste del sistema en un 63 %, lo que garantiza una mejor recuperación de la inversión.

Kumar *et al.* (2015) llevaron a cabo experimentos de campo y pruebas para ver la viabilidad de un sistema de riego por goteo por gravedad, alimentado con energía solar fotovoltaica, para una parcela pequeña de 18x 6 m. El estudio tuvo lugar en la India. El agua se bombeaba a un depósito de almacenamiento de 1000 l. El sistema de bombeo consistió en un panel solar de 148 W, una batería de 12 V con una capacidad de 50 Ah, un inversor, y una bomba de corriente alterna de 60 W. Se estableció que este sistema sería suficiente para el riego de 0,2 hectáreas de tierra.

Treephak *et al.* (2015) realizaron una evaluación económica comparando los sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua respecto a los alimentados con gasolina, para un cultivo de arroz. Este sistema consta del panel y 4 configuraciones diferentes. Motor de corriente continua con batería, motor de corriente alterna con batería, motor de corriente continua sin batería y motor de corriente alterna sin batería. Trabajando en las mismas condiciones, comprobaron que los sistemas con paneles solares ahorran \$280 cada año en costo de combustible. En cuanto a las distintas configuraciones, el sistema del motor de corriente continua sin batería proporciona el rendimiento económico más alto.

Hossain *et al.* (2015) estudiaron la conveniencia en la utilización de riego alimentado por energía solar en Bangladesh para el cultivo de arroz, berenjena, tomate y trigo. Se tuvo en cuenta tanto los aspectos técnicos como económicos. Las bombas se encontraban en 4 lugares diferentes y los rendimientos de las mismas se ensayaron midiendo la radiación solar, así como la tensión y corriente generada. Se empleó tanto el método de riego por goteo como por surco. Excepto en el arroz, para el resto de los cultivos fue viable consiguiéndose en el caso del riego por goteo un ahorro del 50 % del agua en tomate y berenjena.

Gopal *et al.* (2013) determinaron que la energía fotovoltaica, eólica y un sistema híbrido que combina las dos energías anteriores, eran las mejores opciones dadas las condiciones de la India, en comparación con la tecnología diesel.

Se sabe que la temperatura de las células afecta significativamente al rendimiento de los colectores fotovoltaicos. Mahjoubi *et al.* (2014) desarrollaron un modelo analítico para estimar la temperatura de la célula al variar la irradiación solar y la temperatura ambiente. Los autores informaron que a una temperatura de 25°C, las células fotovoltaicas individuales podrían alcanzar los 45°C. Kordzadeh (2010) informó de que una posible solución consiste en cubrir el generador fotovoltaico con un film fino de agua para reducir la temperatura de la célula en funcionamiento. Abdolzadeh y Ameri (2009) sugirieron la pulverización de agua intermitente en lugar de usar el film anterior con el fin de conseguir una reducción de la temperatura de la célula. Los resultados del análisis indicaron un aumento de la velocidad de flujo de salida del agua entre un 15 y 30%.

También se ha estudiado como afecta el sombreado al rendimiento general de los sistemas. Mohammedi *et al.* (2014) midieron la productividad de diferentes configuraciones bajo sombra parcial en Bugia, Argelia. Tras analizar los resultados obtenidos, llegaron a la conclusión de que la influencia del sombreado es difícil de modelar, pues depende de muchos parámetros, como la configuración de la matriz fotovoltaica, la tasa relativa de sombreado y el área sombreada del módulo. Recomienda la instalación de un control MPPT ((Maximum Power Point Tracker).

Kaunmuang *et al.* (2001) evaluaron el rendimiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico en Tailandia tras 10 años de funcionamiento. Se informó que aproximadamente el 45 % de los sistemas fallaron en el funcionamiento prolongado. Sin embargo, la mayoría de los fallos se debieron a obstrucciones de la bomba y tuberías en lugar de problemas en el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos.

Mokeddem *et al.* (2011) estudiaron el rendimiento de un sistema de bombeo fotovoltaico acoplado directamente durante un período de 4 meses. El sistema incluía

una bomba centrífuga, un motor de corriente continua, y un panel fotovoltaico. Carecía de batería y controladores electrónicos. Se comprobó que la eficiencia del conjunto motor- bomba fue alrededor del 30 %.

Yahya y Sambo, (1995) diseñaron e instalaron un sistema de bombeo de agua solar para reemplazar un sistema eléctrico existente en la Universidad Usmanu Danfodiyo (Nigeria). El sistema constaba de 28 módulos solares fotovoltaicos de 60 Wp conectados en serie. Para 800 w/m^2 de radiación solar y 34°C de temperatura, se alcanzó un caudal de $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$ desde un pozo con nivel freático situado a 30 metros de profundidad.

Kolhe *et al.* (2004) analizaron el rendimiento de un motor de corriente continua acoplado a una bomba centrífuga en diferentes intensidades solares y temperaturas de la célula. Los resultados experimentales obtenidos se compararon con los valores previamente calculados. Los autores informaron que al cambiar la orientación del de los paneles fotovoltaicos, tres veces al día, poniéndolos de cara al sol, la energía producida puede aumentar un 20 %. Este mismo autor ha llevado a cabo estudios donde analiza el rendimiento de un sistema de bombeo de agua acoplado directamente.

Chandel *et al.* (2017) investigaron las cuestiones ambientales relacionadas con el bombeo fotovoltaico y diesel. Estudiando los aspectos técnicos y económicos llegaron a la conclusión de que el bombeo usando paneles solares es más eficiente económicamente que los sistemas diésel o gasolina, y además, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

Reca *et al.* (2016) llevaron a cabo un estudio de la viabilidad sobre la instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico para el riego de los invernaderos en el Mediterráneo. Los componentes del sistema fueron modelados matemáticamente y un programa informático fue desarrollado para simular el funcionamiento del riego. Los resultados mostraron que el rendimiento óptimo del sistema se podía lograr regando un solo sector en vez de múltiples sectores.

Moulay-Idriss y Mohamed (2013) elaboraron un método de control inteligente para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) bajo diferentes temperaturas y condiciones de radiación.

Yahya y Sambo (1995) propusieron un algoritmo para determinar el tamaño de los elementos de un sistema solar fotovoltaico, determinando la superficie óptima de paneles, la capacidad necesaria de batería y el volumen del tanque de almacenamiento teniendo en cuenta la radiación solar, número de días de autonomía y los datos climáticos para una granja de tomate de 10 ha en el norte de Túnez. La fiabilidad del algoritmo se muestra comparando el tamaño de los componentes dados por el software de Homero.

Rehman y Sahin, (2015) compararon el rendimiento y la viabilidad económica tanto de los sistemas diesel como de los fotovoltaicos, en diferentes ubicaciones geográficas de Arabia Saudí. Llegaron a la conclusión de que el sistema basado en bombeo solar, en 5 localizaciones del país resultará en la eliminación de aproximadamente 600.000 t de gases de efecto invernadero durante el tiempo de vida del proyecto. Además, podrían ahorrarse 8900 l de diesel.

Pande *et al.* (2003) desarrollaron un sistema de riego por goteo con energía solar fotovoltaica para las regiones áridas en la India, considerando diferentes parámetros de diseño como el tamaño de las bombas, los requisitos hídricos, la variación diurna de la presión debido al cambio de radiación y la compensación de presión en los goteros. El sistema está formado por un campo fotovoltaico de 900 W y un motor monobloque de 800 W de corriente continua, microfiltros y tres goteros de baja presión en cada planta. Con esta instalación, se determinó que se podría irrigar un área de 1 ha en un periodo de 2 horas. Puede proporcionar entre 70 – 100 kPa de presión.

Carr *et al.* (2004) Evaluaron el funcionamiento de 5 módulos fotovoltaicos de distintos fabricantes y tecnologías en Australia durante 16 meses de funcionamiento al aire libre. Los resultados indicaron que los paneles de silicio monocristalino y policristalino muestran una reducción de potencia del 2 % por año.

Mahmoud *et al.* (2013) estudiaron la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos en zonas remotas de Egipto comprobando que son eficientes para el bombeo de agua en los sectores agrícolas. Su costo operativo también es bajo en comparación con los sistemas de bombeo de agua del motor diesel.

Hamidat *et al.* (2003) investigaron la idoneidad de estas tecnologías para el riego de cultivos como trigo y papas. Llegaron a la conclusión de que los sistemas fotovoltaicos podrían bombear el agua eficientemente en el riego de superficies menores a 2 ha.

William *et al.* (2016) estudiaron, diseñaron y evaluaron el rendimiento del bombeo fotovoltaico de bajo coste para las condiciones meteorológicas de Kumasi, Ghana. Se empleó una bomba centrífuga con un motor de corriente continua directamente acoplado a un panel fotovoltaico de 400 W (60 V, 6,67 A). Determinaron que se podría conseguir unos ahorros aproximados del 60% si la bomba se fabricara localmente.

Meah *et al.* (2008) diseñaron, instalaron y comprobaron el rendimiento de un sistema solar para el bombeo a pequeña escala en ubicaciones remotas situadas al Oeste de Estados Unidos, dentro de un proyecto de colaboración de la universidad de Wyoming. Comprobaron que los sistemas fotovoltaicos son una manera eficaz y respetuosa para bombear agua en lugares remotos.

Cloutier y Rowley (2011) estudiaron la viabilidad de las fuentes de energía renovables para el bombeo de agua limpia en el África subsahariana. Tras el estudio, observaron que pese a que los costes de capitales iniciales de los bombeos fotovoltaicos son significativamente más altos que los sistemas basados en gasolina, el coste durante su funcionamiento es mucho menor. Concluyeron que la energía fotovoltaica es la mejor opción para el bombeo de agua en esa región.

7.- DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

7.1.- DESCRIPCIÓN Y COMPONENTES DEL SISTEMA "SIMPLE"

Este sistema es el bombeo solar fotovoltaico más simple que se puede diseñar. Constará esencialmente de un panel fotovoltaico, un regular de tensión y una electrobomba sumergible de corriente continua (DC).

Su descripción gráfica se realiza en el siguiente croquis:

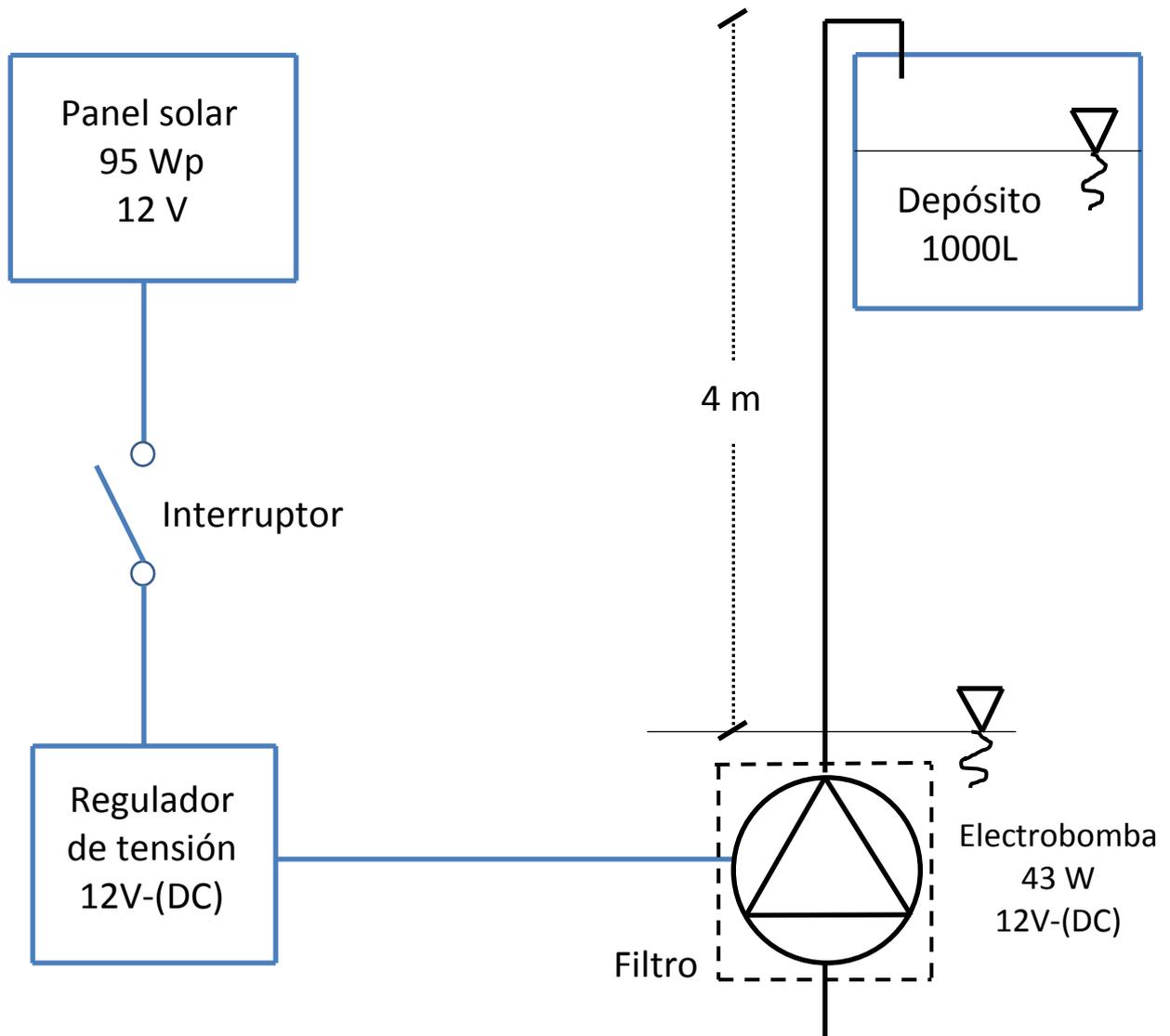


Figura 8: Esquema de la instalación del sistema "simple".

Los componentes que conforman este sistema son los siguientes:

BOMBA

La electrobomba empleada es sumergible. Al encontrarse bajo la superficie del agua, esta estará siempre en carga, evitando los problemas de funcionamiento ocasionados por la inclusión de aire en la tubería de aspiración. Es una bomba centrífuga, con un pequeño impulsor fabricado de teflón.

Su motor es de corriente continua, no requiriendo por tanto la actuación de un inversor DC/AC. Al ser un motor sin escobillas (denominado “brushless”), presenta la ventaja de reducir al mínimo las operaciones de mantenimiento y de tener un rendimiento elevado.

Para dimensionar la electrobomba empleada se recurrió a examinar la curva característica que relaciona caudal impulsado con la altura a la que es capaz de elevar dicho caudal. La altura de referencia era de 4 m. Esta corresponde a una altura geométrica de elevación de 3,5 m + 0,5 m de pérdida de carga en el circuito hidráulico. El caudal de referencia fue de aproximadamente 400-500 L/h. Este resulta de considerar una demanda del cultivo de 4 mm/día, una superficie de 500 m² y 4-5 horas de máxima insolación.

Las características de la electrobomba empleada se especifican en la siguiente tabla.

Tabla 1: Especificaciones de la bomba.

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Modelo | DC50F-1280S |
| Material | PA66+GF30% |
| Potencia nominal | 43,2 W |
| Tensión nominal | 12 V |
| Intensidad nominal | 3,6 A |
| Caudal máximo | 16,7 l/min |
| Máxima altura de elevación | 8 m |
| Diámetro de la entrada | 20 mm |
| Diámetro de salida | 20 mm |
| Nivel de protección | IP68 |
| Vida útil | >30.000 h |
| Método de conducción | Sin escobillas, magnético |
| Dimensiones | 94x99x50 mm |

La curva característica proporcionada por el fabricante corresponde a la del modelo escogido: DC50F-1280

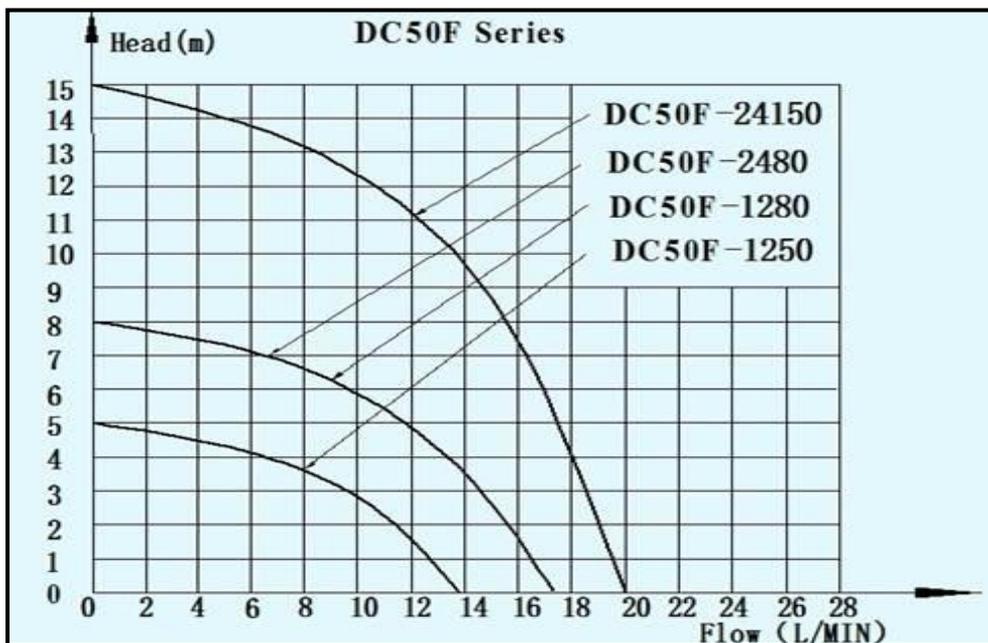


Gráfico 1: Curvas características de la bomba empleada (AliExpress, 2018).



Foto 1: Bomba (AliExpress, 2018).

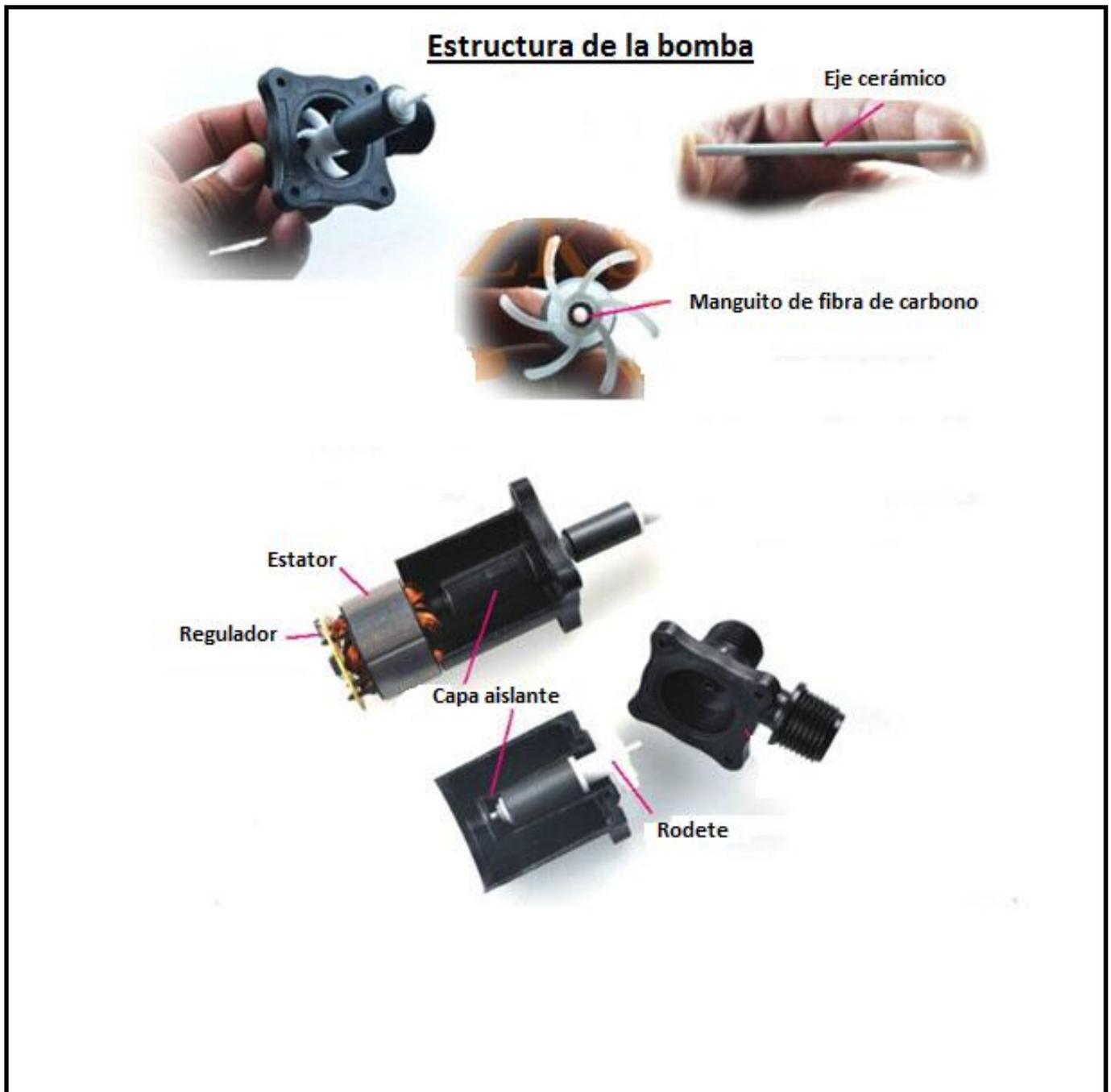


Figura 9: Componentes de la bomba. (Aliexpress, 2018).

FILTRO

Con el fin de evitar obstrucciones de la bomba, se ha fabricado un filtro de malla, en el interior del cual se alojó la bomba. Se fabricó en taller, partiendo de un tubo de PVC de 125 mm de diámetro, de 62 cm de longitud. Se perforaron 105 orificios de 15 mm de diámetro, y se recubrió de una malla de acero inoxidable de 50 mesh. Por la parte

superior se pegó una tapa ciega a la que se le practicaron dos orificios, uno para el paso de la manguera de impulsión y otro más pequeño para el conductor eléctrico que alimenta la electrobomba. Por la parte inferior se pegó una tapa roscada que permite el acceso al interior una vez instalado el filtro. La superficie total de la malla es de 2434 cm².

La electrobomba se instaló en el interior mediante bridas plásticas tal como se observa en alguna de las fotografías que muestran el proceso de fabricación.

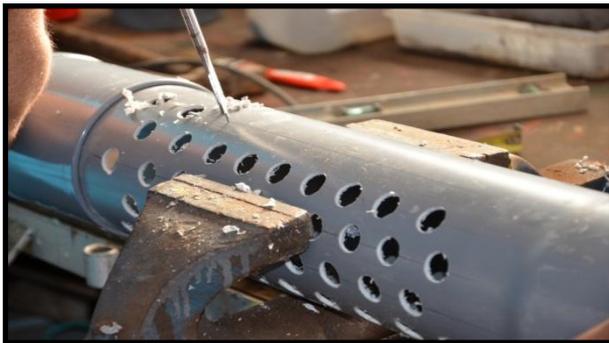


Foto 2: Fabricación del filtro.



Foto 3: Cuerpo del filtro.

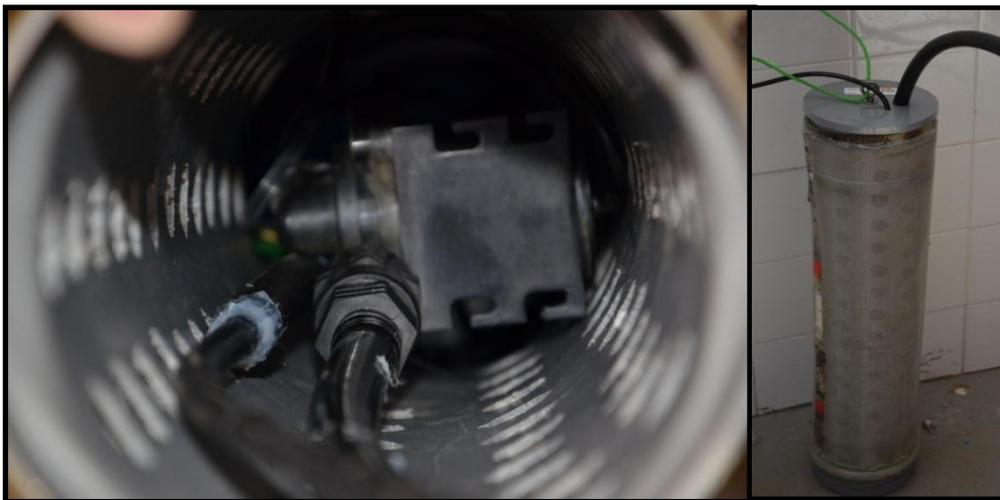


Foto 4: Interior y exterior del conjunto filtro-bomba.

PANEL FOTOVOLTAICO

El panel fotovoltaico es el generador de corriente eléctrica. Consiste en un conjunto de células, generalmente 36, conectadas entre sí en serie y paralelo hasta conseguir una potencia determinada. Tienen dos bornas de conexión, positiva y negativa. La corriente de salida de un generador es corriente continua y la potencia que este puede proporcionar dependerá principalmente de la irradiación solar y de la temperatura ambiente (Martín Jiménez, 2008).

El tipo de panel escogido para esta instalación fue de silicio monocristalino, de la empresa ATERSA.

Su potencia pico fue escogida considerando que va a dar corriente a una bomba de 43W de potencia nominal. Se optó por un panel de 95 Wp ya que esta potencia solo la alcanzará en condiciones óptimas de radiación, temperatura ambiente, orientación y limpieza. Por todo ello se tomó un factor de mayoración de 2.

Sus características se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2: Características del panel solar del sistema “simple”.

| | |
|---|--------------------|
| Potencia (W en prueba \pm 8%) | 95 Wp |
| Número de células en serie | 36 |
| Eficiencia del módulo | 14,32 % |
| Corriente Punto de Máxima Potencia (Imp) | 5,32 A |
| Tensión Punto de Máxima Potencia (Vmp) | 17,86 V |
| Corriente en cortocircuito (Isc) | 5,51 A |
| Tensión de circuito abierto (Voc) | 22,19 V |
| Dimensiones (mm \pm 2 mm) | 1224X542X35 |
| Peso (Aprox.) | 9,5 kg |



Foto 5: Panel solar de silicio monocristalino 95 Wp.

Se fabricó también un soporte de panel con perfil laminado en L de acero galvanizado. El ángulo de inclinación del panel fue de 30°.

REGULADOR DE TENSIÓN

Se utilizó un regulador de tensión de 12V. La tensión máxima de entrada es de 40V. La intensidad máxima, de 10 A. El exceso de energía lo disipa en forma de calor.

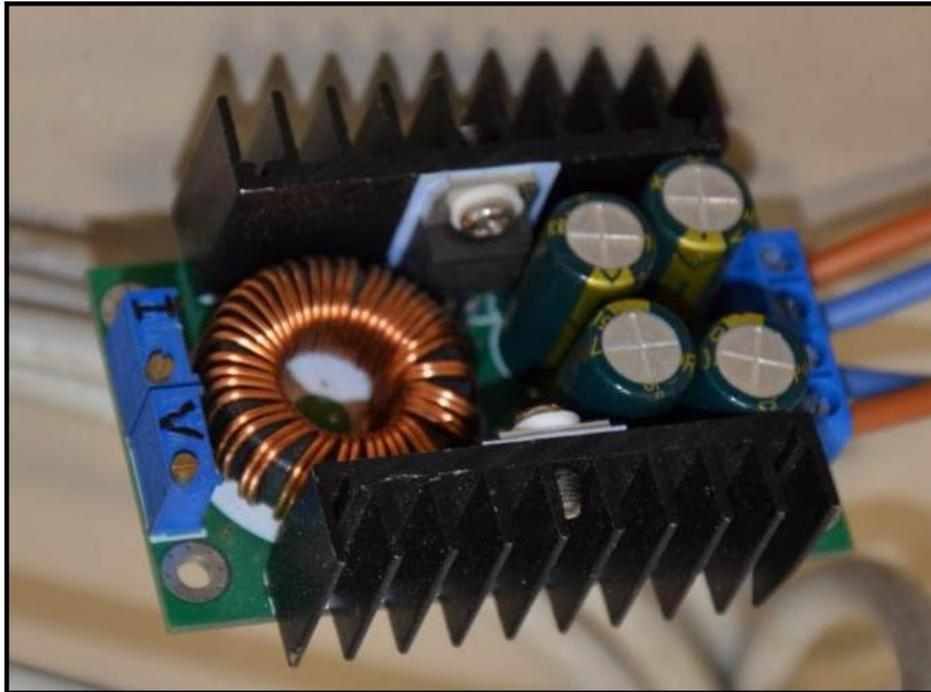


Foto 6: Regulador de tensión.

7.2.- DESCRIPCIÓN Y COMPONENTES DEL SISTEMA “COMPLEJO”

Este sistema incorpora una batería que puede acumular la energía generada por el panel fotovoltaico y suministrarla en momentos del día donde la radiación incidente no sea suficiente como para mantener la electrobomba en funcionamiento, aumentando la eficiencia de éste.

Para regular la carga de la batería y el funcionamiento del sistema cuando la electrobomba se encuentra funcionando, se incorpora también un regulador electrónico.

Para automatizar el llenado del depósito de riego y proteger a la bomba contra el funcionamiento en vacío, se añaden al sistema dos interruptores de nivel de líquido que, mediante un relé eléctrico, gestiona la parada del sistema cuando la situación lo exige.

Por último, se añaden también algunos elementos eléctricos de seguridad para proteger a los dispositivos contra cortocircuitos y sobre cargas. Para ello se dispone un fusible-cortocircuito y un interruptor automático magnetotérmico.



Foto 7: Caja con los mecanismos eléctricos y electrónicos del sistema

Su descripción gráfica se realiza en el siguiente esquema:

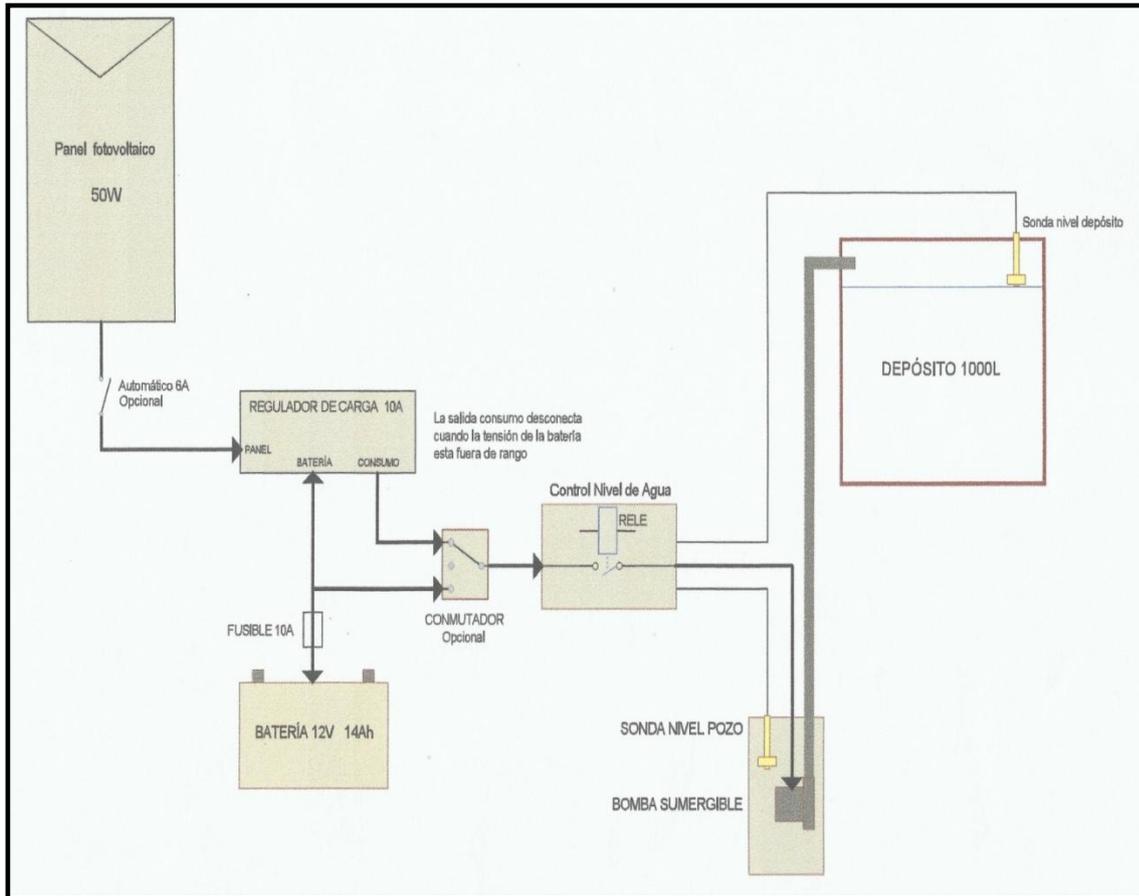


Figura 10: Esquema de la instalación del sistema "complejo"

El único componente principal que coincide en los dos sistemas es la electrobomba.

FILTRO

El filtro utilizado en este caso es casi idéntico al utilizado en el sistema "simple". La única diferencia radica en la instalación en su interior de la sonda de nivel de líquido, para lo que se ha tenido que practicar un orificio suplementario en la tapa.



Foto 8: Filtro con la salida de la sonda de nivel.

PANEL FOTOVOLTAICO

El tipo de panel escogido para esta instalación fue de silicio policristalino, de la empresa Victron Energy.

En este caso se eligió una potencia pico similar a la nominal de la electrobomba (50 Wp). Aunque por las circunstancias antes citadas el panel no sea capaz de suministrar toda la potencia que la bomba demanda a lo largo de las distintas horas del día, la batería se encargará de suplementar la misma.

Sus características se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3: Características del panel solar del sistema “complejo”.

| | |
|---|----------------------------------|
| Potencia (W en prueba \pm 8%) | 50 Wp |
| Número de células en serie | 36 |
| Eficiencia del módulo | Apróx 13,88 % (calculada) |
| Corriente Punto de Máxima Potencia (Imp) | 2,85 A |
| Tensión Punto de Máxima Potencia (Vmp) | 17,5 V |
| Corriente en cortocircuito (Isc) | 3,09 A |
| Tensión de circuito abierto (Voc) | 22,2 V |
| Dimensiones (mm \pm 2 mm) | 540x670x35 |
| Peso (Aprox.) | 5,3 kg |



Foto 9: Panel solar de silicio policristalino 50 W.

BATERÍA

Se escogió una batería de ácido-plomo de descarga profunda Xunzel Solarx-14 (12V14Ah-C120). Esta batería está diseñada para pequeñas instalaciones fotovoltaicas. La capacidad se eligió teniendo en cuenta la autonomía de abastecimiento del sistema.

Las características se presentan a continuación:

Tabla 4: Especificaciones de la batería

| | |
|--|--------------------|
| Celdas por unidad | 6 |
| Voltaje nominal (V) | 12 |
| Capacidad (Ah)-C120 | 14 |
| Peso (kg) | 3,6 |
| Dimensiones (mm) | 151x98x95 |
| Resistencia interna (mΩ) | 16 |
| Rango de temperatura de funcionamiento normal (°C) | 25 - 5 |
| Corriente de carga máxima recomendada (A) | 3,6 |
| Voltaje de flotación (V) | 13,7 - 13,9 |

Característica de vidas cíclicas

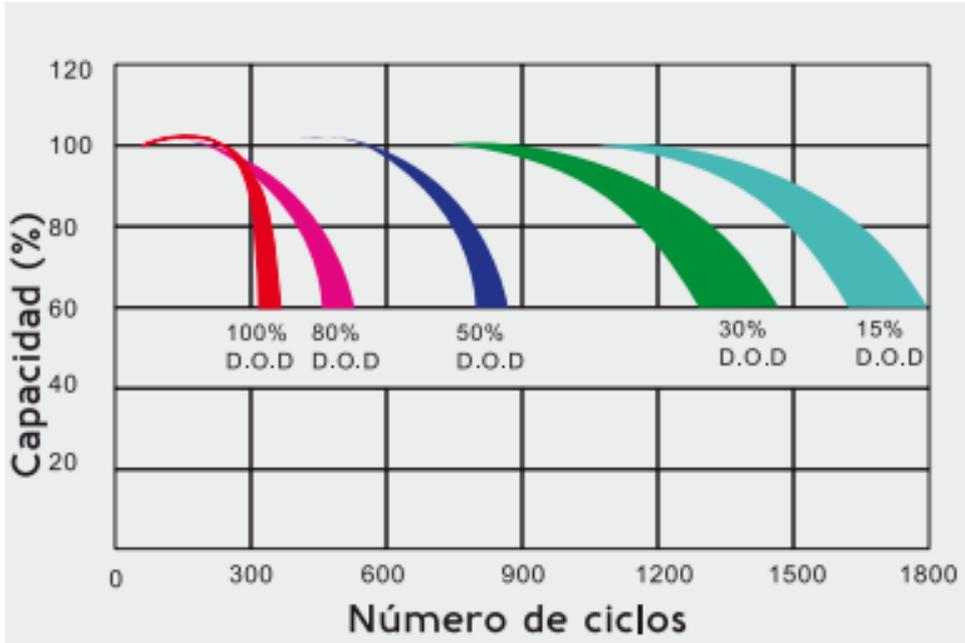


Gráfico 2: Vida de la batería en función del grado de descarga. Información del fabricante. Xunzel (2018). (D.O.D: Profundidad de descarga. Grado de agotamiento de la batería)

Característica de descarga

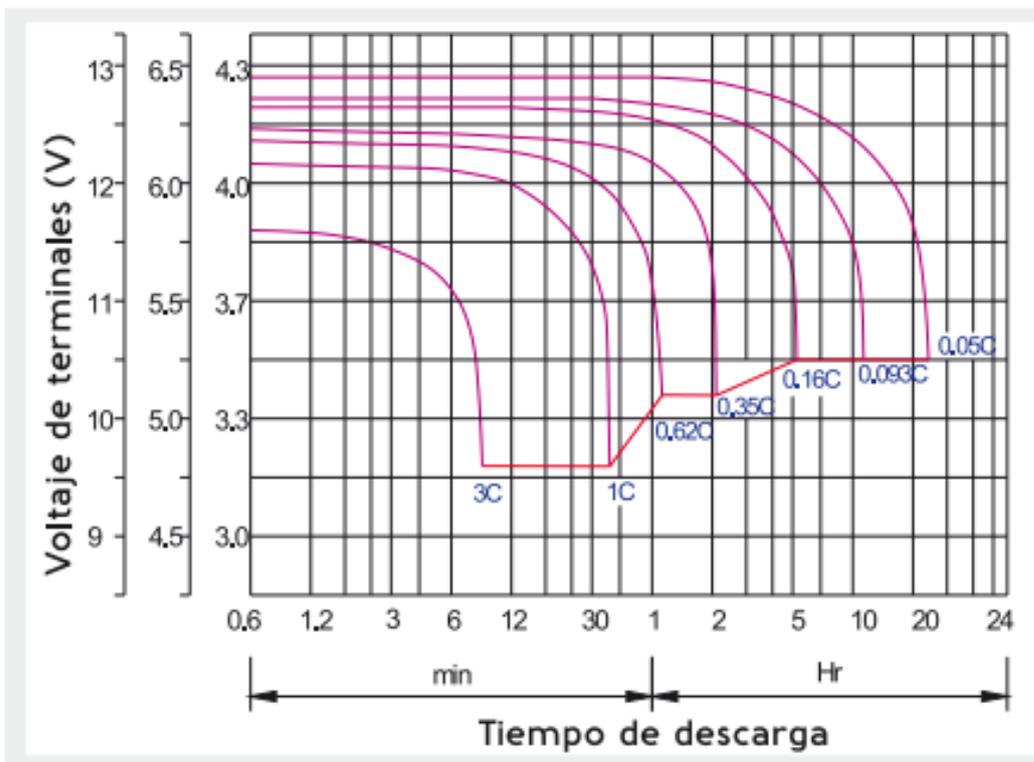


Gráfico 3: Características de descarga de la batería. Información del fabricante. Xunzel (2018).



Foto 10: Batería utilizada.

REGULADOR O CONTROLADOR DE CARGA SOLAR

El regulador de carga es un componente electrónico que se coloca entre el panel fotovoltaico y la batería, cuya misión es controlar el flujo de energía que circula entre ambos equipos. Cuando la batería llega a su máxima carga, debe impedir que esta siga cargando, ya que la diferencia de tensión descompone el líquido de la misma dando lugar a hidrógeno y oxígeno, afectando por tanto a la vida útil. Otra función de estos dispositivos es la de evitar las descargas profundas del acumulador (Martín Jiménez, 2008).

Existen dos tipos de reguladores, los denominados “Pulse Width Modulation” (PWM) y los “Maximum Power Point Tracking” (MPPT). Éstos últimos gestionan el sistema de manera más eficiente pero son mucho más costosos. Por dicha razón se eligió un controlador de 12/24V de 10A, del tipo PWM.

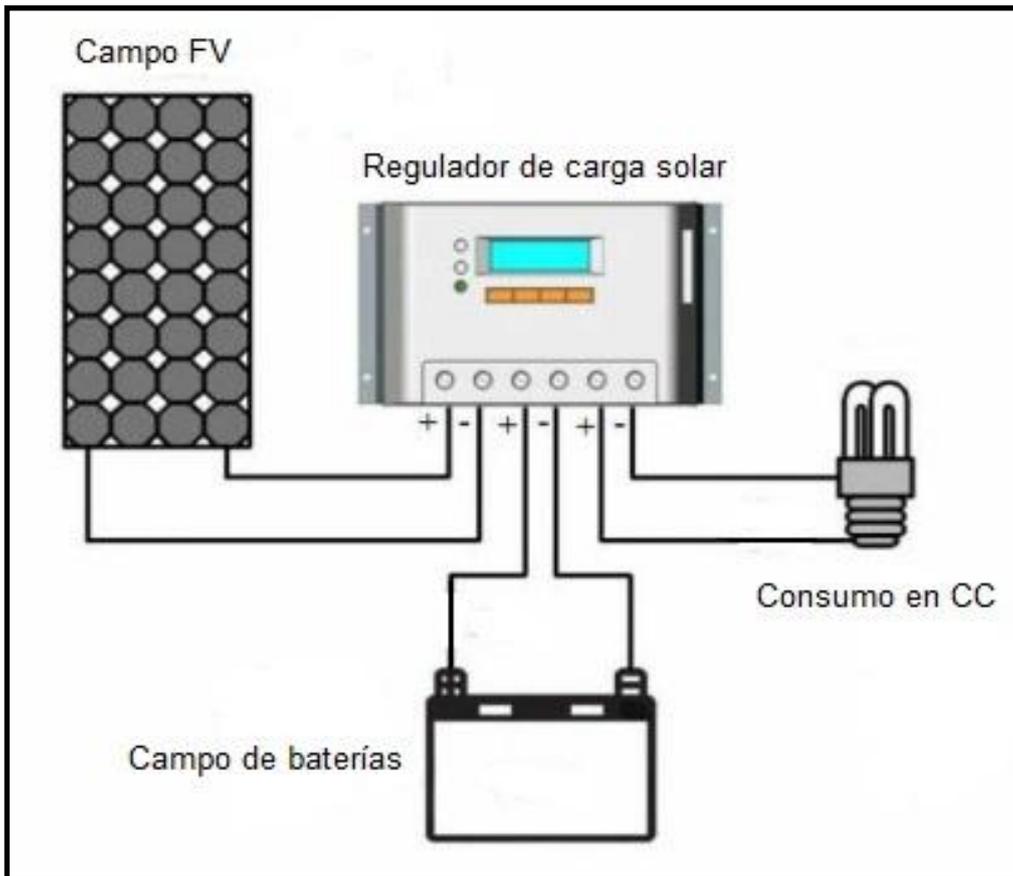


Figura 11: Esquema de instalación de un regulador de carga solar.



Foto 11: Regulador de carga empleado.

8.- EXPERIENCIA 1: DETERMINACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE LA ELECTROBOMBA DC50F-1280

8.1.- MATERIAL Y MÉTODOS

En el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería (Sección de Agrarias) de la Universidad de La Laguna se realizó un ensayo para corroborar las prestaciones de dicha bomba.

Se conectó la bomba a una fuente de alimentación, donde se regulaba la tensión de la corriente suministrada. Se obtuvieron curvas de caudal-altura de elevación a distintas tensiones de trabajo: 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 V. Se tuvo en cuenta la caída de tensión que se producía entre la salida de la fuente y la bomba.

El agua impulsada por la bomba se conducía de nuevo al depósito de partida. En el extremo de la tubería de impulsión se instaló una válvula de aguja. Cerrando más o menos dicha válvula se simulaban las distintas alturas de elevación, midiendo éstas a través de los transductores de presión. La señal de presión se transmitió por un tubo piloto que partía de una toma instalada en el comienzo de la tubería de impulsión. Cuando las presiones eran muy bajas, las alturas de presión se medían a través de un piezómetro.

En los cálculos de presión, se tuvo en cuenta la diferencia de alturas entre el nivel del agua del depósito y el transductor, así como las pérdidas de carga en la válvula de pie y la tubería de aspiración.

La determinación del caudal se realizó con un aforo manual, llenando un cubo de 20 litros, hasta aproximadamente el 75% de su capacidad y pesando el mismo en una balanza mecánica de triple brazo de 20 kg de capacidad y 1 g de resolución. El tiempo de llenado se midió con un cronómetro digital.

Se presenta a continuación fotografías de los materiales y medios utilizados:

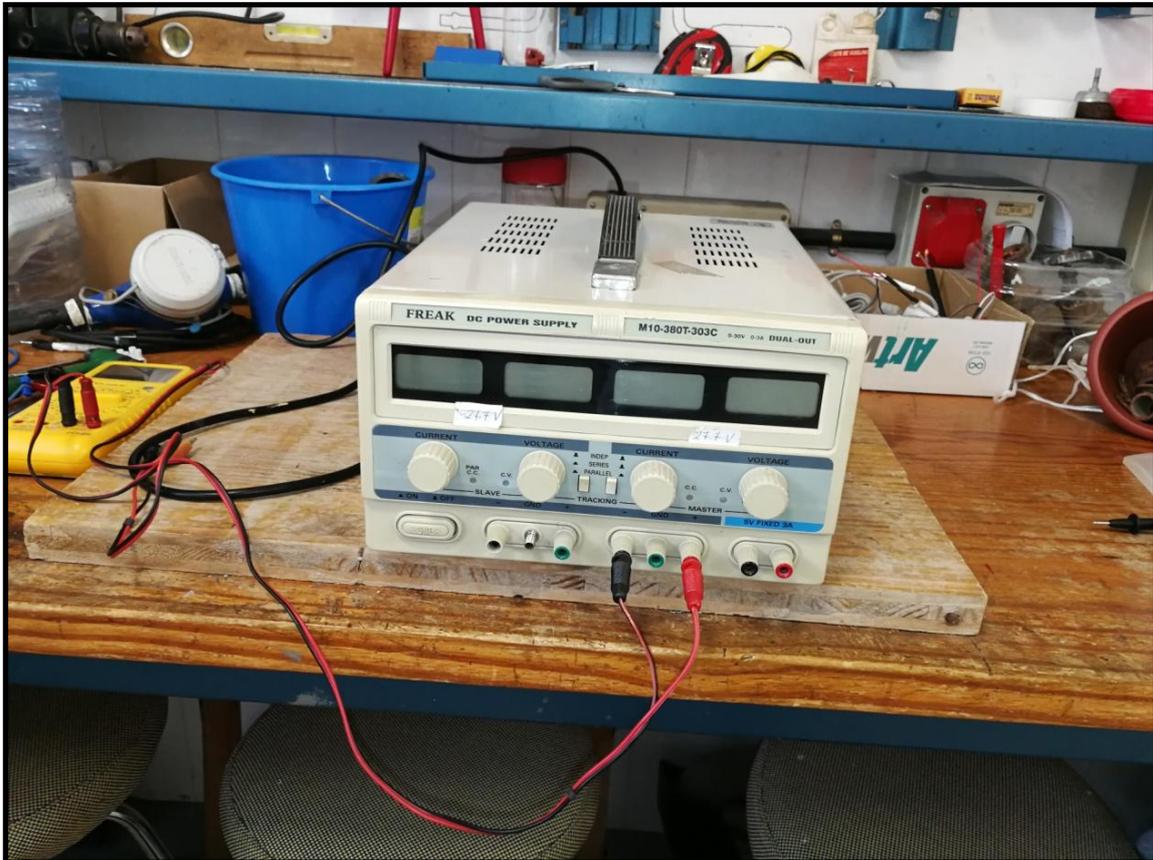


Foto 12: Fuente de alimentación.



Foto 13: Válvula de aguja instalada en el retorno.

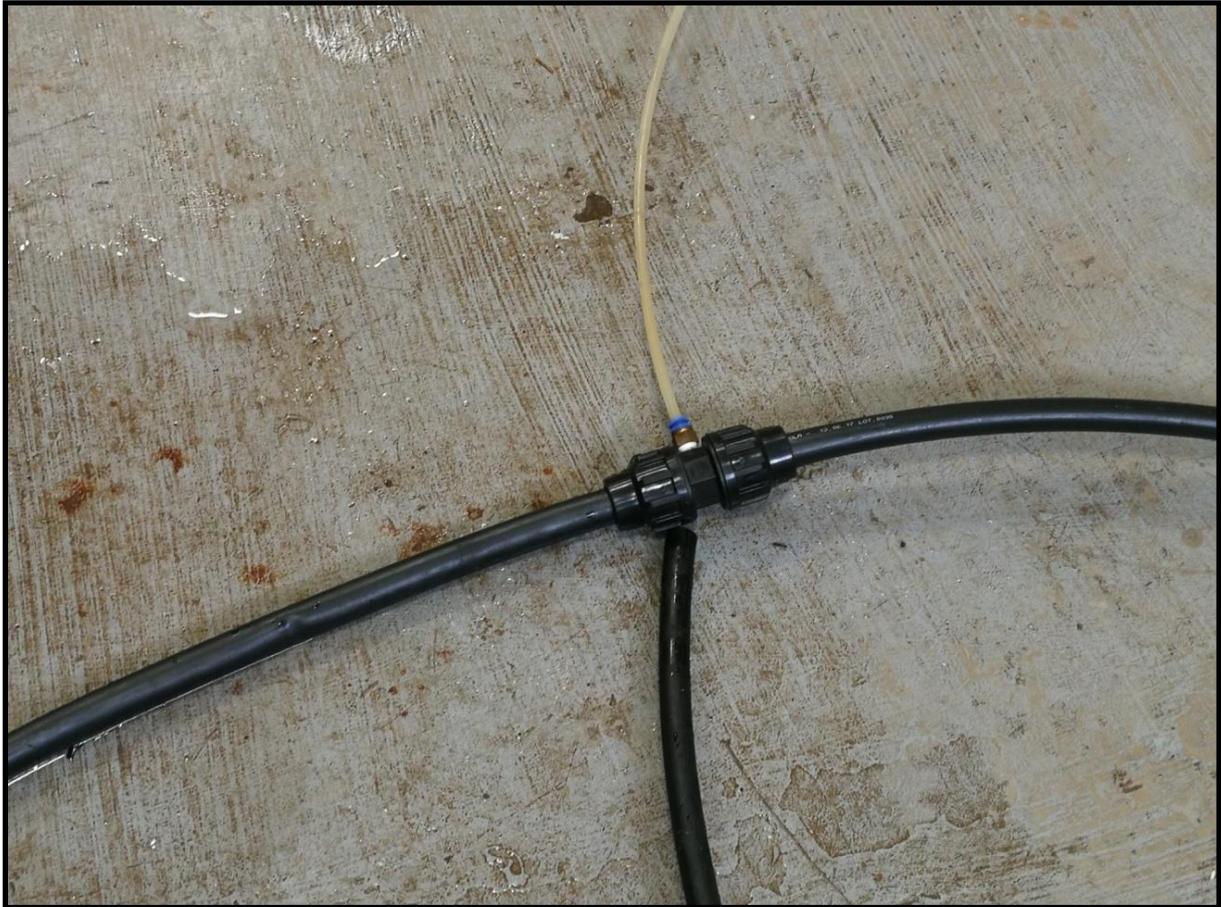


Foto 14: Toma manométrica y tubo piloto que conecta con el transductor de presión.



Foto 15: Detalles de la conexión. Vista general.



Foto 16: Detalles de la instalación.



Foto 17: Transductores de presión y manómetros Bourdon.

Para calcular la pérdida de carga se utilizó la fórmula de Blasius:

$$hf = 0,000789 * D^{-4,75} * Q^{1,75} * Le$$

hf: Pérdida de carga (m)

D: Diámetro interno de la tubería (m)

Q: Caudal (m³/s)

Le: Longitud equivalente de tubería (m)

8.2.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las pruebas quedan reflejados en gráfico 4.

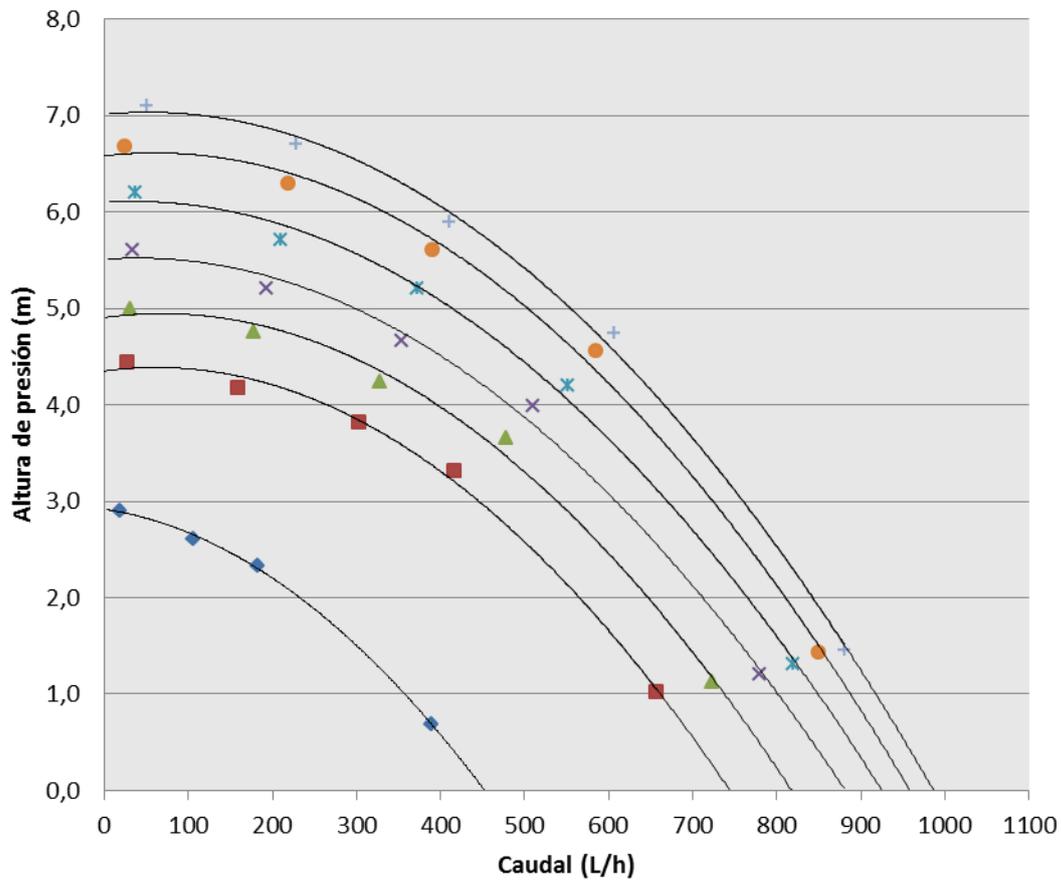
Comparando los datos obtenidos experimentalmente con los proporcionados por el fabricante, existen diferencias en el caudal impulsado y la altura elevada por la bomba.

Según el fabricante, la altura máxima de elevación trabajando a la tensión nominal (12V) es de 8 m, mientras que en nuestra experiencia apenas alcanzaba los 6,7 m. También en los caudales existen contradicciones. Mientras que la curva del fabricante indica un caudal máximo de 1050 L/h, los resultados experimentales lo sitúan en 970 L/h.

Al no conocer las condiciones en que se realizaron los ensayos por parte del fabricante, es difícil conocer la causa de dichas diferencias.

Para la altura de elevación considerada en las otras experiencias de este trabajo (4m), el caudal que correspondería según la curva aportada por el fabricante sería de 810 L/h, mientras que el obtenido de nuestra ecuación de ajuste experimental sería de 620 L/h.

Curvas características a distintas tensiones



| | |
|-------|------------------------------------|
| ◆ 7V | $H = -1E-05Q^2 - 0,0013Q + 2,9171$ |
| ■ 8V | $H = -9E-06Q^2 + 0,0012Q + 4,3511$ |
| ▲ 9V | $H = -9E-06Q^2 + 0,0012Q + 4,9044$ |
| × 10V | $H = -8E-06Q^2 + 0,000Q + 5,510$ |
| ✱ 11V | $H = -8E-06Q^2 + 0,0005Q + 6,1008$ |
| ● 12V | $H = -8E-06Q^2 + 0,001Q + 6,5832$ |
| + 13V | $H = -8E-06Q^2 + 0,0008Q + 7,0136$ |

Gráfico 4: Curvas características caudal-altura de presión de la bomba DC50F-1280 funcionando a distintas tensiones eléctricas.

9.- EXPERIENCIA 2: PRESTACIONES DEL SISTEMA “SIMPLE”

9.1.- MATERIAL Y MÉTODOS

Para poder medir y determinar la relación entre las variables de radiación solar, caudal elevado por el sistema y la tensión de salida del regular de tensión, se instaló el sistema “simple” en las dependencias Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (Sección de Agrarias). Éste constaba de un panel solar, un regulador de tensión y la bomba. La bomba se situó en un depósito del Laboratorio de Hidráulica situado en los sótanos del Centro. La tubería de impulsión se elevó 4 metros para después conducirse otra vez al depósito. El panel y el regulador de tensión se ubicaron al exterior del edificio, próximo a la ventana del Laboratorio. Para sombrear la placa solar, y poder obtener distintos valores de radiación incidente sobre la misma, se fabricaron dos paneles con marcos de madera, y una malla mosquitera verde que se grapó a dicha estructura. Uno de los paneles tenía una sola malla, mientras que el otro tenía dos superpuestas. Para la medida de la radiación incidente se empleó una célula radiométrica LYCOR a la que se le conectó multímetro que medía la señal de salida en μA . Se utilizó otro multímetro para medir la tensión a la salida del regulador. El caudal elevado por la bomba, se determinó por aforo, midiendo el tiempo que tardaba en llenarse un cubo de 20 L. Para el ajuste de los valores de las variables experimentales obtenidas se usó una hoja Excel. La tensión de la corriente que con la que trabajaba la electrobomba se determinó trayendo a la tensión de salida del regulador, la caída que se producía en el conductor que conectaba el motor al regulador.

Previo a esta experiencia, se realizó una calibración de la célula radiométrica, utilizando como datos de referencia los de la estación Agroclimática del Centro, ubicada en la finca de Tahonilla Baja. Los resultados de la misma se encuentran reflejados en la gráfica 5.

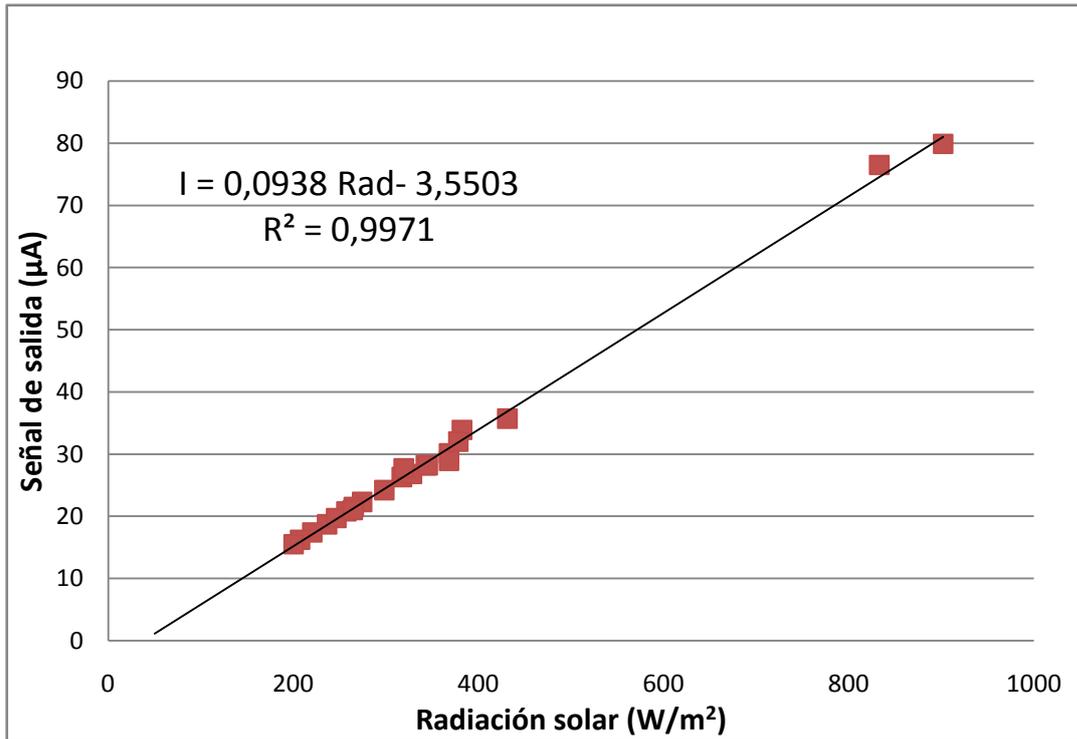


Gráfico 5: Recta de calibración de la célula radiométrica Lycor

A continuación se presentan varias fotos del dispositivo experimental.



Foto 18: Panel solar y célula radiométrica. Al fondo, paneles de malla para modular la radiación incidente.

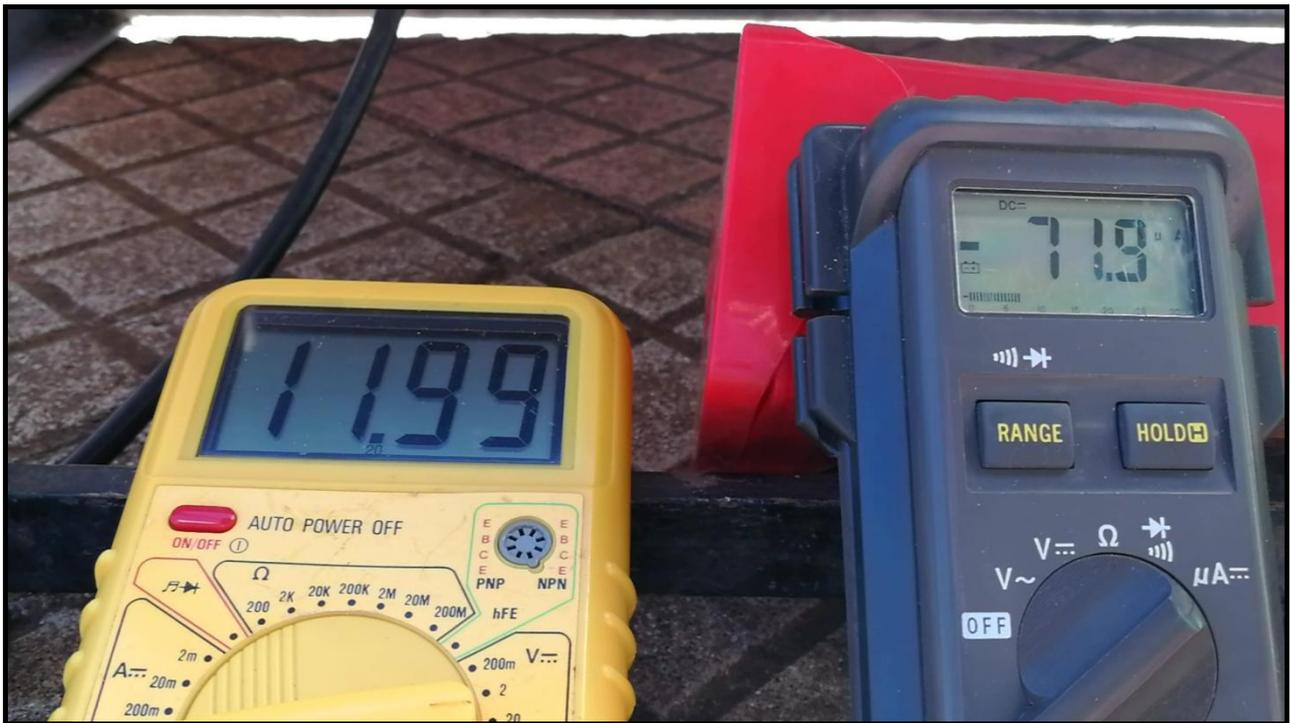


Foto 19: A la izquierda de la imagen, multímetro midiendo la tensión de la corriente a la salida del regulador. A la derecha, midiendo la intensidad de salida del radiómetro.

9.2.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación tensión-caudal

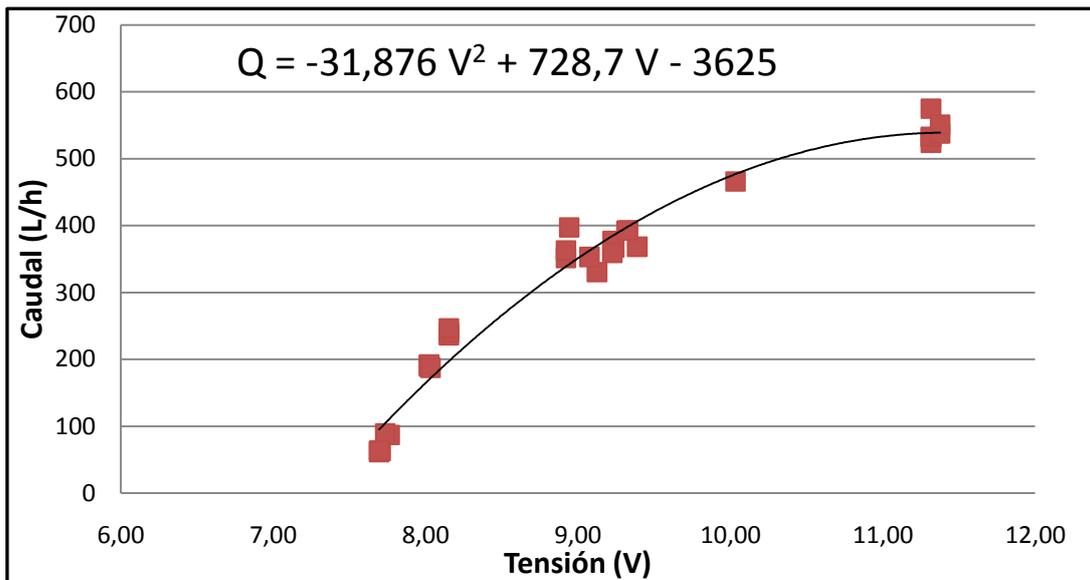


Gráfico 6: Curva de ajuste tensión-caudal.

En el sistema “Simple”, la bomba puede trabajar a diferentes tensiones. Si la tensión de alimentación del motor de la electrobomba es menor de 7V, ésta no funcionará. Cuando la tensión de la corriente que proporciona el panel solar sea baja (<12V) la tensión a la que trabajará la bomba será también <12V. En la curva ajustada se observa cómo se relaciona el caudal elevado y la tensión en el rango de 7-12V. La relación caudal-tensión coincide con los de las curvas características presentadas en el punto anterior.

Relación radiación solar-tensión

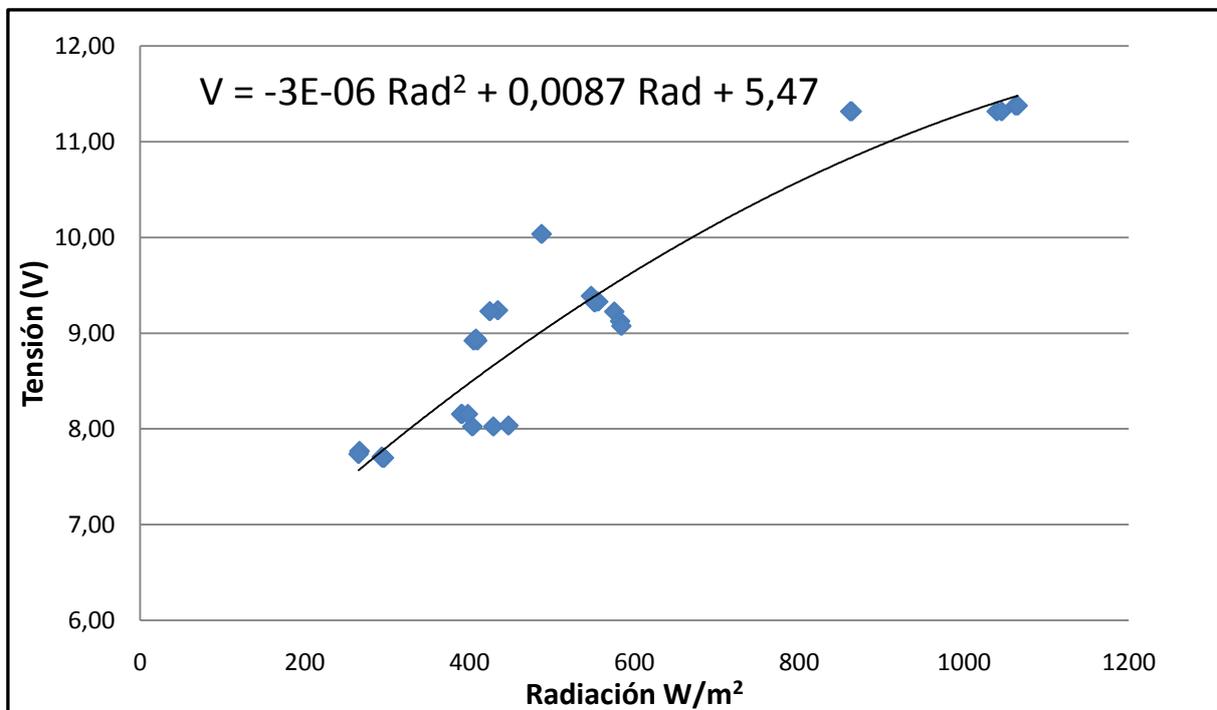


Gráfico 7: Curva de ajuste radiación solar-tensión eléctrica.

Como cabría esperar, la tensión de la corriente suministrada por el panel fotovoltaico va aumentando con la radiación que incide sobre el mismo.

La pendiente de la curva se va atenuando a medida que aumenta la radiación solar. Con radiaciones de 200 W/m² la tensión es de aproximadamente de 7V, es decir, con radiaciones inferiores a ese valor la electrobomba no funcionará.

Relación radiación solar-caudal

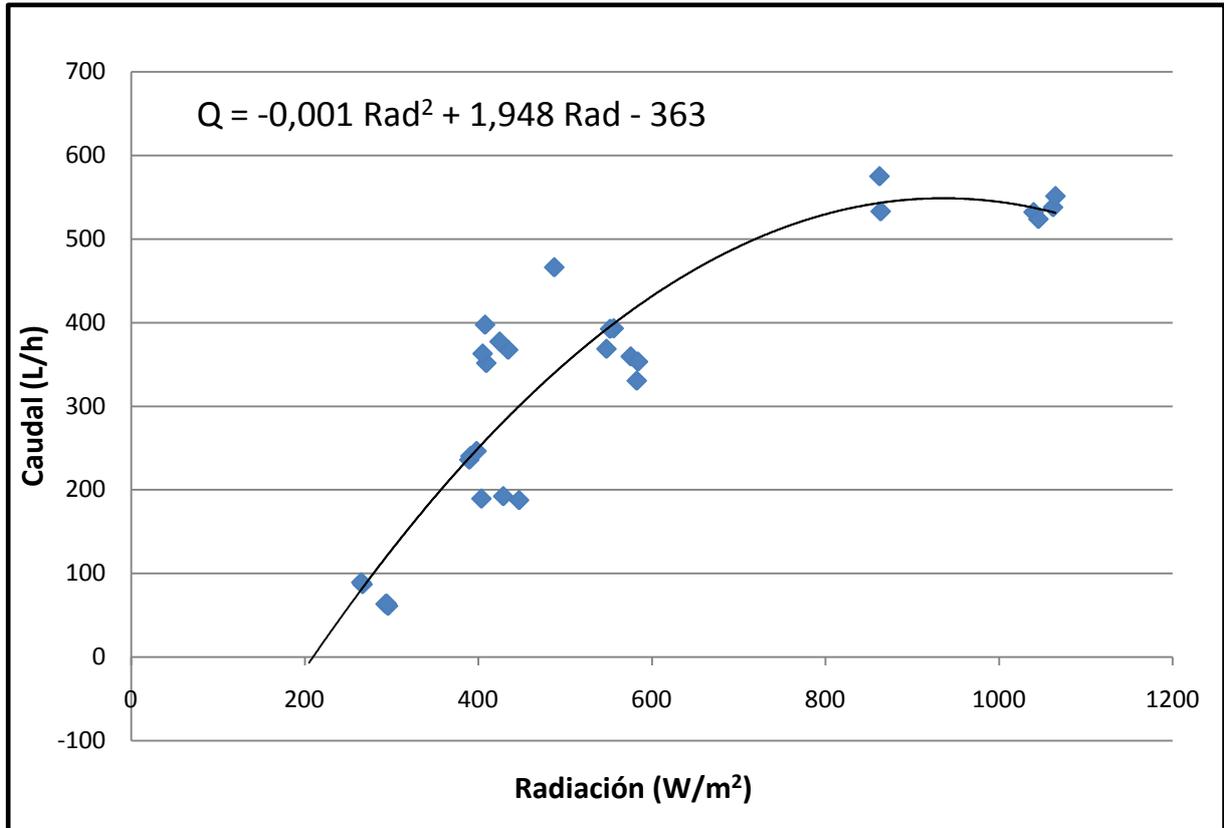


Gráfico 8: Curva de ajuste Radiación-Caudal.

El caudal máximo que nos proporciona la bomba con radiaciones superiores a los 800 W/m² se estabiliza por debajo de los 600 L/h.

En ubicación de nuestra experiencia, en días despejados del mes de junio la radiación excede los 200 W/m² desde las 7 am y no vuelve a bajar de ese valor hasta las 5 pm, por lo que podemos prever que la electrobomba del sistema “simple” pueda funcionar durante 10 horas en esas condiciones.

10.- EXPERIENCIA 3: PRESTACIONES DEL SISTEMA “COMPLEJO”

10.1.- MATERIAL Y MÉTODOS

Con el fin de estudiar el funcionamiento del sistema “complejo” durante todo el ciclo diario, se montó el mismo en una parcela situada en el municipio de El Sauzal a 300 msnm. La placa solar y la célula radiométrica se situaron en la azotea de una casa ubicada en la citada parcela. La caja que contiene todos los dispositivos eléctrico-electrónicos se situó en el interior del edificio. El conjunto filtro y bomba colocó dentro de un depósito de 200 L situado en el exterior. Se instaló un manómetro Bourdon y una válvula al comienzo de la tubería de impulsión.

Con la bomba en funcionamiento se fue cerrando la válvula hasta que el manómetro indicaba 0,4 bar, el equivalente a una altura de presión de 4 m. Se usaron siete multímetros para medir la señal de salida del radiómetro (μA), la intensidad y la tensión de la corriente que circulaba entre el panel y el regulador, entre la batería y el regulador, y entre el regulador y la bomba. Se anotó también la tensión que en todo momento indicaba la pantalla digital del regulador de carga.

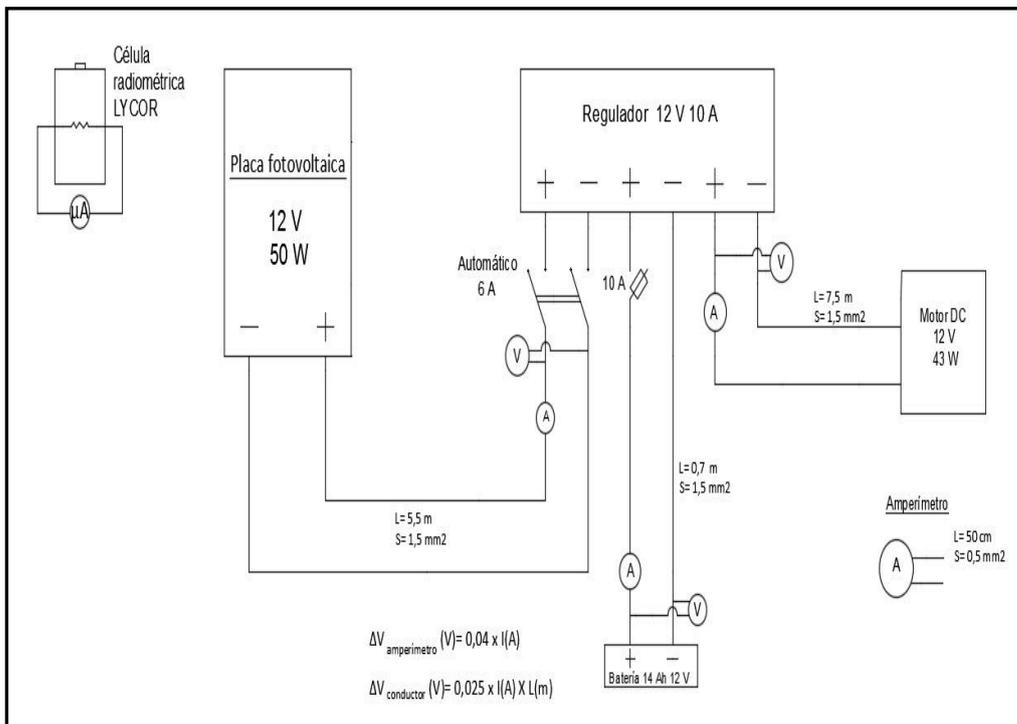


Figura 12: Esquema de la instalación

Se presenta a continuación unas fotografías de los distintos elementos de la instalación



Fotos 20 y 21: Panel y célula radiométrica



Foto 22: Conjunto filtro, bomba, manómetro y válvula



Foto 23: Detalle del manómetro Bourdon

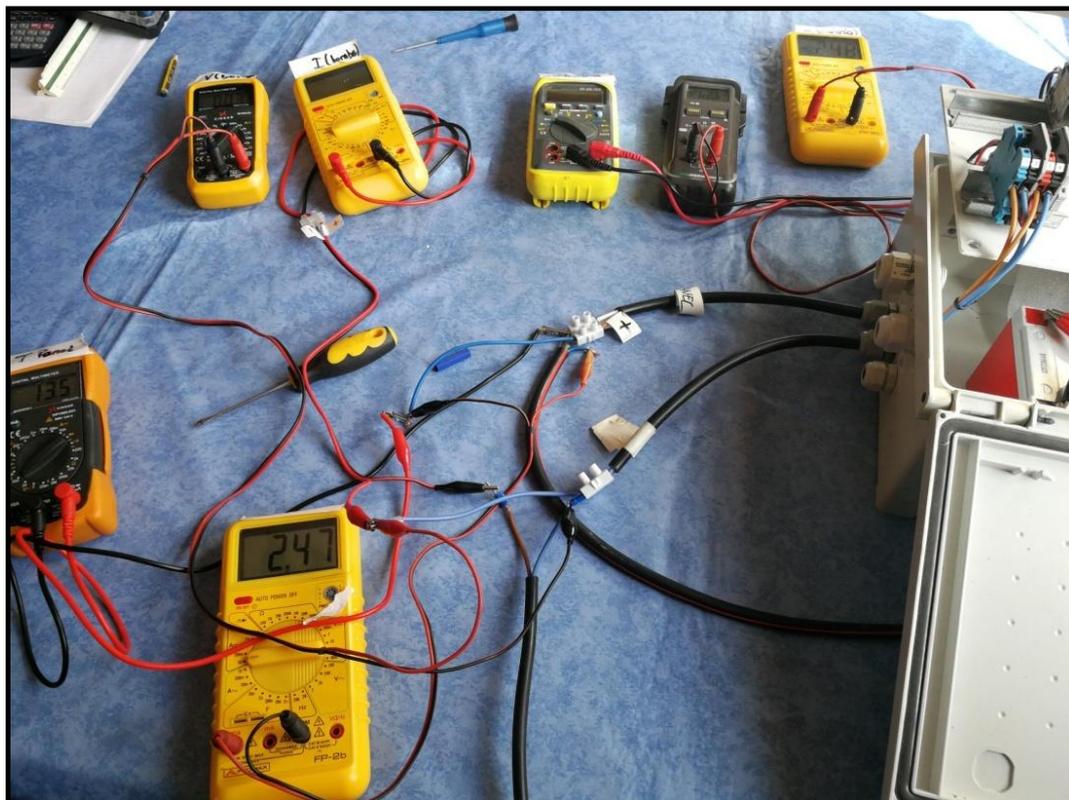


Foto 24: Multímetros empleados para la medida de las variables eléctricas.

Las pruebas se desarrollaron durante tres días del mes de diciembre de 2018. Las condiciones climáticas de esos días no fueron las típicas del invierno. Debido a la presencia de un anticiclón, el tiempo parecía de verano, con un cielo totalmente despejado, el aire seco y unas temperaturas y radiación solar anormalmente altas.

En el primer día de la experiencia se produjo un accidente que provocó la parada del sistema durante tres horas. Esta circunstancia lo distorsionó todo y se ha preferido prescindir de las medidas realizadas ese día.

10.2.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta a continuación las tensiones de funcionamiento el sistema

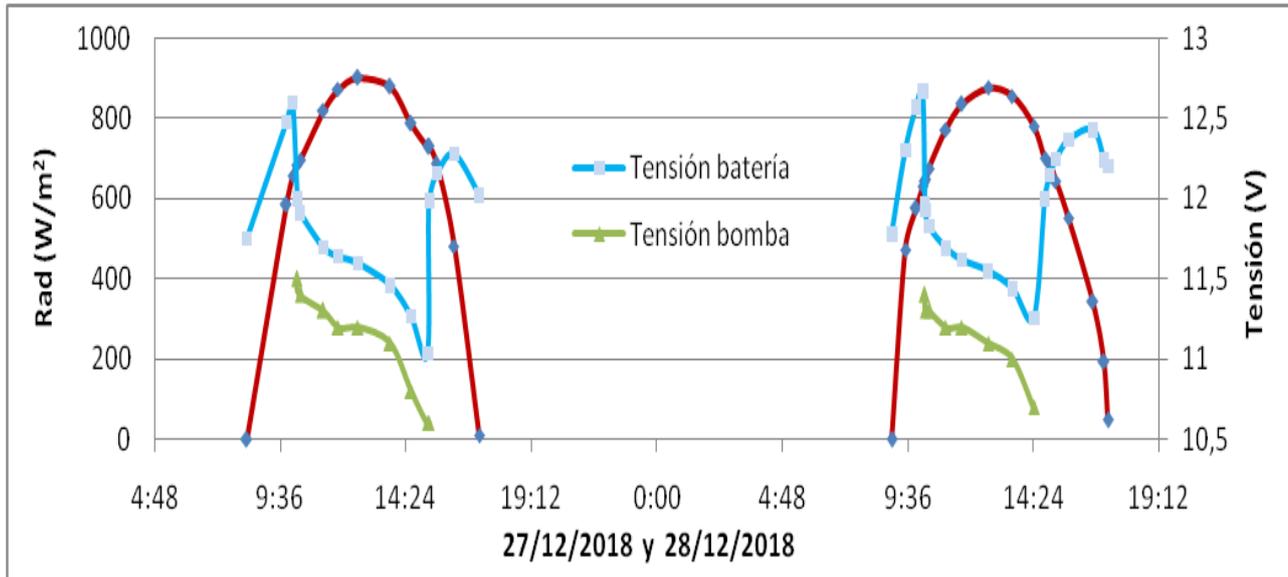


Gráfico 9: Radiación solar, tensión de la batería y tensión de salida del regulador

En el gráfico 9 se observa la tónica de funcionamiento habitual del sistema en un día despejado. A primera hora de la mañana, la batería no ha alcanzado la plena carga y por tanto la energía captada por el panel se dirige en su totalidad a cargar la misma.

Cuando la batería alcanza la carga máxima prefijada (12,6 V) el regulador cierra el circuito de alimentación de la bomba y ésta comienza a funcionar. Como se puede observar en el gráfico mencionado, la bomba se mantiene en funcionamiento ininterrumpido durante aproximadamente 5 horas. Durante este tiempo el panel no es capaz de suministrar toda la potencia que demanda la bomba y es la batería la que suplementa este déficit.

Como consecuencia de lo anterior, la tensión de la batería va disminuyendo a medida que ésta se va descargando. Cuando se llega al umbral mínimo de descarga en el regulador (10,6 V), este abre el circuito de la bomba y esta para. En ese momento comienza el ciclo de carga de la batería, volviendo a incrementarse la tensión.

Al final del día, la batería no ha alcanzado su plena carga y por tanto seguirá el proceso de carga en las primeras horas del día siguiente, repitiéndose así lo acontecido el día anterior.

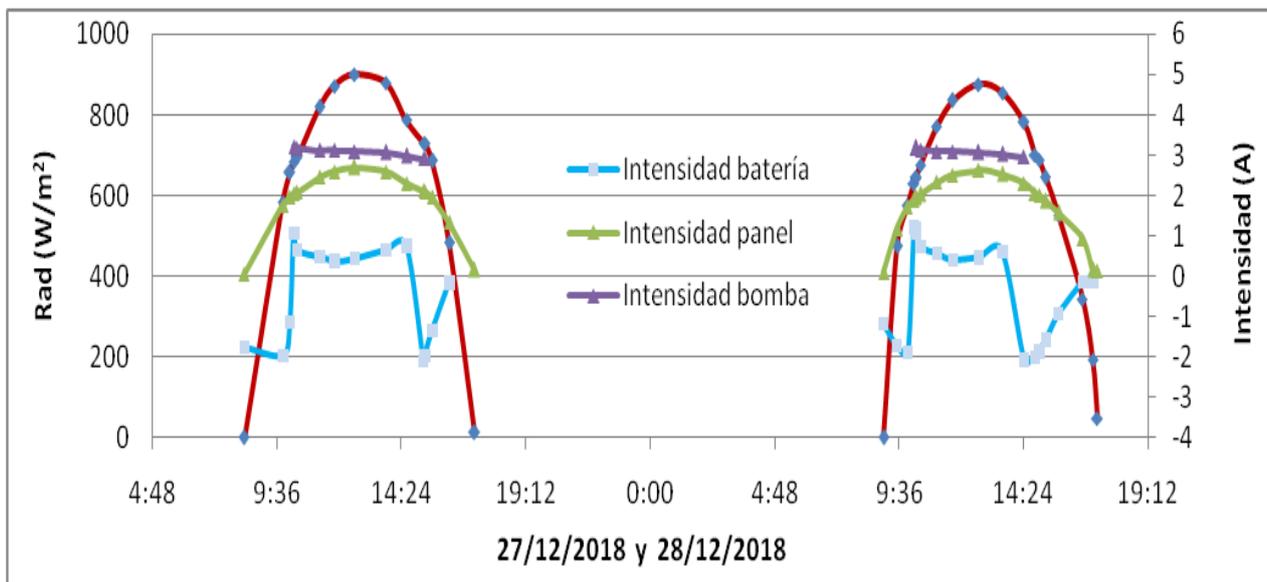


Gráfico 10: Radiación solar, intensidades de la corriente panel-regulador, batería-regulador y regulador-bomba

Como se puede observar en el gráfico 10, la intensidad de la corriente generada por el panel fotovoltaico a lo largo del día va siguiendo la misma trayectoria que la de la radiación solar incidente.

A horas centrales del día, el panel suministra casi el 80% de la intensidad que demanda la bomba. La intensidad de la corriente de alimentación de la bomba varía muy poco durante las 5 horas en que se mantiene en funcionamiento, ésta varía entre 3,2 y 3,0 A. Este funcionamiento tan estable hace augurar una larga vida útil de la bomba.

La batería comienza su carga desde que el momento en que el panel comienza a generar energía, llegando a absorber intensidades de hasta 2 A. Una vez que la bomba empieza a funcionar el sentido de la corriente se invierte pasando la batería a aportar

una baja intensidad comprendida entre 0,5 y 1 A, que complementa a la que aporta el panel solar.

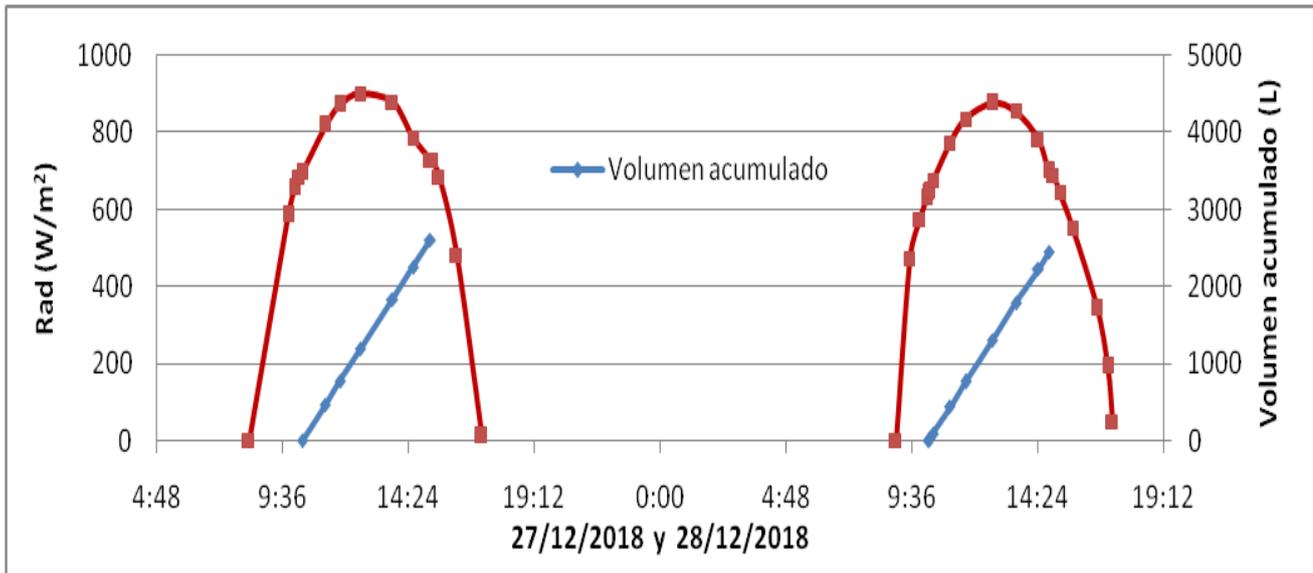


Gráfico 11: Radiación solar y volumen de agua elevado.

En el gráfico 11, se puede observar el volumen de agua elevado, acumulado durante las 5 horas de funcionamiento. El caudal se mantiene constante, próximo a 500 L/h. Al final del día se ha elevado un volumen de agua de aproximadamente 2500 L.

11.- EXPERIENCIA 4: EVALUACIÓN EN CAMPO DEL SISTEMA

Como se ha reflejado en la redacción del punto 3.- Objetivos y 4.- Estructuración del Trabajo, se realizó una experiencia conducente a evaluar el comportamiento del sistema denominado "complejo", a medio plazo, en condiciones de campo.

11.1.- MATERIAL Y MÉTODOS

El sistema de elevación estudiado se incorporó a una instalación de riego localizado de bajo coste, ubicada en la finca de Tahonilla, de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de la Universidad de La Laguna.

En dicha localización se realizó un cultivo de puerros, realizando el trasplante en el mes de junio de 2017 y cosechando en septiembre del mismo año.

El bombeo de agua, se realizaba desde el estanque grande de la finca hasta un depósito de 1000 L de capacidad, elevado 2 m sobre el terreno, desde el nivel del cultivo.

La parcela se encuentra situada frente al Vivero Insular de Flora Autóctona, perteneciente al Cabildo Insular de Tenerife. Se accede desde la carretera general de la Esperanza (TF-24, Km. 1,00) y también desde el Camino de San Francisco de Paula. La superficie cultivada era aproximadamente de 120 m².



Foto 25: Situación de la parcela dentro de la finca Tahonilla. (IDECanarias, 2018).

Tras observar los análisis de tierra, realizados en años anteriores, se pudo concluir que se trataba de un suelo con un pH de 7,5. El resto de los parámetros analizados se encontraban dentro de los valores adecuados, exceptuando el porcentaje de materia orgánica que era inferior al óptimo, <3%.

En lo referente al clima, se adjunta la siguiente tabla con los datos registrados para los meses de cultivo, obtenidos de la estación meteorológica Hobo U-30, perteneciente a la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, situada cerca de la parcela. Los datos presentados proceden de la página www.agrocabildo.org/.

Tabla 5: Datos meteorológicos. (Agrocabildo, 2019)

| Fecha | T | TM | Tm | P | HR | HRM | HRm | Vo | V máx | Rad | Eto |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|----------|------|
| may-17 | 16,8 | 20,7 | 14 | 15,5 | 82,9 | 93,5 | 66,4 | 3,1 | 5,5 | 6.428,00 | 3,85 |
| jun-17 | 19 | 23,5 | 16,2 | 2 | 78,2 | 92,4 | 61,4 | 4,1 | 6,3 | 7.299,50 | 4,80 |
| jul-17 | 19,9 | 24,3 | 17,1 | 8 | 76,5 | 90,1 | 57,7 | 4,5 | 6,6 | 7.795,90 | 5,33 |
| ago-17 | 22,9 | 28,2 | 18,7 | 10,5 | 65,9 | 87,7 | 45,9 | 3 | 5,3 | 7.383,20 | 5,82 |

T: Temperatura media (°C)

TM: Temperatura máxima absoluta (°C)

Tm: Temperatura mínima absoluta (°C)

P: Precipitación (mm)

HR: Humedad relativa media (%)

HRM: Humedad relativa máxima absoluta (%)

HRm: Humedad relativa mínima absoluta (%)

Vo: Velocidad media del viento (m/s)

Vmáx: Velocidad y Dirección máxima media por cada 10 minutos (m/s)

Rad: Radiación total diaria (Wh/m² y día)

Eto: Evapotranspiración calculada por el método Penman Monteith, FAO 56 (mm/día)

Se cultivó un híbrido de puerro denominado MATEJKO RZ F1, de la casa Rijk Zwaan, por ser una planta vigorosa, rústica y de ciclo precoz (105 días), adecuada para nuestras condiciones de trabajo. Se caracteriza por tener las hojas de color azulado y porte erecto. Presenta un fuste prieto, liso, grueso y altamente uniforme en torno a los 30 cm de longitud, sin formación de bulbo, haciendo fácil su manejo en los procesos de limpieza y pelado.

Las necesidades de riego y de fertilización fueron calculadas para cada una de las 15 semanas de su ciclo. Para obtener la dosis de riego, se tuvo en cuenta el coeficiente del

cultivo (K_c), la evapotranspiración de referencia (E_{to}) y la eficiencia estimada de riego. La precipitación efectiva durante los meses de verano se consideró despreciable. Se asignó un K_c de inicios de 0,3, uno de mediados de 0,9 y uno de finales de 0,6.

Tabla 6: Coeficientes de cultivo.

| | | | | |
|-------------|------------|--------|-------------|--------|
| Día del año | 139 | 189 | 224 | 244 |
| | 19-may | 08-jul | 12-ago. | 1-sep. |
| K_c | 0,3 | 0,9 | 0,9 | 0,6 |
| | plantación | | recolección | |

Se obtuvo la curva que relacionaba el K_c con el día del año.

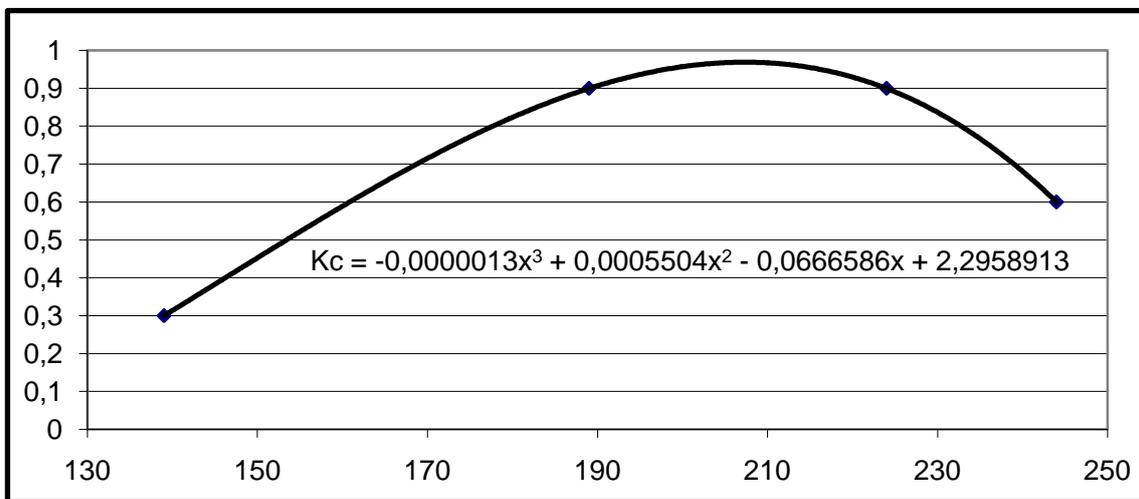


Gráfico 12: Evolución del coeficiente K_c a lo largo del ciclo de cultivo.

La evapotranspiración del cultivo se calculó en función de su fórmula:

$$ET_c = K_c * E_{T_o}$$

Se estimó una eficiencia de riego del 80%. Se despreció la precipitación efectiva.

$$NR = \frac{ET_c}{Ef(80\%)}$$

Se estableció una frecuencia de tres riegos semanales (lunes miércoles y viernes).

Tabla 7: Dosis de agua aplicada en los riegos de cada semana.

| Kc | comienza (día) | termina (día) | Kc | Eto (mm/día) | Etc (mm/semana) | NR (mm/semana) | Dosis (L) |
|-----------|----------------|---------------|------|--------------|-----------------|----------------|-----------|
| Semana 1 | 139 | 146 | 0,35 | 4,0 | 9,9 | 12,33 | 493 |
| Semana 2 | 146 | 153 | 0,44 | 4,2 | 13,1 | 16,37 | 655 |
| Semana 3 | 153 | 160 | 0,53 | 4,4 | 16,5 | 20,57 | 823 |
| Semana 4 | 160 | 167 | 0,62 | 4,6 | 19,8 | 24,74 | 989 |
| Semana 5 | 167 | 174 | 0,70 | 4,7 | 23,0 | 28,71 | 1148 |
| Semana 6 | 174 | 181 | 0,77 | 4,8 | 25,8 | 32,31 | 1292 |
| Semana 7 | 181 | 188 | 0,83 | 4,9 | 28,3 | 35,35 | 1414 |
| Semana 8 | 188 | 195 | 0,87 | 4,9 | 30,1 | 37,66 | 1506 |
| Semana 9 | 195 | 202 | 0,89 | 5,0 | 31,3 | 39,08 | 1563 |
| Semana 10 | 202 | 209 | 0,90 | 5,0 | 31,6 | 39,45 | 1578 |
| Semana 11 | 209 | 216 | 0,88 | 5,0 | 30,9 | 38,64 | 1546 |
| Semana 12 | 216 | 223 | 0,84 | 5,0 | 29,2 | 36,56 | 1462 |
| Semana 13 | 223 | 230 | 0,77 | 4,9 | 26,5 | 33,13 | 1325 |
| Semana 14 | 230 | 237 | 0,66 | 4,9 | 22,6 | 28,30 | 1132 |
| Semana 15 | 237 | 244 | 0,53 | 4,8 | 17,7 | 22,08 | 883 |

Las dosis de fertilizantes aportadas con una frecuencia semanal fueron calculadas teniendo en cuenta las necesidades y equilibrios recomendados por la bibliografía, y las riquezas de los abonos empleados. Los resultados se exponen a continuación:

Tabla 8: Dosis de fertilizantes aplicada en uno de los tres riegos semanales

| | $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (g) | K_2SO_4 (g) | NH_4NO_3 (g) | NO_3Ca (g) |
|-----------|--|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Semana 1 | 18 | 36 | 96 | 48 |
| Semana 2 | 24 | 48 | 128 | 64 |
| Semana 3 | 30 | 60 | 160 | 80 |
| Semana 4 | 36 | 72 | 193 | 96 |
| Semana 5 | 42 | 84 | 224 | 112 |
| Semana 6 | 44 | 181 | 100 | 118 |
| Semana 7 | 48 | 198 | 109 | 130 |
| Semana 8 | 51 | 211 | 116 | 138 |
| Semana 9 | 53 | 219 | 121 | 143 |
| Semana 10 | 53 | 221 | 122 | 145 |
| Semana 11 | 52 | 216 | 119 | 142 |
| Semana 12 | 49 | 205 | 113 | 134 |
| Semana 13 | 40 | 258 | 60 | 60 |
| Semana 14 | 34 | 220 | 51 | 51 |
| Semana 15 | 26 | 172 | 40 | 40 |

La instalación de riego constaba de un depósito de 1000 L de capacidad elevado 2 m sobre el suelo y soportado por una estructura de perfiles de acero. La tubería principal era de PEBD \varnothing 50 mm- 0,4 MPa. En ella se instaló un filtro y una válvula de esfera. Las tuberías terciarias (2) eran de PEBD \varnothing 32 mm- 0,4 MPa. Las tuberías laterales (26) eran de PEBD \varnothing 16 mm- 0,25 MPa. Los emisores eran microtubos de 30 cm de longitud y 1,5 mm de diámetro interior, insertados casi en su totalidad en el interior del lateral de riego. Se encontraban separados a una distancia de 25 cm.

Se presenta a continuación un archivo fotográfico para ilustrar la mencionada instalación de riego.



Foto 26: Depósito sobre estructura.



Foto 27: Detalle de la salida del depósito.



Foto 28: Tubería terciaria y tuberías laterales.



Foto 29: Detalle del emisor. Microtubo con una pieza para localizar la descarga.



Foto 30: Evaluación de la uniformidad de riego de la instalación.

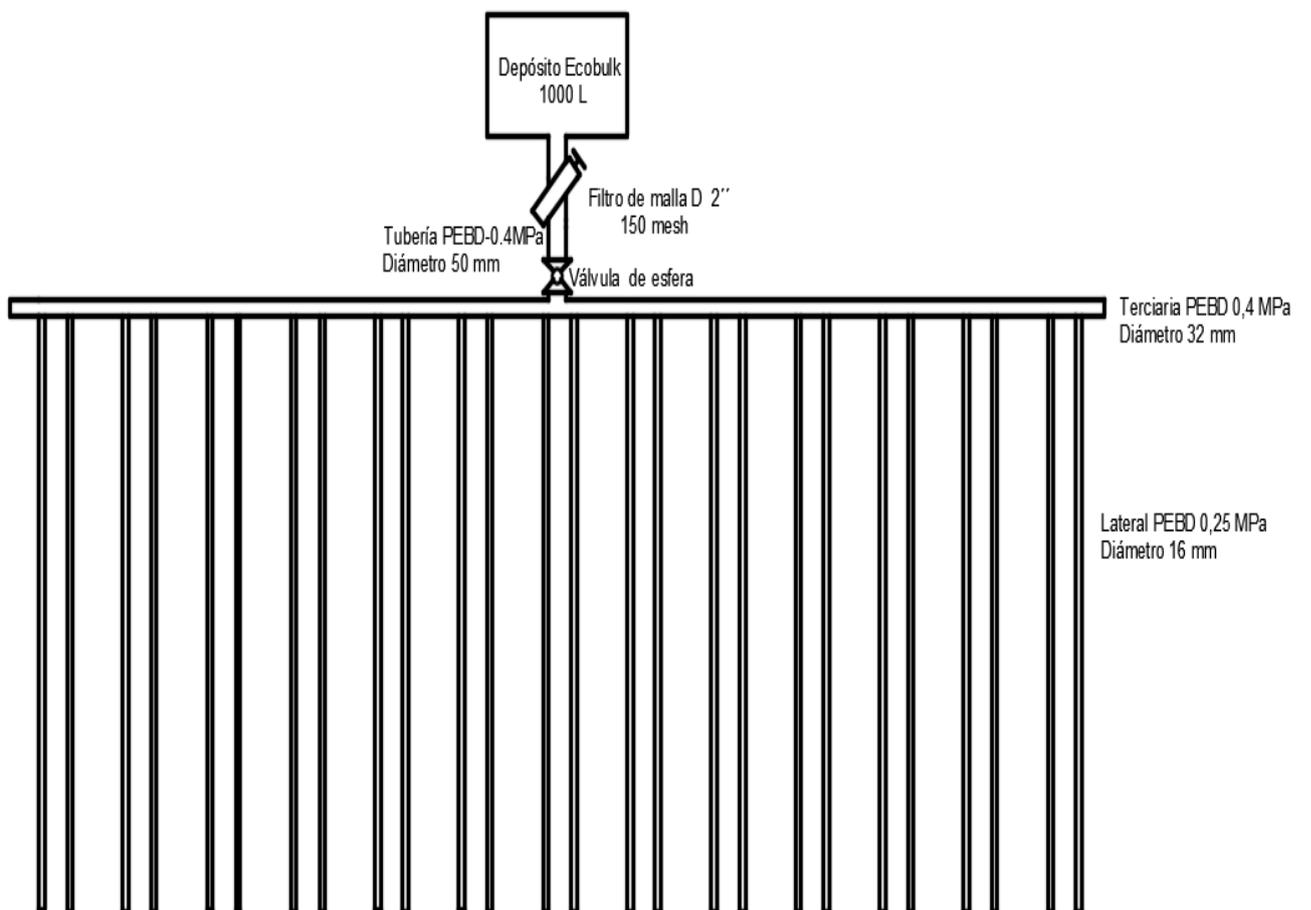


Figura 13: Esquema de la instalación de riego.

Cuando se realizó el montaje del bombeo solar, se instaló un contador de pulsos que enviaba la señal a un registrador (datalogger) para ser almacenada. También se registraron los valores de la tensión de la corriente generada por el panel solar, a la entrada y salida del regulador de carga.

A continuación se presenta un archivo fotográfico del montaje del sistema.

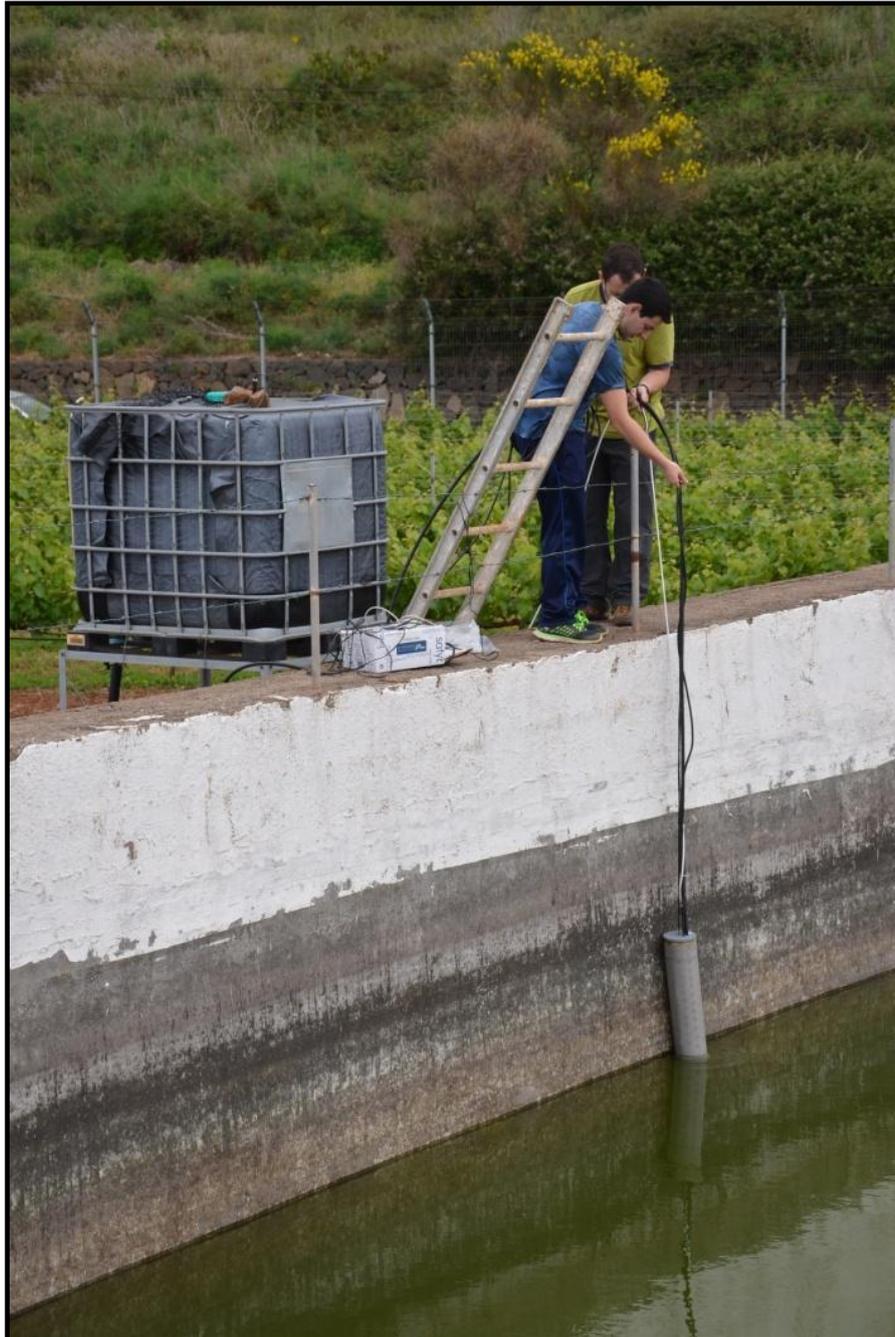


Foto 31: Colocando en el fondo del estanque el filtro y la bomba.



Foto 32: Fijando el panel solar a la estructura del depósito.



Foto 33: Detalle de panel solar y armario estanco.



Foto 34: Detalle del contador instalado junto a un purgador de aire.



Foto 35: Configurando el registrador de datos conectado al contador.

Durante el cultivo, el modus operandi del regante era siempre el mismo. Cuando tocaba regar (tres veces semanales), se abría la válvula principal para comenzar el riego. El depósito de agua que se encontraba lleno (1000 L), descargaba la cantidad prefijada en unos pocos minutos. De forma inmediata, el interruptor de nivel instalado en el interior del tanque ponía en funcionamiento el bombeo. Éste se mantendría en funcionamiento hasta que se llenara de nuevo el tanque. Con el tanque vacío el llenado duraba aproximadamente dos horas.

11.2.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha expuesto anteriormente, el objetivo principal de esta experiencia era el de comprobar que la instalación mantenía su funcionalidad en una prueba en condiciones de campo durante un plazo medio de tiempo (un ciclo de cultivo).

La instalación funcionó correctamente durante los 105 días que duró el cultivo. Desde el punto de vista agronómico, el cultivo se desarrolló casi sin ninguna incidencia. Se fue aplicando el plan de riego y fertilización previamente diseñado. No fue necesario aplicar tratamientos fitosanitarios ya que el cultivo no presentó ningún tipo de plaga o enfermedad. La única labor cultural a parte de la plantación, riego y recolección fue el deshierbe periódico. Se obtuvo una producción de 375 kg en 120 m² de parcela.

La única incidencia que hubo fue el atoramiento de la boya del sensor de nivel instalado en el techo del depósito que provocó un rebosamiento. Esto ocurrió al comienzo del cultivo y una vez subsanado el problema, no volvió a ocurrir.

Las tensiones que suministraba el panel solar en abierto eran de aproximadamente 20 V. Cuando se cerraba el circuito y el panel suministraba energía al sistema, las tensiones bajaban a aproximadamente 13 V, tanto a la entrada como a la salida del regulador.

Diseño complejo (llenado automático): Tensión de entrada/salida del regulador

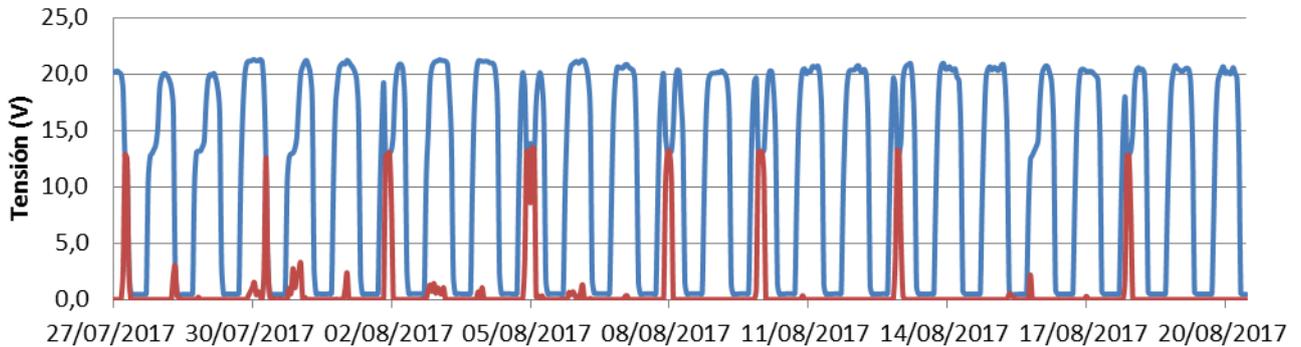


Gráfico 13: Tensiones del panel (azul) y de salida del regulador (rojo) durante una etapa del cultivo.

El registrador almacenó los datos del volumen de agua que pasó por el contador durante la experiencia. Con ellos se pudo calcular la dosis aplicada en cada riego. Los datos corroboraron el correcto manejo del riego, de acuerdo con el programa previsto. Con los datos registrados se elaboró el gráfico 14.

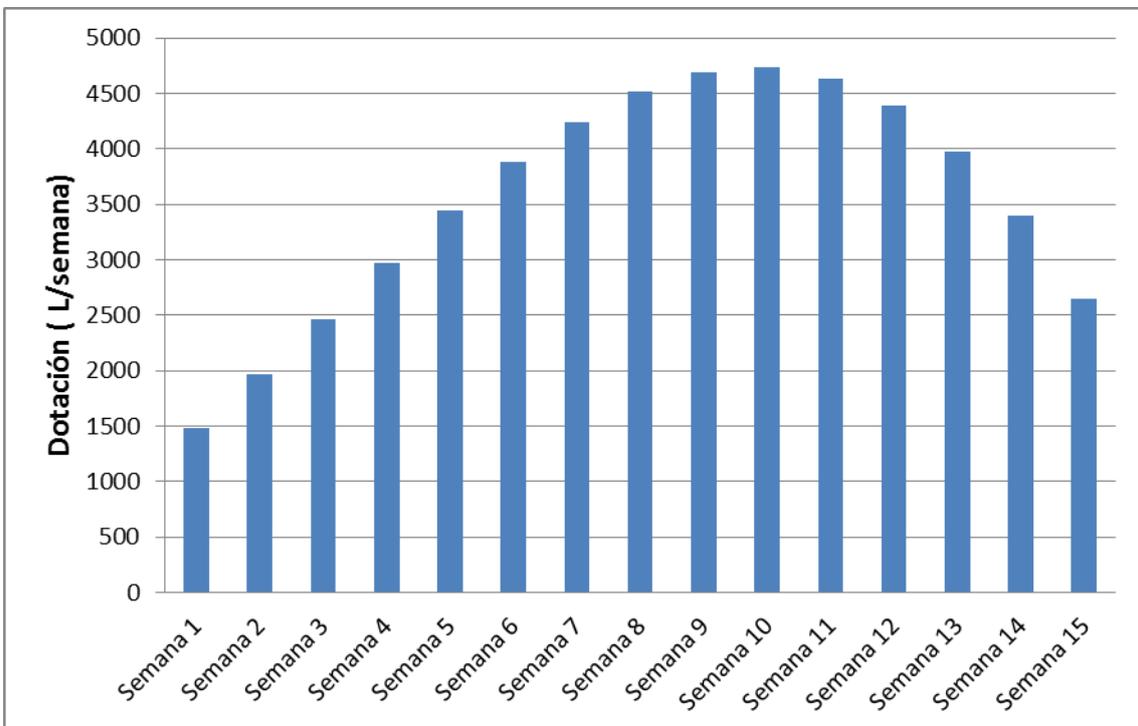


Gráfico 14: Dotaciones de riego aplicadas en todas las semanas del cultivo.

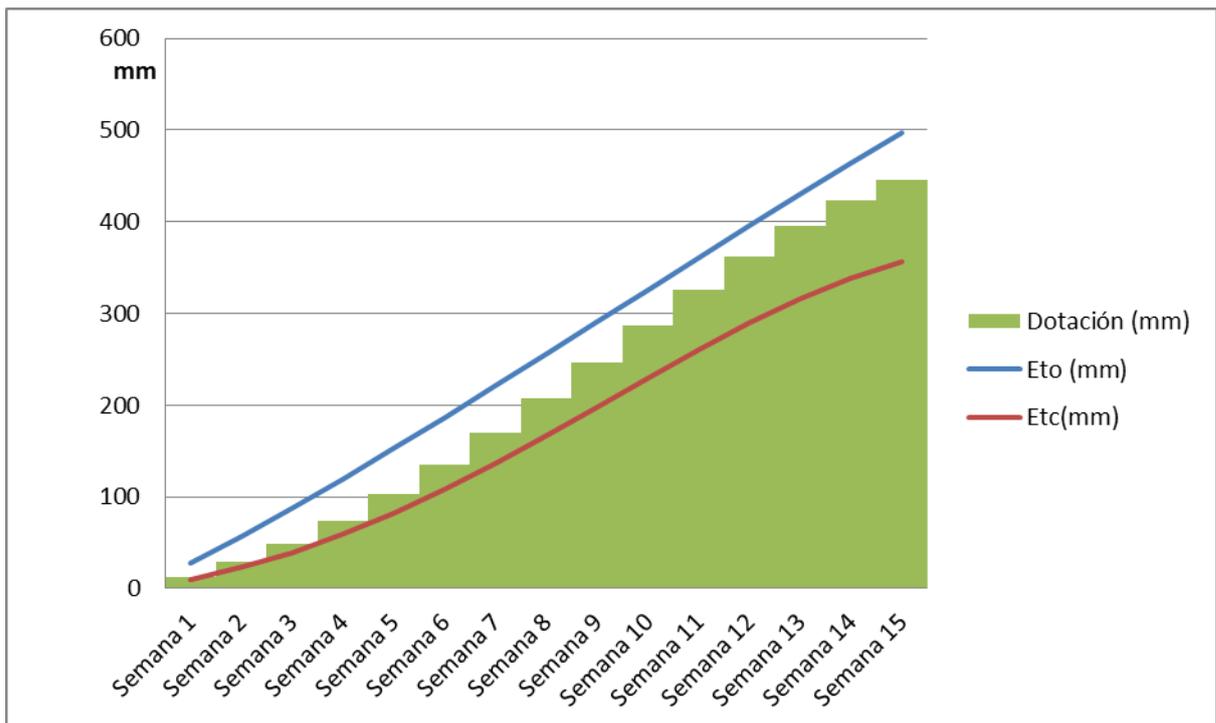


Gráfico 15: Evapotranspiración de referencia (ETo), evapotranspiración de cultivo (ETc) y dotación de riego acumulada durante todo el cultivo.

A continuación se presenta un archivo con fotografías tomadas en distintos momentos del cultivo.



Foto 36: Cultivo en etapa inicial de desarrollo, invadido por malas hierbas.



Foto 37: Aspecto del cultivo después del deshierbado.



Foto 38: Aspecto del cultivo en una etapa avanzada de crecimiento.



Foto 39: Detalle de un punto de emisión que riega dos plantas.



Foto 40: Recolección.



Foto 41: Puerros preparados para su envío al mercado.

12.- SUPERFICIE REGABLE

En este punto se exponen los cálculos, estimaciones y metodología que nos llevará a determinar de forma aproximada la superficie que puede ser regada con el volumen de agua elevado por los dos sistemas estudiados. Esta superficie se calculará dividiendo el volumen que es capaz de elevar cada sistema durante un mes por las necesidades de riego mensuales de un cultivo.

Las necesidades de riego dependerán principalmente del **cultivo** que se realice y de las **condiciones climáticas** de la época del año y del lugar donde se realice.

Para llevar a cabo los cálculos de las necesidades de riego se ha considerado un huerto familiar donde se cultivan varias especies de hortalizas y donde todas ellas no se encuentran en la misma fase de crecimiento. He estimado unos coeficientes de

cultivo (Kc) de 0,3; 0,9 y 0,6 para las etapas de inicio, mediados y finales, respectivamente. Si considero una duración relativa de estas etapas de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de ciclo, resulta en un coeficiente medio ponderado de aproximadamente 0,7.

Las condiciones climáticas escogidas para este cálculo son las que se dan en los propios campos experimentales de la finca de Tahonilla, de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, de La Laguna. Se han calculado las medias mensuales de los valores de las distintas variables climáticas del quinquenio 2014-2018.

En otros lugares, las demandas evapotranspirativas y las precipitaciones a lo largo del año podrían ser muy diferentes. Aun no siendo iguales, por ejemplo con una radiación solar superior, el aumento de las necesidades de riego iría acompañado de un aumento de la capacidad de elevación de los sistemas solares. Por esta razón, estimo que en esas condiciones, la magnitud de la superficie regable sería muy parecida.

Los cálculos de las necesidades de riego para La Laguna se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 9: Necesidades de riego mensuales de un huerto de hortalizas en La Laguna.

| mes | Eto (mm/mes) | Eto (mm/día) | kc | Etc (mm/mes) | P 14-18 (mm/mes) | Pe (mm/mes) | Nn (mm/mes) | NR (mm/mes) |
|------------|--------------|--------------|-----|--------------|------------------|-------------|-------------|-------------|
| enero | 1,76 | 54,56 | 0,7 | 38,19 | 46,8 | 38,3 | 0,0 | 0,0 |
| febrero | 1,78 | 49,84 | 0,7 | 34,89 | 88,0 | 70,6 | 0,0 | 0,0 |
| marzo | 2,99 | 92,69 | 0,7 | 64,88 | 51,7 | 42,4 | 22,5 | 28,1 |
| abril | 2,87 | 86,1 | 0,7 | 60,27 | 20,0 | 14,3 | 45,9 | 57,4 |
| mayo | 3,85 | 119,35 | 0,7 | 83,55 | 8,1 | 3,0 | 80,6 | 100,7 |
| junio | 4,76 | 142,8 | 0,7 | 99,96 | 6,1 | 1,0 | 98,9 | 123,6 |
| julio | 5,15 | 159,65 | 0,7 | 111,76 | 4,7 | 0,0 | 111,8 | 139,7 |
| agosto | 5,52 | 171,12 | 0,7 | 119,78 | 18,2 | 12,7 | 107,1 | 133,9 |
| septiembre | 4,11 | 123,3 | 0,7 | 86,31 | 3,0 | 0,0 | 86,3 | 107,9 |
| octubre | 2,67 | 82,77 | 0,7 | 57,94 | 118,9 | 91,3 | 0,0 | 0,0 |
| noviembre | 1,94 | 58,2 | 0,7 | 40,74 | 163,2 | 115,6 | 0,0 | 0,0 |
| diciembre | 2,28 | 70,68 | 0,7 | 49,48 | 34,8 | 27,8 | 21,6 | 27,1 |

ETo: Evapotranspiración de referencia; kc: Coeficiente de cultivo;

Etc: Evapotranspiración de cultivo; P: Precipitación total; Pe: Precipitación efectiva;

Nn: Necesidades netas de riego; NR: Necesidades totales de riego (para su cálculo se ha estimado una Eficiencia de riego del 80%)

Las superficies máximas que podrían ser regadas por los dos sistemas diseñados se calculan para los meses de máxima necesidad de riego, es decir para el periodo que va de mayo a septiembre.

Partiendo de la distribución horaria de los valores de radiación solar para cada mes, y relacionándolos con los caudales que son capaces de elevar los dos sistemas para cada valor de radiación, podremos llegar a calcular los volúmenes máximos elevados mensualmente.

Tabla 10: Mediana de valores horarios de radiación (W/m²) en Tahonilla (La Laguna).

| hora | mayo | junio | julio | agosto | septiembre |
|------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 0 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 1 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 2 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 3 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 5 | 8,1 | 8,1 | 1,9 | 0,6 | 0,6 |
| 6 | 128,1 | 143,8 | 115,6 | 83,8 | 40,6 |
| 7 | 334,4 | 346,9 | 306,9 | 273,1 | 231,3 |
| 8 | 574,4 | 573,8 | 524,4 | 498,1 | 443,8 |
| 9 | 763,1 | 766,3 | 743,1 | 703,1 | 640,6 |
| 10 | 933,8 | 943,1 | 939,4 | 883,1 | 805,6 |
| 11 | 965,6 | 1074,4 | 1060,6 | 1018,1 | 900,6 |
| 12 | 1033,1 | 1104,4 | 1093,1 | 1063,8 | 935,6 |
| 13 | 925 | 1044,4 | 1046,9 | 996,9 | 866,9 |
| 14 | 730 | 856,9 | 877,5 | 823,8 | 736,9 |
| 15 | 505 | 660,6 | 686,9 | 628,8 | 538,1 |
| 16 | 237,5 | 433,8 | 465,6 | 410 | 287,5 |
| 17 | 101,9 | 188,8 | 215,6 | 161,9 | 61,9 |
| 18 | 15,6 | 39,4 | 45,6 | 21,9 | 0,6 |
| 19 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 20 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 21 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 22 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 23 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |

SISTEMA "SIMPLE"

Para calcular el caudal que eleva el sistema, en función de la radiación solar incidente en el panel, se utiliza la ecuación obtenida experimentalmente (pag.43, gráfico 9).

$$Q = -0,001I^2 + 1,948I - 363$$

$$Q = \text{Caudal (L/h)}$$

$$I = \text{Flujo radiante (W/m}^2\text{)}$$

Los resultados de la integración de todos los volúmenes elevados cada hora durante el mes, se presentan en la tabla 11.

Tabla 11: Superficie regable por el "sistema simple".

| | Necesidades de riego (mm/mes) | Volumen de agua elevado (L/mes) | Superficie regable (m²) |
|-------------------|--|--|---|
| mayo | 100,7 | 132711 | 1318 |
| junio | 123,6 | 139325 | 1127 |
| julio | 139,7 | 146160 | 1046 |
| agosto | 133,9 | 138684 | 1036 |
| septiembre | 107,9 | 116669 | 1081 |

DISCUSIÓN

Los valores de las superficies calculadas pueden estar sobreestimados por el hecho de que están calculados con la "mediana" de los valores de los 30 o 31 días cada mes. Si el número de días cubiertos es menor que el de despejados, situación que se presupone, esta mediana puede aproximarse al valor de radiación horaria de un día despejado, no teniendo en cuenta entonces la merma de la capacidad de elevación del sistema en los días nublados. Para haber evitado esta fuente de error habría que haber hecho los cálculos con la radiación horaria de cada día del mes.

SISTEMA “COMPLEJO”

En la experiencia expuesta en el apartado 10 (**EXPERIENCIA 3: PRESTACIONES DEL SISTEMA “COMPLEJO”**), en las condiciones de la prueba, se obtuvo la siguiente relación entre el volumen de agua elevado diariamente y la energía solar registrada:

$$V = 0,47 \cdot Es$$

$V = \text{Volumen de agua elevado (L)}$

$Es = \text{Energía solar diaria (Wh / m}^2\text{)}$

Usando esta ecuación y los datos obtenidos de la página <http://www.agrocabildo.org/>, se obtienen los resultados expuestos en la tabla 12.

Tabla 12: Superficie máxima de riego (sistema complejo).

| | Necesidades de Riego (mm/mes) | Energía solar diaria (Wh/m ²) | Energía solar mensual (Wh/m ²) | Volumen de agua elevado (L/mes) | Superficie máxima de riego (m ²) |
|------------|-------------------------------|---|--|---------------------------------|--|
| mayo | 100,7 | 6628 | 205463 | 96568 | 959 |
| junio | 123,6 | 7466 | 223992 | 105276 | 852 |
| julio | 139,7 | 7733 | 239709 | 112663 | 806 |
| agosto | 133,9 | 7214 | 223634 | 105108 | 785 |
| septiembre | 107,9 | 5982 | 179453 | 84343 | 781 |

DISCUSIÓN

La ecuación utilizada en estos cálculos se obtuvo de una experiencia donde la energía solar diaria alcanzó los 5400 Wh/m². En La Laguna, en los meses que van desde mayo a septiembre la energía solar media diaria está comprendida entre 6000 y 8000 Wh/m². En estas otras condiciones la evapotranspiración del cultivo aumentará, pero también lo hará el volumen de agua elevado por el sistema, presuponiendo que esta relación no se desvíe significativamente del valor utilizado (0,47).

13.- PRESUPUESTOS

SISTEMA SIMPLE

| Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|-----------|------------------|----------------|
|-----------|------------------|----------------|

CAJA ELEMENTOS DE CONTROL

| 1 | Caja estanca | 12 | 3 | 21,1 |
|---|-------------------------|-----|---|------|
| 1 | Regulador 280W CC 7-40V | 6,3 | | |
| 1 | Interruptor 1p+n | 2,8 | | |

CABLE CONDUCTOR

| | | | | |
|----|--------------------------------|------|----|------|
| 20 | Cable RVK 2*2,5mm ² | 9,77 | 12 | 9,77 |
|----|--------------------------------|------|----|------|

PANEL SOLAR

| | | | | |
|---|--|-----|----|-----|
| 1 | Panel fotovoltaico monocristalino 95W Atersa | 180 | 12 | 240 |
| 1 | Estructura de acero galvanizado | 60 | | |

BOMBA

| | | | | |
|---|------------------------------------|----|---|----|
| 1 | Bomba sumergible brushless 43W 12V | 50 | 3 | 50 |
|---|------------------------------------|----|---|----|

FILTRO

| | | | | |
|---|---|----|----|----|
| 1 | Filtro PVC y malla acero inoxidable, incluido trabajo de taller | 50 | 12 | 50 |
|---|---|----|----|----|

MONTAJE

| | | | | |
|---|----------------------------|----|----|----|
| 1 | Montaje de todo el sistema | 60 | 12 | 60 |
|---|----------------------------|----|----|----|

| | |
|----------|-------|
| I.G.I.C. | 28,01 |
|----------|-------|

| | |
|--|---------------|
| Presupuesto de Ejecución Material | 458,87 |
|--|---------------|

| | |
|---|--------|
| Presupuesto de componentes con vida útil de 12 años (IGIC incluido) | 383,15 |
| Presupuesto de componentes con vida útil de 3 años (IGIC incluido) | 75,72 |

SISTEMA COMPLEJO

| Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|-----------|------------------|----------------|
|-----------|------------------|----------------|

CAJA ELEMENTOS DE CONTROL (1)

| Cantidad | Descripción | Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|----------|-------------------------------------|-----------|------------------|----------------|
| 1 | Armario 30*25*14 IP66 IK10 | 62 | 12 | 195,58 |
| 1 | Placa ciega de montaje | 5,45 | | |
| 1 | Interruptor automático IDPN 1p+n 6A | 9,5 | | |
| 1 | Portafusible de rail 10*38 | 2,1 | | |
| 1 | Relé 8 patas 12V | 5,5 | | |
| 1 | Base relé carril DIN | 4,75 | | |
| 1 | Módulo led relé 12V | 2,28 | | |
| 1 | Bornas carril DIN + DIN | 4 | | |
| 1 | Montaje | 100 | | |

CAJA ELEMENTOS DE CONTROL (2)

| Cantidad | Descripción | Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|----------|---|-----------|------------------|----------------|
| 1 | Batería CSB 12V 15 Ah | 41,89 | 3 | 81,88 |
| 1 | Regulador PWM 10A CYM Power | 17 | | |
| 2 | Interruptor sensor de nivel de agua 13,8" | 22,99 | | |

CABLE CONDUCTOR

| Cantidad | Descripción | Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|----------|--------------------------------|-----------|------------------|----------------|
| 20 | Cable RVK 2*2,5mm ² | 9,77 | 12 | 9,77 |

PANEL SOLAR

| Cantidad | Descripción | Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|----------|---------------------------------|-----------|------------------|----------------|
| 1 | Panel fotovoltaico 50W Victron | 110 | 12 | 155 |
| 1 | Estructura de acero galvanizado | 45 | | |

BOMBA

| Cantidad | Descripción | Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|----------|------------------------------------|-----------|------------------|----------------|
| 1 | Bomba sumergible brushless 43W 12V | 50 | 6 | 50 |

FILTRO

| Cantidad | Descripción | Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|----------|---|-----------|------------------|----------------|
| 1 | Filtro PVC y malla acero inoxidable, incluido trabajo de taller | 50 | 12 | 50 |

MONTAJE

| Cantidad | Descripción | Costo (€) | Vida útil (años) | Costo total(€) |
|----------|----------------------------|-----------|------------------|----------------|
| 1 | Montaje de todo el sistema | 100 | 12 | 100 |

| | |
|----------|-------|
| I.G.I.C. | 41,74 |
|----------|-------|

| | |
|--|---------------|
| Presupuesto de Ejecución Material | 683,97 |
|--|---------------|

| | |
|---|--------|
| Presupuesto de componentes con vida útil de 12 años (IGIC incluido) | 543,52 |
| Presupuesto de componentes con vida útil de 6 años (IGIC incluido) | 53,25 |
| Presupuesto de componentes con vida útil de 3 años (IGIC incluido) | 87,2 |

14.- REPERCUSIÓN DE LA INVERSIÓN EN EL COSTO DE ELEVACIÓN

Para determinar la repercusión que tiene la inversión en el costo de elevación de 1 m³ con cada uno de los sistemas, calcularemos:

- 1) el costo inicial de las instalación y de las reposiciones de componentes a lo largo de su vida útil (12 años)
- 2) el volumen máximo de agua elevado en 12 años

Dividiendo 1 entre 2, calcularemos la repercusión que tiene la inversión en el costo de elevación de 1 m³ de agua. Se excluyen conceptos como mantenimiento, reparaciones, etc.

CÁLCULO DEL COSTO DE INVERSIÓN INICIAL Y REPOSICIONES

El cálculo se encuentra reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 13: Costo de inversión inicial y reposiciones.

| | Costo inicial (€) | Costo de reposición a los 3 años (€) | Costo de reposición a los 6 años (€) | Costo de reposición a los 9 años (€) | Costo total (€) |
|------------------|----------------------|--|--|--|--------------------|
| Sistema Simple | 458,87 | 75,72 | 75,72 | 75,72 | 686,03 |
| Sistema Complejo | 683,97 | 87,2 | 140,45 | 87,2 | 998,82 |

CÁLCULO DEL VOLUMEN ANUAL DE AGUA ELEVADO

Para este cálculo se han utilizado las mismas ecuaciones obtenidas experimentalmente en este trabajo y reflejadas en el apartado 12, así como las bases de datos de radiación utilizados en dicho apartado.

Tabla 14: Cálculo del volumen anual de agua elevado.

| | Energía solar diaria (Wh/m ²) | Energía solar mensual (Wh/m ²) | Volumen de agua elevado (Sistema Simple) (m ³) | Volumen de agua elevado (Sistema Complejo) (m ³) |
|------------------------|--|---|--|--|
| enero | 3337 | 103447 | 66,68 | 48,62 |
| febrero | 4089 | 114492 | 56,71 | 53,81 |
| marzo | 5341 | 165571 | 115,07 | 77,82 |
| abril | 5981 | 179430 | 130,22 | 84,33 |
| mayo | 6628 | 205463 | 137,27 | 96,57 |
| junio | 7466 | 223992 | 145,14 | 105,28 |
| julio | 7733 | 239709 | 148,93 | 112,66 |
| agosto | 7214 | 223634 | 142,64 | 105,11 |
| septiembre | 5982 | 179853 | 124,88 | 84,53 |
| octubre | 3952 | 122512 | 91,72 | 57,58 |
| noviembre | 3043 | 91290 | 49,91 | 42,91 |
| diciembre | 2960 | 91760 | 60,98 | 43,13 |
| Total (1 año) | | | 1270,15 | 912,35 |
| Total (12 años) | | | 15241,80 | 10948,20 |

REPERCUSIÓN DE LA INVERSIÓN EN EL COSTO DE ELEVACIÓN

Tabla 15: Repercusión que tiene la inversión en el costo de elevación.

| | Costo de la inversión inicial y de las reposiciones en la vida útil de la instalación (€) | Volumen máximo elevado en la vida útil de la instalación (m ³) | Costo de elevación (Repercusión de la inversión en el costo de elevación) (€/m ³) |
|------------------|---|--|---|
| Sistema Simple | 686,03 | 15241,8 | 0,045 |
| Sistema Complejo | 998,82 | 10948,20 | 0,091 |

DISCUSIÓN

El costo de amortización por cada m³ de agua elevado es sensiblemente mayor en el sistema complejo. No obstante, hemos de considerar que a este sistema hemos incorporado elementos para la automatización del llenado del depósito, así como la protección de la bomba ante la bajada del nivel del pozo o reservorio de donde se extrae agua. Aun así, el costo de esos elementos (interruptores de nivel y relé eléctrico) no es relativamente importante.

Quedaría por estudiar cual sería la vida útil de la electrobomba del sistema simple, si se encuentra conectada permanentemente al panel solar. El hecho de que durante un tiempo del ciclo diario, la electrobomba trabaje a un régimen de tensión muy baja o incluso a una tensión tan baja que no sea capaz de ponerla en funcionamiento, puede reducir su vida útil.

Si desde el punto de vista económico comparamos estos dos sistemas de bombeo solar con el bombeo usando una pequeña motobomba de gasolina, el balance sería sensiblemente favorable para los primeros. Solo el costo del combustible necesario para elevar un metro cúbico de agua a cuatro metros de altura con una pequeña motobomba de gasolina ascendería a 0,11 €.

15. - CONCLUSIONES

- 1) Los sistemas de bombeo solar diseñados, han mostrado funcionar eficientemente.
- 2) El denominado “sistema simple”, compuesto principalmente por un panel fotovoltaico de 95Wp, un regulador de tensión de 12V y una electrobomba sumergible de 43W- 12V (DC), es capaz de elevar hasta 4800 L de agua a 4 m de altura, en las condiciones ambientales de la finca “La Tahonilla” de la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería de La Universidad de La Laguna.
- 3) El denominado “sistema complejo”, compuesto por un panel fotovoltaico de 50Wp, un regulador de carga solar de 12V, una batería de descarga profunda de 12V – 14Ah y una electrobomba sumergible de 43W- 12V (DC), es capaz de elevar 3800 L, para las mismas condiciones.
- 4) Las superficies de cultivo que pueden ser regadas con el “sistema simple” y “complejo” son de al menos 1000 m² y 800 m², respectivamente.
- 5) El “sistema simple” se muestra más económico, tanto en su presupuesto como en la repercusión de éste en el costo de elevación (0,045 €/m³), frente (0,091€/m³) del “sistema complejo”.
- 6) En una experiencia realizada en los campos experimentales de la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería de La Universidad de La Laguna, el “sistema complejo” funcionó correctamente durante 105 días.
- 7) Queda por evaluar el funcionamiento a largo plazo del “sistema simple”, para conocer la vida útil de la electrobomba trabajando a bajas tensiones.
- 8) Estos sistemas se presentan económicamente más viables que los basados en la utilización de pequeños motores de combustión interna.

- 9) En lugares donde no existe infraestructura de suministro eléctrico, el bombeo solar muestra su mayor potencial.

- 10) En el contexto mundial de cambio climático, es importante destacar que el funcionamiento de estos sistemas produce cero emisiones de carbono. Quedaría por estudiar la huella de carbono de la fabricación y distribución de todos los elementos que componen estas instalaciones.

- 1) The designed solar pumping systems have been shown to work efficiently.
- 2) The so-called simple system, composed mainly of a 95Wp photovoltaic panel, a voltage regulator of 12V and a submersible electric pump of 43W-12V (DC), is capable of raising up to 4800 L/day of water at 4 m in height, in the environmental conditions of the "La Tahonilla" farm of the Higher Polytechnic School of Engineering of the University of La Laguna.
- 3) The so-called complex system, consisting of a 50Wp photovoltaic panel, a 12V solar charge regulator, a 12V-14Ah deep discharge battery and a 43W-12V (DC) submersible electric pump, is capable of raising 3800 L/day, for the same conditions.
- 4) The cultivation areas that can be irrigated with the "simple system" and "complex" are at least 1000 m² and 800 m², respectively.
- 5) The simple system is more economical, both in its budget and in its impact on the cost of elevation (0.045 €/m³), compared with (0.091 €/m³) of the complex system.
- 6) In an experience carried out in the experimental fields of the Higher Polytechnic School of Engineering of the University of La Laguna, the complex system worked correctly for 105 days.
- 7) It remains to evaluate the long-term operation of the simple system, to know the useful life of the electric pump working at low voltages.
- 8) These systems are economically more viable than those based on the use of small internal combustion engines.
- 9) In places where there is no electricity supply infrastructure, solar pumping shows its greatest potential

10) In the global context of climate change, it is important to highlight that the operation of these systems produces zero carbon emissions. It would be necessary to study the carbon footprint of the manufacture and distribution of all the elements that make up these systems.

16. - BIBLIOGRAFÍA

Abdolzadeh M., Ameri M. (2009) Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *RenewableEnergy* 34:91-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.024>.

Agrocabildo (2019). Estaciones meteorológicas>> ETSIA_LAGUNA (La Laguna) [En línea] <http://www.agrocabildo.org/agrometeorologia_estaciones_detalle.asp?id=57> [Consulta: 17 Enero 2019]

AliExpress. (2018) Bomba de agua sin escobillas modelo 50F 24150A, DC 5-24 V, apta para sistemas de energía solar y agua caliente, 1 unidad, 1200 L/H 15 M, con regulador de velocidad [En línea] <<https://es.aliexpress.com/item/15m-DC-brushless-Pump-24V-DC-Solar-Power-Submersible-Speed-Adjustable-1-200L-H-Lifespan-30000hours/581089703.html>> [Consulta 14 Diciembre 2018]

Awulachew S.B., Lemperiere P., Tulu T. (2015) Irrigation methods: Drip irrigation— Options for smallholders, International Water Management Institute.

Carr AJ., Pryor TL. (2004) A comparison of the performance of different PV module types in temperature climates. *Sol Energy* 76: 285-294.

Chandel S.S., Naik M.N., Chandel R. (2017) Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76:163-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.019>.

Cloutier M., Rowley P. (2011) The feasibility of renewable energy sources for pumping clean water in sub-Saharan Africa: A case study for Central Nigeria. *Renewable Energy* 36:2220-2226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.12.019>.

Deveci O., Onkol M., Unver H.O., Ozturk Z. (2015) Design and development of a low-cost solar powered drip irrigation system using Systems Modeling Language. *Journal of Cleaner Production* 102:529-544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.124>.

Gopal C., Mohanraj M., Chandramohan P., Chandrasekar P. (2013) Renewable energy source water pumping systems—A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25:351-370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.012>.

Hamidat A., Benyoucef B., Hartani T. (2003) Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. *Renewable Energy* 28:1081-1096. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00058-7).

Hossain M.A., Hassan M.S., Mottalib M.A., Ahmmed S. (2015) Technical and Economic Feasibility of Solar Pump Irrigations for Eco-friendly Environment. *Procedia Engineering* 105:670-678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.047>.

Kaunmuang P., Kirtikara K., Songprakorb R., Thepa S., Suwannakum T. (2001) Assessment of photovoltaic pumping systems in Thailand – one decade experience. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67:529-534. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00322-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00322-6).

Kolhe M., Joshi J.C., Kothari D.P. (2004) Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 19:613-618. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.827032>.

Kordzadeh A. (2010) The effects of nominal power of array and system head on the operation of photovoltaic water pumping set with array surface covered by a film of water. *Renewable Energy* 35:1098-1102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.024>.

Kumar M., Reddy K.S., Adake R.V., Rao C.V.K.N. (2015) Solar powered micro-irrigation system for small holders of dryland agriculture in India. *Agricultural Water Management* 158:112-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.006>.

Mahjoubi A., Mechlouch R.F., Mahdhaoui B., Ben Brahim A. (2014) Real-time analytical model for predicting the cell temperature modules of photovoltaic water pumping systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 6:93-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.01.009>.

Mahmoud M.M., Kukhun W.R., Daud A.-K. (2013) Efficiency improvement of a DualPVWater pumping system on a desert well by solar matched load control. *International Journal of Energy Engineering* 3:151-157.

Martín Jiménez J. (2008) *Sistemas solares fotovoltaicos. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones* Editor: Antonio Madrid Vicente. AMV Ediciones.

Meah K., Fletcher S., Ula S. (2008) Solar photovoltaic water pumping for remote locations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12:472-487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.008>.

Mohammed Wazed S., Hughes B.R., O'Connor D., Kaiser Calautit J. (2018) A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:1206-1225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.039>.

Mohammedi A., Mezzai N., Rekioua D., Rekioua T. (2014) Impact of shadow on the performances of a domestic photovoltaic pumping system incorporating an MPPT control: A case study in Bejaia, North Algeria. *Energy Conversion and Management* 84:20-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.008>.

Mokeddem A., Midoun A., Kadri D., Hiadsi S., Raja I.A. (2011) Performance of a directly-coupled PV water pumping system. *Energy Conversion and Management* 52:3089-3095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.024>.

Monsolar .(2016) ¿Qué es y qué hace un regulador de carga solar? [En línea]
<<https://www.monsolar.com/blog/que-es-y-que-hace-un-regulador-de-carga-solar/>>
[Consulta: 14 Diciembre 2018].

Moulay-Idriss C., Mohamed B. (2013) Application of the DTC control in the photovoltaic pumping system. *Energy Conversion and Management* 65:655-662. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.08.026>.

NWP. (2006) Soluciones ingeniosas de agua. Ejemplos de tecnologías innovadoras y económicas para pozos, bombas, almacenamiento, irrigación y tratamiento (Smart watersolutions). in: *NetherlandsWaterPartnership* (Ed.), 4th *WorldWaterForum*, México.

Pande P.C., Singh A.K., Ansari S., Vyas S.K., Dave B.K. (2003) Design development and testing of a solar PV pump based drip system for orchards. *Renewable Energy* 28:385-396. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00037-X).

Reca J., Torrente C., López-Luque R., Martínez J. (2016) Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. *Renewable Energy* 85:1143-1154.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.056>.

Regüengo Álvarez, I.2010. Estudio sobre el reciclado de tuberías de polietileno y su utilización en sistemas de riego de bajo coste. Trabajo de Fin de Grado. Director/es: Sáenz, P. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Universidad de La Laguna.

Sáenz Pisaca D., Marzol M., Alfonso C. (2012) Evaluación de un sistema de “Riego de Bajo Coste” y capacitación agrícola de una Comunidad Rural desfavorecida en Senegal.

Sontake V.C., Kalamkar V.R. (2016) Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59:1038-1067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>.

Treephak K., Thongpron J., Somsak D., Saelao J., Patcharaprakiti N. (2015) An economic evaluation comparison of solar water pumping system with engine pumping system for rice cultivation. *Japanese Journal of Applied Physics* 54:08KH01. DOI: 10.7567/jjap.54.08kh01.

Wikiwater. (2018a) E-38 Las Bombas de Soga. [En línea]< <https://wikiwater.fr/e38-las-bombas-de-soga> > [Consulta: 20 Enero 2019]

Wikiwater. (2018b) E-58 Las Bombas específicas a bajo precio y doble pedal para riego. [En línea]< <https://wikiwater.fr/e58-las-bombas-especificas-a-bajo> > [Consulta: 20 Enero 2019]

Williams Daniel E., Obeng Dennis M., Akuffo Fred O. Test on photovoltaic radial centrifugal pump systems. *Renewable Energy Transforming Business*: 402-13. Citado por Sontake V.C., Kalamkar V.R. (2016) Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59:1038-1067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>

Xunzel. (2018) SOLAR X™ Series- XUNZEL. [En línea]
<<http://www.xunzel.com/cast/assets/solarx-xunzel-esp.pdf>> [Consulta: 13 Diciembre 2018]

Yahya H.N., Sambo A.S. (1995) Design and installation of solar photovoltaic powered water pumping system at Usmanu Danfodiyo University, Sokoto. *Renewable Energy* 6:311-312. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00029-J](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00029-J).